

# Yb:YAG 薄片多程激光放大器的设计及实验研究

宋恩茂<sup>1</sup>, 朱广志<sup>1\*</sup>, 王海林<sup>1</sup>, 李征远<sup>1</sup>, Kozlov Aleksei<sup>2</sup>, 朱晓<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>M.F.Stelmakh 股份有限公司极地研究所, 莫斯科 117342, 俄罗斯

**摘要** 薄片多程激光放大器通过种子光多次通过片状增益介质来提取能量, 可实现高平均功率、高脉冲能量、高光束质量的激光输出, 是高功率短脉冲激光系统的重要组成部分。基于 Yb:YAG 片状晶体, 设计并搭建了可实现种子光 20 次放大的薄片多程激光放大器。采用该激光器对高重复频率种子光进行放大实验, 认为该片状多程激光放大器可有效保证输出光的光束质量, 但光谱不匹配会影响脉冲光的单程增益。

**关键词** 激光器; 放大器; 脉冲激光; 光束质量; 稳定性

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1214001

## Design and Experimental Investigation of Yb:YAG Thin-Disc Multipass Laser Amplifier

Song Enmao<sup>1</sup>, Zhu Guangzhi<sup>1\*</sup>, Wang Hailin<sup>1</sup>, Li Zhengyuan<sup>1</sup>,  
Kozlov Aleksei<sup>2</sup>, Zhu Xiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>2</sup>POLYUS Research Institute of M. F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow 117342, Russia

**Abstract** A thin-disc multipass laser amplifier enables a seed laser to frequently pass through the gain medium to extract energy. Such an amplifier can output a high average power, high pulse energy, and high beam-quality laser, which plays an important role in a high power short-pulse laser system. In this paper, a Yb:YAG thin-disc multipass laser amplifier that can amplify a seed laser over the course of 20 passes is designed and constructed. An amplification of a high-repetition frequency short-pulse laser is performed, and it is found that the thin-disc multipass laser amplifier can effectively guarantee the beam quality of the output laser. In addition, spectral mismatch is observed to have an influence on the single gain of a short-pulse laser.

**Key words** lasers; amplifier; pulse laser; beam quality; stability

**OCIS codes** 140.3580; 140.3615; 140.3280

## 1 引 言

薄片多程激光放大器将一束高质量的种子光多次通过处于粒子数反转状态的薄片晶体进行放大, 从而使得输出的光束具有高的光束质量、脉冲能量和平均功率<sup>[1]</sup>。在切割碳纤维、探测质子半径<sup>[2]</sup>等领域, 薄片多程激光放大器正发挥着举足轻重的作用, 受到了国内外相关领域科研人员的关注。

薄片多程激光放大器目前有两种主流结构。第一种结构是由 Karsten Schuhmann 和 Aldo Antognini

团队设计搭建的。在种子光的 24 次放大过程中<sup>[3]</sup>, 输出光的能量可达到 48 mJ。在种子光的 16 次放大过程中<sup>[4]</sup>, 输出光的光束质量因子  $M^2 = 1.003$ , 输出光的能量为 145 mJ。第二种结构是由 Jan-Philipp 和 Andreas Voss 团队设计搭建的。通过改变输入种子光的参数分别实现了平均功率为 1105 W、脉冲能量为 1.38 mJ、脉宽为 7.3 ps、光束质量  $M^2 < 1.25$  的激光输出<sup>[5]</sup>和平均功率为 1420 W、脉冲能量为 4.7 mJ、脉宽小于 8 ps、光束质量  $M^2 < 1.4$  的激光输出<sup>[6]</sup>。第一种结构考虑了模式匹配<sup>[7]</sup>, 保证每次放

收稿日期: 2019-05-22; 修回日期: 2019-06-19; 录用日期: 2019-08-08

基金项目: 国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项(2016YFE0202500)

\* E-mail: zgslaser@hust.edu.cn

大过程中种子光的光斑尺寸保持不变,可实现最大效率的放大;第二种结构则忽略了模式匹配,系统简单,但放大效率低。

本文基于 Yb:YAG 的热效应特性设计了基于模式匹配的薄片多程激光放大器,并分析了晶体热焦距对放大器稳定性的影响;在此基础上对短脉冲光进行多程放大实验,分析了输出光的光束质量特性,同时研究了实验获得的单程增益。

## 2 放大器的设计及理论模型

薄片多程激光放大器由泵浦模块和放大模块组成。泵浦模块采用共轭双抛物面镜的多程泵浦方案<sup>[8]</sup>,放大模块由等效谐振腔展开的放大系统和耦合系统组成<sup>[9]</sup>。本节对放大器的设计及其稳定性进行阐述,并基于输运方程提出了短脉冲激光的放大模型。

### 2.1 薄片多程激光放大器等效谐振腔的设计

薄片多程激光放大器放大结构的设计要从谐振腔的设计开始,设计了图 1 所示的谐振腔。

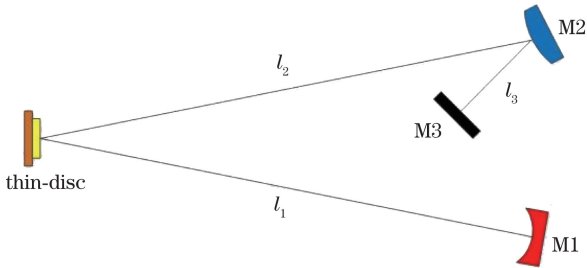


图 1 薄片多程激光放大器等效谐振腔示意图  
Fig. 1 Diagram of equivalent resonator in thin-disc multi-pass laser amplifier

图 1 中,M1 为凹面反射镜,M2 为凸面反射镜,M3 为平面反射镜, $l_1$  表示 M1 到薄片的距离, $l_2$  表示 M2 到薄片的距离, $l_3$  表示 M2 与 M3 的距离,M1、M2、M3 的曲率半径分别为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 。可以得到图 1 所示谐振腔内薄片处的 ABCD 往返传输矩阵  $M_{\text{thin-disk}}$  的公式为

$$M_{\text{thin-disk}} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\varphi$  为薄片的热焦距; $f_1$ 、 $f_2$  分别为 M1、M2 的

焦距。

根据谐振腔内高斯光束的自再现性,可以求出薄片处光斑半径  $\omega_{\text{thin-disk}}$  和薄片处波前曲率半径  $R_{\text{thin-disk}}$  的表达式为

$$\begin{cases} \omega_{\text{thin-disk}} = \frac{\sqrt{\lambda/\pi} \cdot |B|^{1/2}}{[1 - (A + D)^2/4]^{1/4}}, \\ R_{\text{thin-disk}} = \frac{2 \cdot B}{D - A} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\lambda$  为波长。对于 V 型腔,薄片表面的最小基模光斑半径  $\omega_{\text{thin-disk, min}}$  的平方与热焦距变化区间宽度成反比<sup>[10]</sup>,即

$$\omega_{\text{thin-disk, min}}^2 = \frac{\lambda}{\pi |\Delta\varphi|}, \quad (3)$$

式中: $\lambda = 1030 \text{ nm}$ ;  $\Delta\varphi$  表示  $(A + D)/2 = \pm 1$  所对应的薄片热焦距取值的差。考虑到泵浦光斑的尺寸,令  $\omega_{\text{thin-disk, min}} = 2.1 \text{ mm}$ ,可得到  $\Delta\varphi \approx 0.74 \text{ m}^{-1}$ 。

根据谐振腔的设计原理可知,薄片处的光斑尺寸会随  $\varphi$  的变化而变化,但会存在一组放大器参数,使薄片处光斑半径在  $\varphi = -0.05 \text{ m}^{-1}$  处的稳定性最好。通过谐振腔设计得到图 2(a) 所示的稳区图,稳区中心点的坐标已在图中给出。图 2(b) 为不同热焦距下谐振腔光斑尺寸  $\omega$  的变化情况( $z$  为谐振腔内的位置坐标),可见,谐振腔具有较高的稳定性<sup>[11]</sup>。

### 2.2 薄片多程激光放大器耦合系统的设计

为保证薄片处光斑尺寸在每次放大过程中保持不变,应保证种子光经过耦合系统后第一次到达薄片上的光斑尺寸  $\omega_{\text{thin-disk}}$  及波前曲率  $1/R_{\text{thin-disk}}$  与薄片处的自再现腔模参数吻合。根据(1)式和(2)式可求出放大器等效谐振腔内薄片处的  $\omega_{\text{thin-disk}}$  和  $1/R_{\text{thin-disk}}$  为

$$\begin{cases} \omega_{\text{thin-disk}} = 2.1 \\ 1/R_{\text{thin-disk}} = -0.48^\circ \end{cases} \quad (4)$$

设计了一种由三片透镜组成的耦合系统,三个透镜的焦距分别为  $F_1 = 3 \text{ m}$ ,  $F_2 = -0.7 \text{ m}$ ,  $F_3 = 1 \text{ m}$ 。 $L_1$  为  $F_1$  与  $F_2$  之间的距离, $L_2$  为  $F_2$  与  $F_3$  之间的距离。随着  $L_1$  和  $L_2$  变化,经过耦合系统的种子光在薄片上的光斑半径和波前曲率的变化情况如图 3 所示。由图 3 可以看出,薄片处光斑的半径受  $L_1$  的影响较大,而波前曲率受  $L_2$  影响较大。根据(3)式和图 3 可以得到耦合系统和放大系统匹配时,  $L_1 = 0.122 \text{ m}$ ,  $L_2 = 0.566 \text{ m}$ 。

### 2.3 薄片多程激光放大器及系统稳定性

基于 2.1 节和 2.2 节设计图 4 所示的可实现

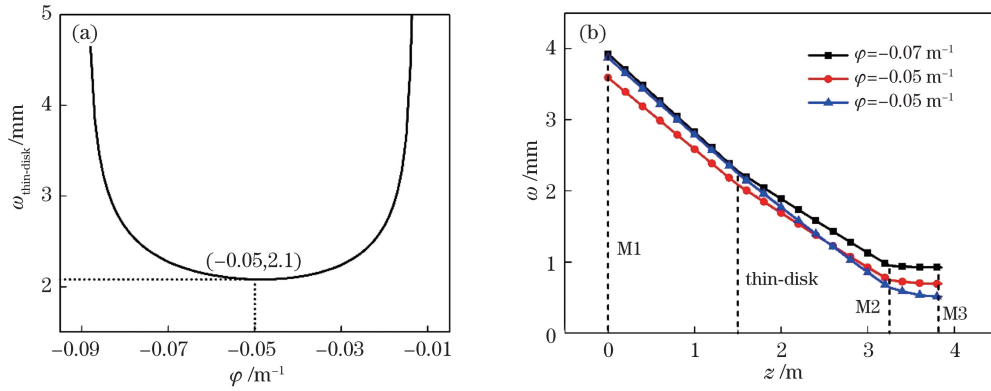


图 2 谐振腔内薄片处的稳区图及光斑尺寸的变化。(a) 稳区图; (b) 光斑尺寸的变化  
Fig. 2 Stable region diagram and variation diagram of spot size at thin-disc in resonator.  
(a) Stable region diagram; (b) variation diagram of spot size

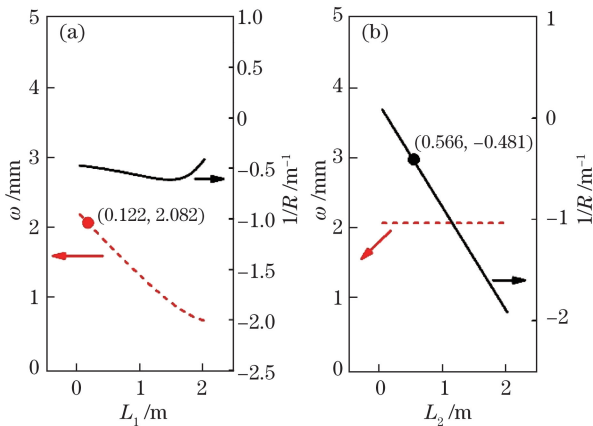


图 3 薄片处光斑半径和波前曲率随  $L_1$  和  $L_2$  的变化。  
(a) 随  $L_1$  的变化; (b) 随  $L_2$  的变化  
Fig. 3 Variations of spot radius and wavefront curvature with  $L_1$  and  $L_2$  at thin-disc. (a) Variation with  $L_1$ ; (b) variation with  $L_2$

20 次放大的薄片多程激光放大器, 其中, 黑色矩形表示平面反射镜, 薄片晶体、种子光入射和出射处在图中已经标注。图 4 虚线左边表示放大器的俯视图, 其右侧的平面镜组沿垂直纸面方向分上下两排平面镜; 图 4 虚线右侧的数字编号表示种子光放大过程中, 种子光经过放大器平面镜组平面镜的先后顺序。种子光放大路径为 input seed  $\rightarrow F_1 \rightarrow F_2 \rightarrow F_3 \rightarrow 1 \rightarrow$  薄片  $\rightarrow 2 \rightarrow M2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow$  薄片  $\rightarrow 5 \rightarrow M1 \rightarrow 6 \rightarrow$  薄片  $\rightarrow \dots$ , 该结构实现了耦合系统和放大系统的模式匹配, 放大过程中,  $\omega_{\text{thin-disk}} = 2.1 \text{ mm}$ 。

图 5(a) 为 20 次放大后,  $\omega_{\text{thin-disk}}$  和  $1/R_{\text{thin-disk}}$  的变化情况, 图中标出了输出端可接受的稳区范围:  $\Delta\varphi_{\text{stable}} \approx 0.04 \text{ m}^{-1}$ 。图 5(b) 描述了薄片热焦距取  $\varphi = (-0.05 \pm 0.02) \text{ m}^{-1}$  时, 系统光斑半径的变化。图中竖直实线表示薄片晶体的位置, 耦合系统已在

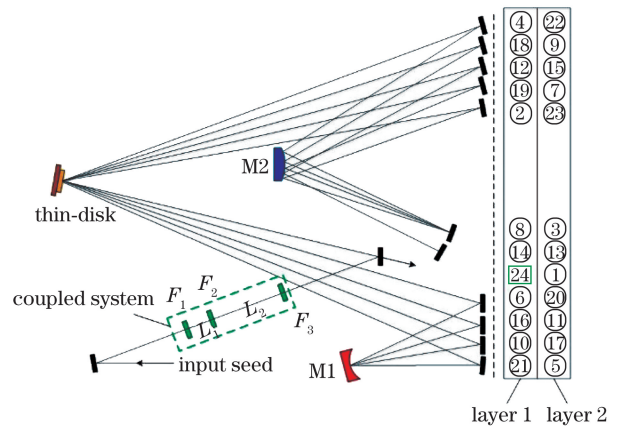


图 4 薄片激光放大器种子光传输系统示意图  
Fig. 4 Schematic of seed light transmission system of thin-disc laser amplifier

图中标出。在不同的热焦距下, 整个放大系统的光斑半径偏离程度很小, 具有良好的稳定性。

总之, 当薄片热焦距在  $-0.07 \sim -0.03 \text{ m}^{-1}$  范围内波动时, 放大结构的稳定性较好。

### 2.4 脉冲光放大模型

在连续泵浦条件下, 考虑短脉冲单次通过增益介质的情况, 描述光子流强度  $J(z, t)$  及反转粒子数密度  $\Delta n(z, t)$  随时间  $t$  和距离  $z$  变化的方程被称为脉冲光放大输运方程, 表达式为

$$\begin{cases} \frac{\partial J(z, t)}{\partial t} + v \frac{\partial J(z, t)}{\partial z} = \\ \quad v\sigma_{\text{em}}^{\text{las}} \Delta n(z, t) J(z, t) - \alpha_i v J(z, t) \\ \frac{\partial \Delta n(z, t)}{\partial t} = -(f_{11} + f_{03}) \sigma_{\text{em}}^{\text{las}} \Delta n(z, t) J(z, t) \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $v$  为光速;  $\sigma_{\text{em}}^{\text{las}}$  为激光的发射截面;  $\Delta n_0$  为薄片晶体内的反转粒子数密度;  $\alpha_i$  为吸收系数;  $f_{11}$  和  $f_{03}$  分别为激光上能级和下能级的玻尔兹曼分布常

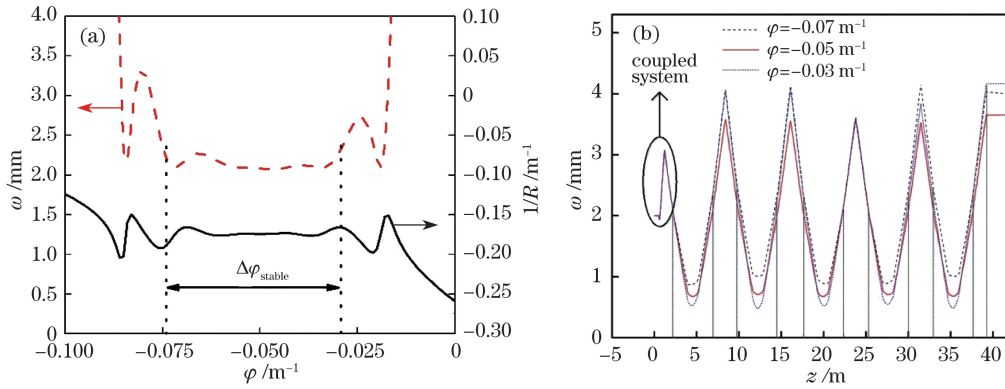


图 5 放大器内不同位置处的光束特性。(a)放大器内薄片处的稳区图;(b)放大器内光斑尺寸变化图

Fig. 5 Beam characteristics at different positions in amplifier. (a) Plot of stable region at thin-disc in amplifier; (b) variation of spot size in amplifier

数。输运方程的边界条件为  $\Delta n(z, t = 0) = \Delta n_0 (0 \leq z \leq l)$ ,  $J(0, t) = J_0(t)$ , 其中,  $l$  为晶体长度,  $J_0(t)$  为输入脉冲光的光子流强度。通过对输运方程进行时间为  $\tau'$  的积分可得到脉冲种子光经过薄片晶体一次放大后单位面积上的光子数为

$$J(l) = \int_0^{\tau'} J(l, t) dt = \frac{1}{(f_{11} + f_{03})\sigma_{em}^{las}} \ln\{1 + \{\exp[(f_{11} + f_{03})\sigma_{em}^{las} J(0)] - 1\} \exp(\sigma_{em}^{las} \Delta n_0 l)\}, \quad (6)$$

根据  $E_l = h\nu S \int_0^{\tau'} J(l, t) dt = h\nu S J(l)$  可得到种子光一次放大后的输出能量  $E_{out}$  为

$$E_{out} = \frac{h\nu \cdot S}{(f_{11} + f_{03})\sigma_{em}^{las}} \ln\left\{1 + \left\{\exp\left[(f_{11} + f_{03})\sigma_{em}^{las} \frac{E_{in}}{h\nu \cdot S}\right] - 1\right\} \exp(\sigma_{em}^{las} \Delta n_0 l)\right\}, \quad (7)$$

式中:  $E_{in}$  为输入脉冲的能量;  $S$  为薄片处种子光光斑的面积;  $h$  为普朗克常数;  $\nu$  为激光频率。种子光经过第一次放大后, 薄片晶体内反转粒子数密度下降为  $\Delta n'_0$ :

$$\Delta n'_0 = \Delta n_0 - \frac{E_{out} - E_{in}}{h\nu \cdot l \cdot S}. \quad (8)$$

通过迭代(7)式和(8)式, 可得到薄片激光放大器对脉冲光放大  $N_{amp}$  次后输出脉冲的能量。

### 3 实验及结果

#### 3.1 输出光的光束质量特性

基于第 2 节的方案及参数在光学平台上搭建实验装置, 如图 6 所示。其中, 薄片厚度为  $215 \mu\text{m}$ , Yb 掺杂浓度(质量分数)为 7%。泵浦光斑边长为

4 mm, 平均功率为 500 W, 中心波长  $(940 \pm 1.6) \text{ nm}$ , 泵浦次数为 44。种子光源型号为 PicoYL-50, 输出平均功率为 50 W、频率为 1 MHz 的种子光, 从输入端注入, 经耦合系统后到达薄片晶体, 然后按照图中红色线所示的路径在碟片处实现 20 次放大, 并用 CCD 对输出光的光强分布进行探测。图 7 为采用 Zygo 干涉仪测得的薄片晶体的面型图, 测量光源波长  $\lambda' = 632.8 \text{ nm}$ , 图中的色度条表示面型的幅值, Seidel 像散系数为  $784.0392 \text{ nm}$ , Seidel 彗差系数为  $251.2216 \text{ nm}$ , Seidel 球差系数为  $532.1848 \text{ nm}$ 。

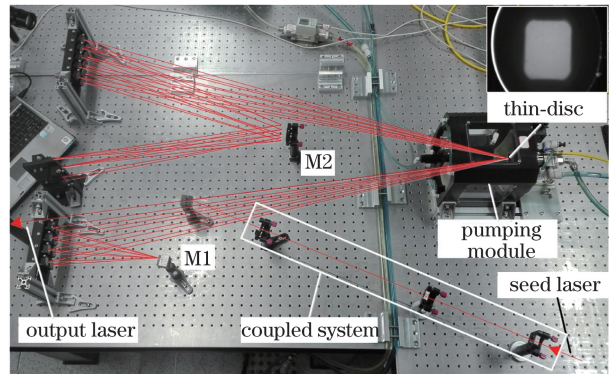


图 6 薄片多程激光放大器

Fig. 6 Thin-disc multi-pass laser amplifier

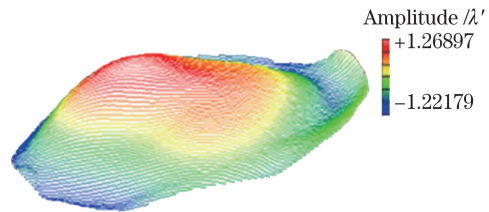


图 7 碟片晶体面型图

Fig. 7 Surface profile of thin-disc crystal

图 8 所示为种子光 0 次、2 次、6 次、10 次放大

后输出端的光强分布。一方面,随着放大次数增加,输出光的光强分布存在劣化现象,尤其是 10 次放大后,光斑分布不均匀。虽然薄片晶体的球面项变化可通过结构设计进行补偿,但薄片晶体非球面畸变会随着放大次数的增加而不断累积,导致输出光的光强分布不均匀,最终影响输出光整体的光束质量

特性。从图 7 的面型图可看出,晶体具有一定的非球面畸变,会影响种子光的光强分布。另一方面,种子光在放大过程中的光斑尺寸波动较小,且光强保持高斯线型分布,说明该放大器的稳定性较好。因此,该薄片多程激光放大器可以在一定程度上保证输出光的光束特性。

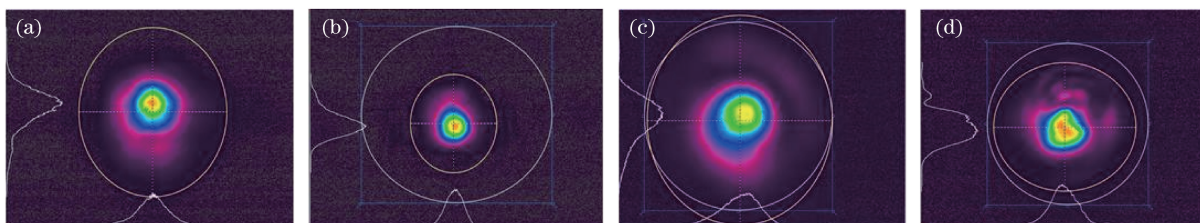


图 8 种子光经过不同次数放大后的光强分布。(a) 0 次;(b) 2 次;(c) 6 次;(d) 10 次

Fig. 8 Distributions of output laser intensity of seed light after different times of amplification.

(a) 0; (b) 2; (c) 6; (d) 10

### 3.2 脉冲光放大实验

图 9(a)为不同放大次数下的输出脉冲能量,图中右上角所示为种子光的光谱,其中心波长为 1034.31 nm。可见,随着放大次数增加,输出脉冲能量不断提高,但在 12 次放大时,输出能量出现了一定程度的降低,这是因为随着放大次数增加,系统光程增大,导致系统损耗增加。图 9(b)为单程增益随放大次数的变化( $g$  为增益系数)。基于 3.1 节的实验条件,迭代计算(7)、(8)式得到的理

论仿真结果为 1.47,而实验得到的单程增益为 1.09,原因在于光谱不匹配。种子光的中心波长为  $(1034 \pm 2)$  nm,而 Yb:YAG 增益谱的范围为  $(1030 \pm 4)$  nm,种子光的中心波长偏离增益谱中心波长,导致种子光通过增益介质时的能量提取效率较低,降低了单程增益,使得实验结果小于理论仿真结果。因此,脉冲光放大过程中的种子光光谱和增益介质增益光谱的不匹配会导致单程增益降低。

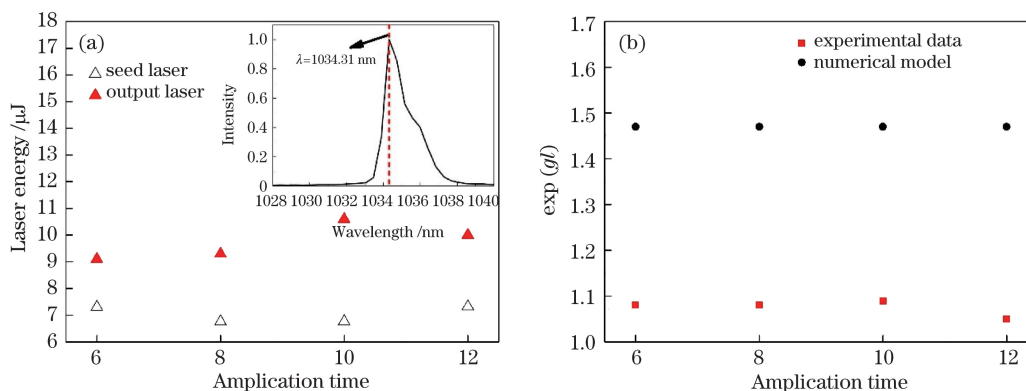


图 9 输出脉冲能量和单程增益随放大次数的变化。(a)输出脉冲能量的变化;(b)单程增益的变化

Fig. 9 Variations in output pulse energy and single pass gain with amplification times.

(a) Variation in output pulse energy; (b) variation in single pass gain

## 4 结 论

基于模式匹配的方法,本文设计了一种碟片多程激光放大器,它可保证放大器模式的有效匹配和系统的稳定性。然后在实验平台上进行短脉冲光的多程放大实验,对放大器输出光光强的畸变特性和增益特性进行分析。

在结构设计上,基于 Yb:YAG 的热特性,设计了模式匹配的多程放大结构,分析了薄片晶体热焦距对放大器稳定性的影响。研究了种子光经过 10 次放大后的输出激光光强分布,虽然薄片晶体的球面项可通过结构设计得到补偿,但受晶体非球面项的影响,输出光的光强分布随放大次数的增加而劣化。此外,在整个放大过程中,光斑尺寸几乎保持不

变,而且输出光的光强保持着高斯线型,故认为该放大器可以有效保证输出光的光束特性。通过实验得到了脉冲光不同放大次数的单程增益,并将其与理论仿真结果进行对比,认为种子光光谱和晶体增益光谱的不匹配影响了多程放大的单程增益。

### 参 考 文 献

- [1] Negel J P, Loescher A, Bauer D, *et al.* Second generation thin-disk multipass amplifier delivering picosecond pulses with 2 kW of average output power [C]//Lasers Congress 2016 (ASSL, LSC, LAC), October 30-November 3, 2016, Boston, Massachusetts, United States. Washington, D.C.: OSA, 2016: ATu4A.5.
- [2] Schuhmann K, Antognini A, Kirch K, *et al.* Thin-disk laser for the measurement of the radii of the proton and the alpha-particle[C]//Advanced Solid-State Lasers Congress, October 27-November 1, 2013, Paris, France. Washington, D.C.: OSA, 2013: ATu3A.46.
- [3] Antognini A, Schuhmann K, Amaro F D, *et al.* Thin-disk Yb:YAG oscillator-amplifier laser, ASE, and effective Yb:YAG lifetime[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(8): 993-1005.
- [4] Schuhmann K, Ahmed M A, Antognini A, *et al.* Thin-disk laser multi-pass amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9342: 93420U.
- [5] Negel J P, Voss A, Ahmed M A, *et al.* 1.1 kW average output power from a thin-disk multipass amplifier for ultrashort laser pulses[J]. Optics Letters, 2013, 38(24): 5442-5445.
- [6] Negel J P, Loescher A, Voss A, *et al.* Ultrafast thin-disk multipass laser amplifier delivering 1.4 kW (4.7 mJ, 1030 nm) average power converted to 820 W at 515 nm and 234 W at 343 nm[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 21064-21077.
- [7] Schuhmann K, Kirch K, Antognini A. Multi-pass resonator design for energy scaling of mode-locked thin-disk lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10082: 100820J.
- [8] Huang Y, Zhu X, Zhu G Z, *et al.* A multi-pass pumping scheme for thin disk lasers with good anti-disturbance ability[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4605-4613.
- [9] Song E M, Zhu G Z, Zhu X, *et al.* The design of thin disk laser multi-pass amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10016: 1001621.
- [10] Magni V. Multielement stable resonators containing a variable lens[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(10): 1962-1969.
- [11] Zhang Y H, Zhu G Z, Gao J P, *et al.* Thermo-optical aberration measurement of thin-disk laser crystal based on spatial carrier interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0404010. 张元昊, 朱广志, 高佳鹏, 等. 基于空间载频干涉的薄片激光晶体热畸变测量[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0404010.