

非稳腔 Nd:YAG 薄片激光器腔内离焦的影响和补偿

尚建力 于 益 安向超 吴 晶 唐 淳

中国工程物理研究院应用电子学研究所高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 基于腔内振荡激光波前曲率半径自再现条件,研究了腔内元件离焦对非稳腔腔内振荡激光参数的影响。在4片薄片串接的放大率为1.8的虚共焦非稳腔中,根据实验测量不同抽运功率下薄片的离焦量,当单个薄片具有焦距为-100 m 离焦时,激光-增益区交叠效率会降低9%,腔放大率升高至2.3,并因腔内激光尺寸与薄片有效孔径失配新增30%的腔内损耗,这些影响均会导致激光光光效率的降低。对比了几种离焦补偿方法,发现腔内插入变焦透射元件可以在大动态范围内实现较好的补偿效果。实验中,在腔内插入特别设计的光焦度可在 -0.016 m^{-1} 到 0.060 m^{-1} 调节的变焦透镜组,在4840 W 抽运条件下,离焦补偿后输出激光功率可以提升2.33倍,并且通过检测单程探测光束的波面特性,对激光器动态补偿,实现了1~100 Hz 重复频率下单脉冲能量10 J 激光输出。

关键词 激光器; 固体激光器; 薄片激光器; 非稳腔; 离焦补偿

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0102005

Influence and Compensation of Intra-Cavity Defocusing in Unstable Resonator Nd:YAG Thin-Disk Laser

Shang Jianli Yu Yi An Xiangchao Wu Jing Tang Chun

*Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Institute of Applied Electronics,
Chinese Academy Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

Abstract Based on the self-reproduction condition of laser wavefront curvature, the influences of disk defocus on laser parameters are calculated. The overlapping efficiency decreases by 9%; the magnification rises to 2.3, and the intra-cavity loss increases to 30% due to a laser beam size mismatch when each disk has a focal length of -100 m in the positive-branch confocal unstable resonator containing four disk with magnification of 1.8. Therefore, the optical conversion efficiency and stability are reduced significantly. Several methods of defocus compensation are compared, it is found that inserting variable-focus lens in resonator is useful in large dynamic range. In the experiment, a lens group used for compensate components with the dynamic range from -0.016 m^{-1} to 0.060 m^{-1} is designed carefully and inserted into the resonator. When the pump power is 4840 W, the output power can be improved by 2.33 times compared with that under the non-compensation condition. Under this compensation, the pulse energy of 10 J can be maintained from 1 Hz to 100 Hz.

Key words lasers; solid-state laser; disk laser; unstable resonator; defocus compensation

OCIS codes 140.3460; 140.3410; 140.5680; 140.6810

收稿日期: 2014-07-08; 收到修改稿日期: 2014-08-26

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室课题

作者简介: 尚建力(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: shangjianli@gmail.com

1 引 言

薄片激光器因其增益介质横纵比大、传热距离短、一维传热等特点,可以实现高功率密度抽运,获得高功率、高光束质量激光输出^[1-5]。同时,因为薄片增益介质具有较大的增益区尺寸,特别是大尺寸Nd³⁺掺杂薄片^[6-7],其抽运区直径可以达到几十毫米。在平凹稳定谐振腔薄片激光器中,腔基模尺寸^[8]远小于介质增益区尺寸而将使大量高阶模激振,无法获得高光束质量激光输出。为了降低振荡激光模式的阶次,可以通过使用凹凸稳定腔、望远镜腔等特殊腔型提高增益介质上的基模尺寸。例如,2009年德国斯图加特大学 Mende 等^[9]将 Yb:YAG 焊接在 CuW 合金热沉上,利用在抽运过程中激光介质的弯曲实现了动态范围较大的凹凸稳定腔,单个薄片晶体获得了 496 W,光束质量因子 $M^2=1.55$ 的高光束质量激光输出。在此之后,该机构的 Piehler 等^[10]研制的掺 Yb³⁺薄片激光器腔内插入非球面像差补偿元件实现了 $M^2=1.4$ 的 1.1 kW 激光输出。但是这种方式存在着谐振腔失调灵敏度高,难于多薄片串接,腔结构复杂等缺陷,同时其输出的实心光斑不利于卡塞格林光学系统发射。

非稳腔具有较大的模体积,在介质增益区尺寸较大时也可以实现高光束质量激光输出。特别是虚共焦非稳腔因其输出激光为平面波且腔内无实焦点,被广泛研究和应用于 CO₂、准分子和化学激光器中^[11-12]。但受限于固体介质光学畸变(远大于气体介质),对非稳腔的影响明显^[13],固体激光领域非稳腔的研究和应用相对较少。必须采用特别的设计,对腔内光学畸变进行补偿才能实现非稳腔固体激光器高光束质量、高光光转换效率输出。美国波音公司采用了包含 10 片相互共轭补偿的 Yb:YAG 晶体(增益区尺寸约 10 mm)且具有腔内共轭补偿装置的(GRM)腔可实现高功率激光输出^[14]。但受限于准三能级系统的 Yb:YAG 增益介质高阈值和温度敏感特性^[15],需要采用被高亮度多通抽运的超薄薄片(200 μm 左右)^[3,15]。这种超薄薄片的制备加工,多通抽运光学机构的设计、加工和装配,以及抽运源本身都具有很高的技术难度。为了避免上述问题,本文采用 Nd:YAG 薄片展开研究,与掺 Yb³⁺薄片相比,其对抽运功率密度、热传递距离的要求均大幅降低。但因为 Nd:YAG 薄片产热率较高、热传导距离较长,最大抽运功率密度远低于 Yb:YAG 薄片,为实现高功率激光输出,需采用片数更多、抽运区尺寸更大的薄片增益介质。随着介质口径增大,腔内难于采用 4f 光学系统将薄片介质相互共轭成像,而只能采用非共轭的反射式薄片序列,这些位于腔内的不同位置的各薄片随着抽运功率提高而不断增大的光学畸变将影响腔内激光特性,激光器的效率会不断降低。这一光学畸变中,离焦为主体成分,本文将对其对谐振腔影响和补偿方法展开研究。

2 理论计算

一种典型的背面冷却反射式薄片如图 1 所示,薄片前表面一般针对抽运光波长和激光波长镀增透膜,后表面针对抽运光波长和激光波长镀高反膜。为了冷却,薄片焊接在强制对流冷却的冷却器上,因此在实现均匀抽运和均匀冷却的条件下,薄片内部热流轴向传输,即薄片轴向具有较大的温度梯度。通过实验测量或计算可以发现,在较高功率抽运条件下,薄片前表面温度明显高于后表面温度,这一轴向温度差异会导致薄片产生弯曲。当薄片在谐振腔中使用时,这一弯曲会产生以负离焦(凸面反射)为主的动态光学畸变^[16]。因

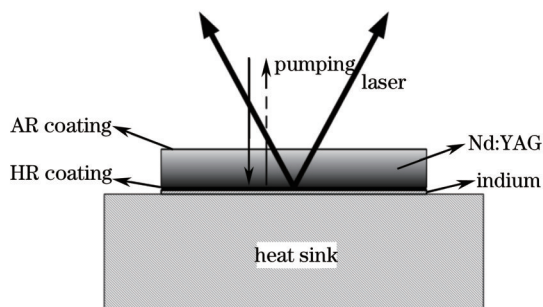


图 1 反射式薄片示意图

Fig.1 Schematic layout of disk module using reflection

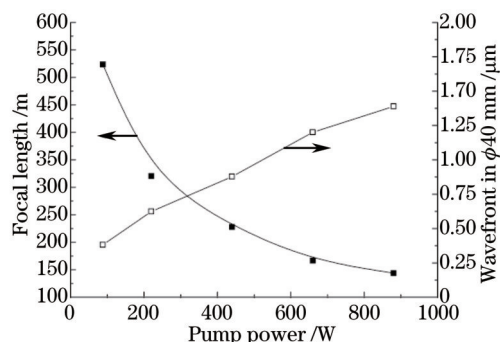


图 2 薄片离焦焦距、反射波前畸变与抽运功率的关系

Fig.2 Focal length and reflected wavefront aberration versus pump power

为薄片被焊接于冷却器上而具有一定的约束。因为焊料随温度变化的各项物性参数尚不完善,弯曲过程中焊料的力学特性非常复杂,这种焊接薄片弯曲面型和抽运功率的关系不论是解析计算还是有限元数值计算均非常困难。但是这种面型变化可以实验测量,不同抽运功率下,弯曲薄片焦距如图2所示。这一弯曲中的主体部分,即离焦对光束传输特性的改变必将改变谐振腔的工作特性。

2.1 离焦对虚共焦非稳腔的影响

为实现较高功率的激光输出,针对一种四薄片串接非稳腔展开研究,这一谐振腔如图3所示。在理想情况下,薄片可视为平面反射镜不改变腔内激光的传输方向,这是因为两个腔镜焦点重合构成理想的虚共焦非稳腔,其放大率 $M=R_1/R_2$,在这一腔中,球心位于公共焦点的球面波(从凸面镜向凹面镜传播)和平面波(从凹面镜向凸面镜传播,并在输出镜处部分反射耦合输出)为本征模,并保持其波前曲率半径的自再现^[17]。其主要参数如表1所示,此外,环形输出镜尽可能靠近凹面腔镜放置。

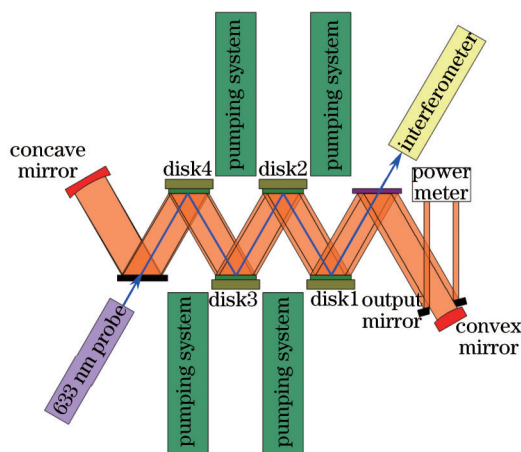


图3 四薄片串接非稳腔示意图

Fig.3 Schematic layout of the unstable resonator with six disks

表1 谐振腔参数

Table 1 Parameters of unstable resonator

Parameter	Value
Curvature radius of concave mirror R_1 /m	9.675
Curvature radius of convex mirror R_2 /m	5.375
Aperture of output mirror (meridian) /mm	19.9
Aperture of output mirror (sagittal) /mm	22.2
Reflection angle of disk l (°)	30
Reflection angle of output mirror l (°)	15
Distance between concave mirror and disk ₁ L_1 /mm	1000
Distances between disk _i and disk _{i+1} L_2 /mm	200
Distance between disk4 and convex mirror L_3 /mm	550
Diameter of disk /mm	40
Thickness of disk /mm	2
Size of pumping spot /mm	Φ40

实际薄片具有的波前畸变,一部分为薄片材料加工、焊接过程中存在的静态畸变,另一部分为薄片在抽运过程中引起的各种热畸变,即动态畸变。静态畸变和动态畸变的机理和像差成分构成均是非常复杂的。本文对其中占最大比例的离焦成分展开研究。如果薄片出现离焦,这一非稳腔将不再具有共焦特性。基于振荡激光波前曲率半径的自再现条件,研究具有腔内离焦的振荡激光特征。可以写出非稳腔的往返矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \prod_{i=1}^4 \left\{ \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_d} & 1 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 & L_3 - L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & L_3 - L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \prod_{i=1}^4 \left\{ \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_d} & 1 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{bmatrix}$$

式中 f_d 为薄片焦距, L_1, L_2, L_3, R_1, R_2 均为表1所述的谐振腔参数。因为腔中的在自再现模式中的某条光线,在谐振腔中振荡的激光在某处具有波前曲率半径 ρ ,其腔内往返一周后仍具有相同的波前曲率半径。根据ABCD定律可以获得:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{(D-A) \pm [(A+D)^2 - 4]}{2B} \quad (5)$$

因此,该光束这一截面上距光轴距离为 x 的光线传输方向与光轴夹角之间的关系为 $\theta = \arctan(x/\rho)$ 。而这一截面上光束尺寸即 x 受限于光学元件尺寸,当元件尺寸和光束尺寸失配时,光束将无法高效提取或具有显著损耗。

薄片具有不同离焦量时腔内激光传输中尺寸变化如图4(a)所示。在弧矢平面上研究腔内光束的尺寸,即分析光束截面椭圆的长轴尺寸。可以看出,当薄片没有光焦度时,光束尺寸同时受限于输出镜通光孔径和薄片孔径,可以实现较高的激光-抽运交叠效率并保持较低的损耗。但是当薄片具有发散特性时导致光束尺寸失配,在传输过程中将超出薄片口径而产生较大的损耗,由此引起的损耗与薄片屈光度的关系如图5所示,可以看出-100 m的离焦便可导致高达30%的损耗,这必将大幅降低激光器的光光效率,此外,这些损耗的激光能量部分被热沉吸收,这些热效应均可能导致谐振腔失调从而进一步降低激光器的光光效率,并导致其运行状态不稳定。

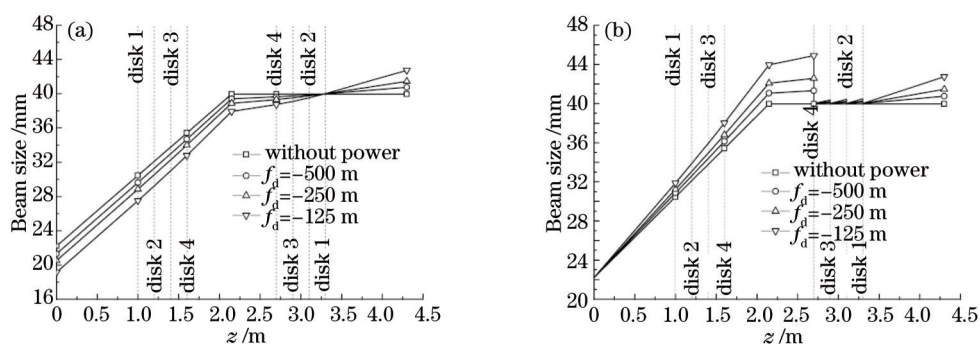


图4 不同薄片离焦状态下腔内激光光束尺寸分布。(a)使用恒定通光孔径输出镜;(b)使用优化通光孔径输出镜

Fig.4 Change of intra-cavity laser beam size under different defocusing of disk. (a) With fixed aperture of coupling output mirror; (b) with optimized aperture of coupling output mirror

可以通过减小输出镜的通光孔径来避免光束传输中超出薄片口径,针对不同的薄片离焦量优化计算对应的输出镜,腔内光束传输特性如图4(b)所示。可以看出,这种条件下腔内激光-抽运交叠效率会随着薄片弯曲的增强而降低,其与薄片屈光度的关系如图5所示。与此同时,不论是使用固定的耦合输出镜,还是使用根据离焦状况特别优化的耦合输出镜,谐振腔放大率 M 都会随着薄片离焦量的改变而改变,两种条件下放大率变化特征如图6所示。因为耦合输出率近似为 $1-(1/M^2)$,这意味着薄片离焦增强会导致耦合输出率急剧升高。

总之,理想的虚共焦非稳腔中元件产生发散性离焦后,会明显改变腔内激光特征,并导致光光转化效率、激光稳定性的降低。因此必须对腔内元件离焦进行有效补偿,避免其导致的各种性能劣化。

2.2 对虚共焦非稳腔内的离焦补偿

为了解决薄片抽运过程中离焦对非稳腔带来的各项不利因素,有必要对其进行补偿。通过改变非稳腔的结构或插入特定的补偿元件,避免因光束尺寸失配导致损耗显著增大;维持较高的交叠效率和相对恒定的腔放大率,以提升激光器的光光转化效率和光束稳定性。

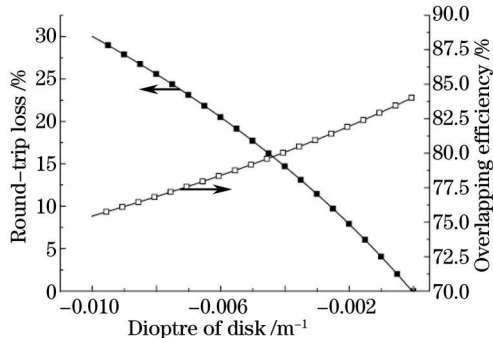


图5 新增腔内损耗(恒定输出孔径)和交叠效率(优化输出孔径)与薄片光焦度的关系

Fig.5 Increment of loss versus the dioptré of disk under fixed aperture and the overlapping efficiency versus the dioptré of disk under optimized aperture

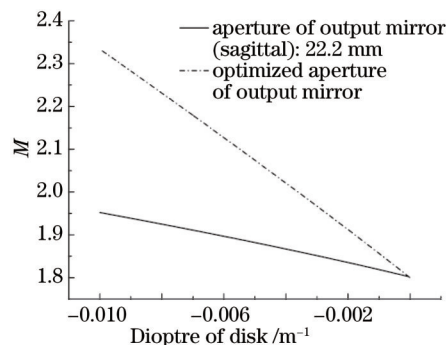


图6 腔放大率与薄片光焦度的关系

Fig.6 Magnification of unstable resonance versus the dioptré of disk

本文将分析3种补偿方式。第一种方式通过改变腔长对离焦进行补偿。优化计算薄片焦距为-125 m时的优化腔参数,若将表1中 L_1 增大为1.40 m, R_2 更改为7.305 m,该工作点下腔放大率为1.8。不同薄片离焦状态下腔内激光传输特征如图7所示,该方法只能在特定薄片离焦工作点上实现较好的矫正。谐振腔参数与薄片屈光度的关系如图8所示,这种方法还存在过补偿问题,当薄片实际离焦弱于优化工作点,非稳腔放大率显著降低,甚至可能演化为稳腔,因为腔镜均为全反镜,谐振腔没有有效耦合输出,腔往返损耗极低,腔内光强急剧升高,可能导致腔内元件的损坏。因此这种补偿方式无法在较大的动态范围内正常工作。

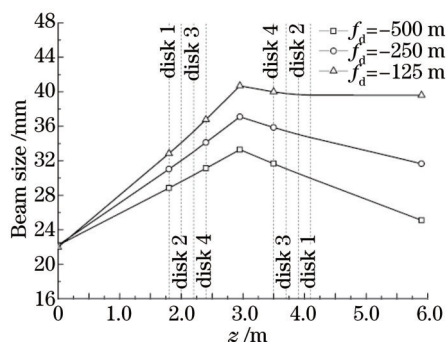


图7 增大腔长补偿离焦非稳腔内激光光束尺寸与薄片离焦量的关系

Fig.7 Change of intra-cavity laser beam size under different defocusing of disk with defocusing compensation using longer cavity length

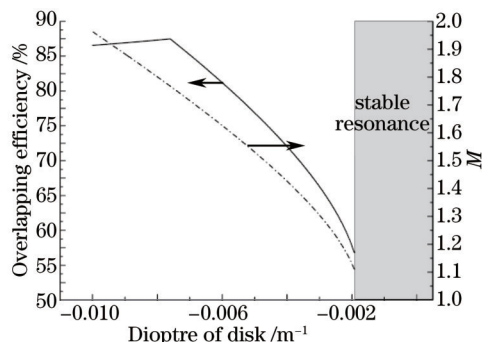


图8 增大腔长补偿离焦非稳腔内交叠效率、放大率与薄片光焦度的关系

Fig.8 Overlapping efficiency and magnification versus the dioptré of disk with defocusing compensation using longer cavity length

第二种补偿方式是采用反射式补偿,可以在谐振腔多个位置插入反射镜。针对薄片焦距为-125 m离焦优化计算,在相邻薄片之间插入曲率半径为187.5 m的凹面反射镜。腔内激光传输特性如图9所示,这种方法也只在特定工作点实现较好的腔参数,此外该补偿镜加工难度大、装配调试要求高。

第三种补偿方法是在腔内插入透射式补偿元件,透射式元件可以采用透镜组合实现焦距的改变,从而实现较大的动态补偿范围。透镜组可由焦距接近的正负两片透镜组成,当焦点重合时为无焦系统,当具有光学间隔时,透镜组具有很长的焦距。近似地, $f_{\text{trans}}=f_1 f_2 / \Delta$,其中 $f_1=689$ mm和 $f_2=-667$ mm分别为正负透镜焦距, Δ 为两者光学间隔。在如表1所示谐振腔中,disk₁与凸面镜之间插入该变焦透镜组。调整补偿焦距使输出镜处平面波为腔的本征模式,对应的最优光学间隔与薄片光焦度关系如图10所示,谐振腔在很大的动态范围内可以维持几乎恒定的放大率。在实际使用中,腔内元件除离焦外还有更高阶次像差,振荡激光的波面特征与腔内元件光学畸变之间关系复杂,难于通过输出激光波面确定腔内其离焦特征。一种简化测量方法是使平面波单次通过变焦透镜组、各薄片,调节补偿透镜焦距使测量光束波面没有离焦分量。从图10可

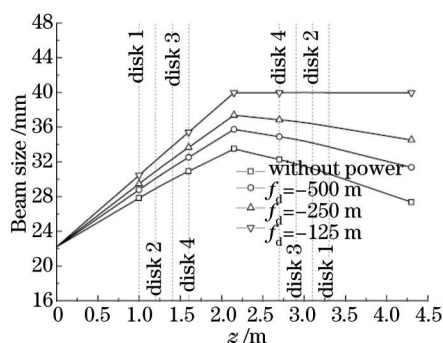


图9 凹面反射镜补偿离焦非稳腔内激光光束尺寸与薄片离焦量的关系

Fig.9 Change of intra-cavity laser beam size under different defocusing of disk in defocusing compensation using concave mirror
 可以看出,这种近似方法的补偿量和补偿效果较理想方法差距较小。几个特定薄片离焦状态下的腔内激光传输特征如图 11 所示,利用这种方法补偿,几种状态下腔内激光模式特征接近,没有因孔径不匹配引起额外的损耗,激光可以近平行光束输出,实现了较好的补偿效果。

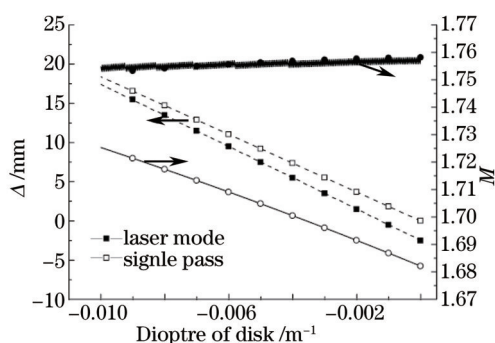


图 10 最佳光学间隔、放大率与薄片光焦度的关系

Fig.10 Optimized optical interval and magnification versus the dioptricity of disk using varifocus lens

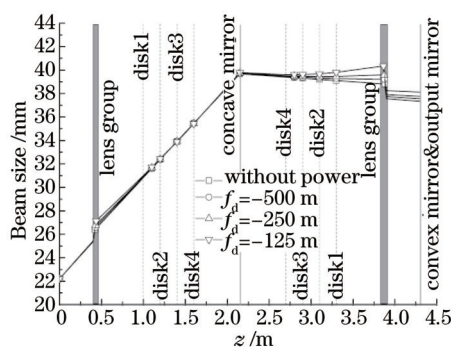


图 11 变焦透镜组补偿内激光光束尺寸与薄片离焦量的关系

Fig.11 Change of intra-cavity laser beam size under different defocusing of disk using varifocus lens

2.3 变焦透镜组设计

非稳腔内插入焦距可变的透射元件可以很好地对腔内离焦进行补偿,需要合理地进行光学设计,使该透镜组合在实现一定范围变焦的基础上,避免引入其他像差,同时对公差容限进行优化,避免过高的装调要求。根据腔内激光光束尺寸、薄片动态离焦的测量结果,使用光学设计软件对系统以球差为主的像差以及公差容限进行优化,设计变焦透镜组具体参数如表 2 所示,几个状态示意和像差分布如图 12 所示。从 0~35 mm 改变两片透镜间距,这一透镜组光焦度变化范围从 -0.016 m^{-1} 到 0.060 m^{-1} ,满足动态补偿范围要求,在变焦过程中,透镜可以全程保持较低的像差。在实验中将以此透镜组作为透射式离焦补偿元件插入腔内。

表 2 变焦透镜组参数

Table 2 Parameters of varifocus lens

Parameter	Value
Surface 1 curvature radius of lens1 /mm	309.9
Surface 2 curvature radius of lens1 /mm	Inf
Thickness of lens1 /mm	10
Aperture of lens1 /mm	100
Surface 1 curvature radius of lens1 /mm	3169
Surface 1 curvature radius of lens1 /mm	273.8
Thickness of lens1 /mm	10
Aperture of lens1 /mm	100
Distance between lens1 and lens2	0~35
Material of lens	Fused silica

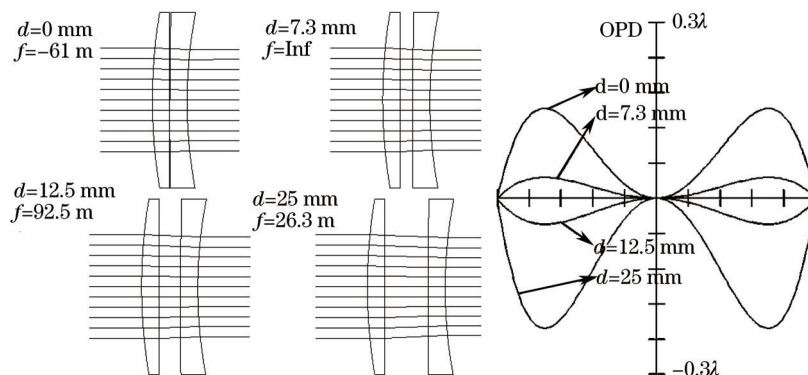


图 12 变焦透镜组结构和像差分布

Fig.12 Schematic layout of the varifocus lens and the aberration of lens

3 实验研究

结构如图 3, 参数如表 1 的非稳腔薄片激光器中插入如图 12、表 2 所述的变焦透镜组, 其中 Nd:YAG 薄片口径为 40 mm、厚度为 2 mm、掺杂浓度为 1.6%。使用双通抽运, 当抽运功率为 1200 W 时, 产生的动态离焦焦距达 -200 m。实验装置照片如图 13 所示。为了监测腔内光学畸变, 将 632.8 nm 的准直激光导入腔内, 其依次通过各薄片和变焦透镜组后导出腔外, 并用干涉仪测量其波面。不使用腔内像差补偿时, 不同抽运状态下探测光波面如图 14 所示。可以看出, 薄片再加工和焊接过程中有约 2 μm 的静态像差, 其泽尼克分布较为复杂, 除离焦外还具有较大成分的高阶像差。当抽运功率不断增加时, 薄片产生动态像差, 而这部分像差的主体成分为离焦。在单个薄片抽运功率为 1200 W 时, 在 Φ40 mm 口径内四片薄片的离焦达到 4 μm, 即单薄片焦距 $f_i \approx -200$ m。根据之前计算结果, 这样的离焦定会会影响非稳腔的状态。

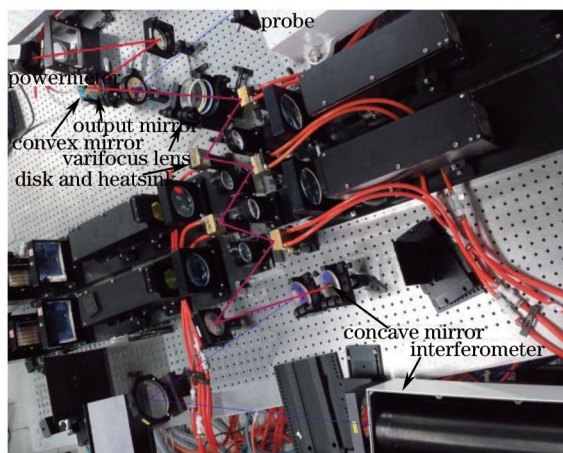


图 13 实验装置

Fig.13 Experimental setup

使用变焦透镜组对薄片离焦进行补偿, 实时变焦透镜组的透镜间隔, 并监测探测光束的波面, 当其没有离焦畸变时, 认为对腔内离焦完成了补偿。补偿后不同抽运功率下的像差分布如图 14 所示。可以看出, 补偿后腔内单程光学畸变的峰谷(PV)值和均方根(RMS)值降低明显, 其泽尼克分布中离焦分量几乎消失。但是, 薄片在被抽运过程中, 其弯曲是个复杂的力学过程, 并受抽运均匀性、冷却均匀性、焊接层约束等因素影响, 并不能产生理想的抛物面弯曲, 即除离焦外会产生高阶像差, 同时, 变焦透镜组的像差优化仅针对平面波进行, 而准直测量光束在通过各薄片后已具有一定的离焦和其他像差, 这些薄片本征具有的、动态加载产生的和离焦补偿产生的各种高阶像差均会对输出激光的光束质量、功率和稳定性产生影响, 但是之间关系非常复杂, 这些问题将不在本文中研究。

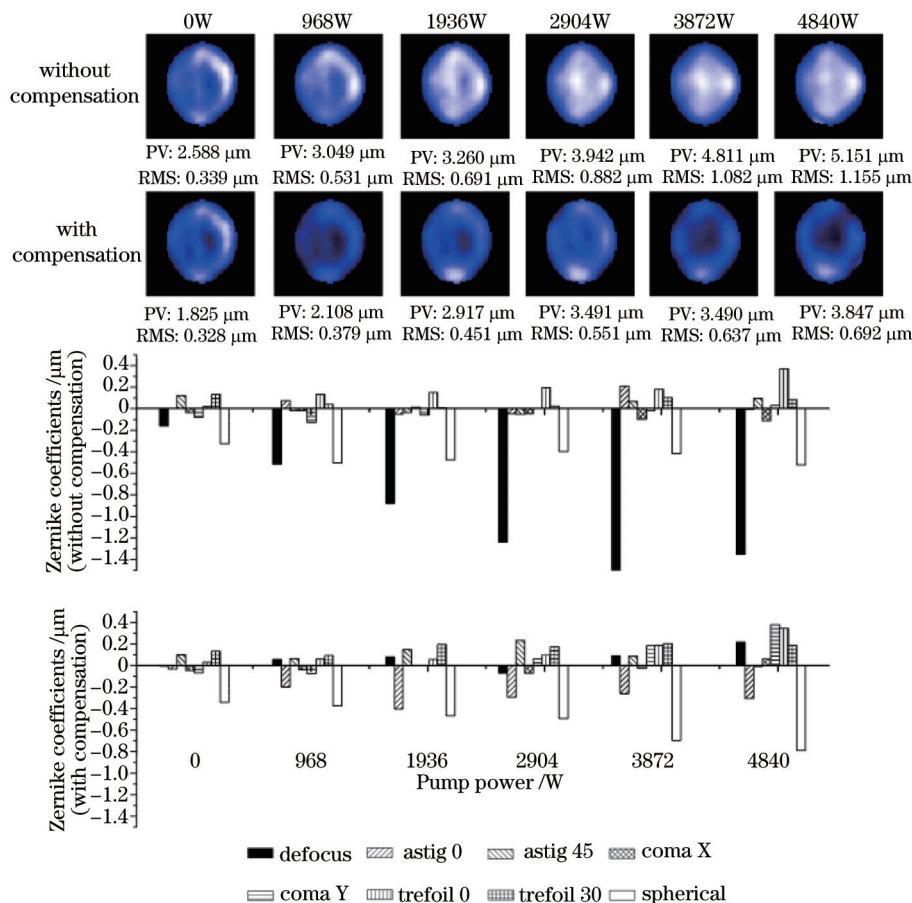


图 14 离焦补偿前后单程探测光波面

Fig.14 Wavefront of single pass probe without and with defocusing compensation

在实验中,采用准连续抽运,单个薄片的脉冲抽运功率可达 48.3 kW,占空比为 0%~2.5%可调。在最大脉冲抽运功率下,离焦补偿前后的单脉冲能量随重复频率的变化如图 15 所示,在离焦补偿前,随着重复频率升高,激光单脉冲能量明显降低,同时因为谐振腔损耗增大,并且有杂散光超出薄片范围被支撑结构吸收,谐振腔稳定性明显降低,脉冲能量抖动明显,而离焦补偿后,不同重复频率下输出激光单脉冲的能量始终可以维持在 10 J 左右,并且具有较好的稳定性。图 16 对比了 10 Hz 和 100 Hz 条件下补偿前后的输出光斑近场分布。可以看出不进行离焦补偿,随着重复频率升高,谐振腔放大率不断增大,输出环斑尺寸不断增大且均匀性不断变差,而离焦补偿后,放大率的增大效应被明显抑制,输出环斑均匀性也有一定程度的提高,但是,

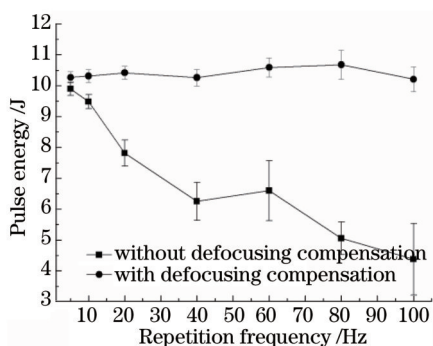


图 15 不同重复频率下的单脉冲能量

Fig.15 Single pulse energy versus repetition frequency

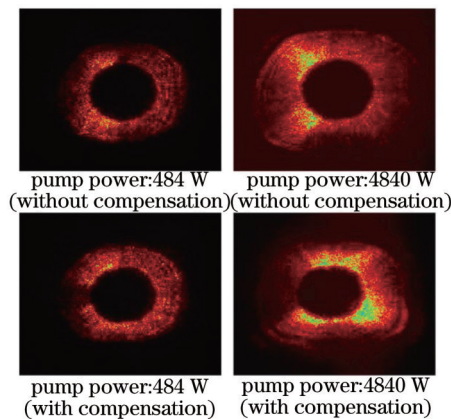


图 16 不同状态下的输出激光光斑

Fig.16 Output laser spot under different conditions

因为随着抽运功率升高,薄片高阶动态畸变无法补偿,这些像差也会使输出激光光斑形状明显变形。相应地,不同占空比下抽运功率-激光输出功率/光光效率曲线如图 17 所示,可以看出,激光器没有因为腔内动态畸变增加而引起斜效率和光光效率的降低。即这种离焦补偿方法基本消除了腔内离焦对非稳腔激光器运行的影响,达到了较好的补偿效果。

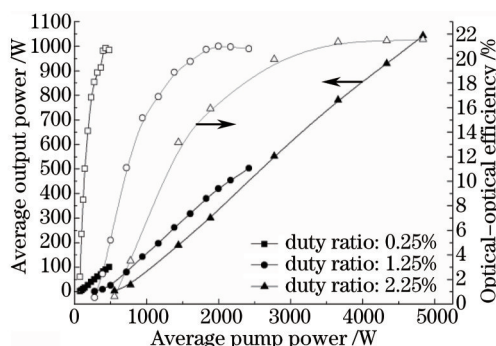


图 17 不同占空比下的输出功率和光光效率

Fig.17 Output power and optical-optical efficiency in different duty ratios using defocusing compensation

4 结 论

大口径薄片被高功率抽运时会因轴向温度梯度导致薄片弯曲,即产生负离焦。实验发现,离焦会导致腔内振荡激光特性发生明显变化,随着离焦的增强,交叠效率不断降低,腔放大率不断增大,并因振荡激光光束尺寸失配产生较大的腔内损耗。腔内插入调焦透镜组可以在薄片不同的抽运功率下,保持几乎恒定的放大率和交叠效率,并维持准平行光束输出。设计了由正负透镜组成变焦透镜组,其光焦度变化范围从 -0.016 m^{-1} 到 0.060 m^{-1} ,并全焦段保证较小的像差。在实验中,四片薄片串接构成放大率为 1.8 的虚共焦非稳腔,在低重复频率工作状态下,因为薄片形变较小,离焦补偿效果不明显。但在高重复频率工作状态下,若不进行离焦补偿,光光转化效率会随抽运功率升高而迅速降低,在 100 Hz, 48.4 J 单脉冲抽运能量时输出单脉冲能量仅有 4.4 J;补偿后非稳腔放大率增长速率明显降低,可基本维持较高的光光转换效率,单脉冲能量维持在 10 J 以上,获得了较好的补偿效果。

参 考 文 献

- 1 Voss Andreas, Brauch Uwe, Wittig Klaus, *et al.*. Efficient high-power-diode-pumped thin-disk Yb:YAG-laser[C]. SPIE, 1995, 2426: 501-508.
- 2 Contag Karsten, Brauch Uwe, Giesen Adolf, *et al.*. Multihundred-watt diode-pumped Yb:YAG thin disk laser[C]. SPIE, 1997, 2986: 2-9.
- 3 Stewen C, Contag K, Larionov M, *et al.*. A 1-kW CW thin disc laser[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2000, 6(4): 650-657.
- 4 Jochen Deile, Rudiger Brockmann, David Havrilla. Current status and most recent developments of industrial high power disk lasers [C]. OSA/CLEO, 2009. A4.
- 5 Tang Chun. Review on high brightness high average power solid-state laser technology[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(4): 488-496.
唐 淳. 高亮度高平均功率固体激光器技术评述[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 488-496.
- 6 Chun Tang, Kai Zhang, Qingsong Gao, *et al.*. 2D stacks diode array pumped high power thin disk laser[C]. CLEO/Europe, 2003. 77.
- 7 Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo, *et al.*. Study on diode-pumped Nd:YAG disk laser[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(z1): 15-18.
姚震宇, 蒋建锋, 涂 波, 等. 二极管抽运 Nd:YAG 薄片激光器技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(z1): 15-18.
- 8 Erhard Ing Steffen. Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser[D]. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2002.
- 9 Jens Mende, Gerhard Spindler, Elke Schmid, *et al.*. Thin-disk lasers with dynamically stable resonators[C]. OSA/ASSP, 2009. B19.
- 10 Y Peng, Y Lim, Y Guo, *et al.*. Near fundamental mode 1.1 kW Yb:YAG thin-disk laser[J]. Opt Lett, 2013, 38(10): 1709-1711.
- 11 H Fang, M R Perrone. Numerical simulation of excimer lasers with unstable resonators[J]. IEEE J Quantum Electron, 1994, 30(10):

2369-2375.

- 12 Wei Jifeng, Chang Yan, Huang Dequan, *et al.*. Near-field propagation characteristics of stray light for unstable resonator chemical oxygen-iodine laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 151-157.
魏继锋, 常 艳, 黄德权, 等. 非稳腔氧碘激光器近场杂散光传输特性[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 151-157.
- 13 Jin Quanwei, Jiang Jianfeng, Tu Bo, *et al.*. Theory analysis and experimental investigation of thermodynamic unstable resonator solid state laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 160-165.
靳全伟, 蒋建锋, 涂 波, 等. 非热稳定非稳腔固体激光理论分析与实验研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 160-165.
- 14 Matthew D Nixon, Michael C Cates. High energy high brightness thin disk laser[C]. SPIE, 2012, 8547: 85470D.
- 15 Karsten Contag, S Erhard, A Giesen. Calculations of optimum design parameters for Yb:YAG thin disk lasers[C]. ASSL/OSA, 2000. E2.
- 16 Boly B A, Weiner J H. *Theory of Thermal Stresses* Hoboken[M]. Hoboken: Wiley, 1960.
- 17 Lü Baida. *Laser Optics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
吕百达. *激光光学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

栏目编辑: 张 雁