

## 基于薄片增益介质的皮秒激光再生放大器研究

董静<sup>1</sup>, 陈涵天<sup>1</sup>, 王海林<sup>1</sup>, 贾贤石<sup>1</sup>, 朱广志<sup>1</sup>, Aleksei Kozlov<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, 俄罗斯 莫斯科 117342

**摘要** 近年来,超快激光器已成为激光精密制造的主力光源。为进一步提高激光加工效率和加工能力,需获得更高平均功率、更大单脉冲能量的超短脉冲激光器。本文基于自研的单薄片模块和串接的双薄片模块分别搭建了一套皮秒薄片激光再生放大器,其中基于单薄片模块的再生放大器采用脉宽小于 10 ps 的种子源,最终获得平均功率 44.2 W、脉冲宽度 9.3 ps、单脉冲能量 220  $\mu$ J 的脉冲激光输出,放大器效率约为 13.4%。基于串接的双薄片模块的再生放大器采用脉宽 800 ps 的种子源,在重复频率 200 kHz 时获得了 126 W 的激光输出,在重复频率 100 kHz 时,实现最大输出单脉冲能量为 0.96 mJ。考虑到放大的自发辐射的影响,对单薄片结构再生放大器的动力学过程进行了理论建模,得到和实验相符的结果。更进一步的仿真计算和实验表明较低的单程增益使得薄片再生放大器的光光效率受腔内损耗影响较大,降低腔内损耗是实现高效率薄片再生放大器的关键之一。

**关键词** 激光器;薄片激光器;再生放大器;皮秒激光;脉冲动力学

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1414003

## Research on Picosecond Laser Regenerative Amplifier Based on Thin-Disk Gain Medium

Dong Jing<sup>1</sup>, Chen Hantian<sup>1</sup>, Wang Hailin<sup>1</sup>, Jia Xianshi<sup>1</sup>, Zhu Guangzhi<sup>1</sup>,  
Aleksei Kozlov<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** In recent years, ultrafast lasers have become the main source of laser precision manufacturing. The further improvement of laser processing efficiency and capability requires ultrashort pulse lasers with higher average power and single pulse energy. In this paper, two picosecond thin-disk laser regenerative amplifiers are developed based on one thin-disk module and two thin-disk modules connected in series, respectively. For the regenerative amplifier with one thin-disk module, on the basis of a seed source with a pulse width lower than 10 ps, the pulse laser with an average power of 44.2 W, a pulse width of 9.3 ps, and single pulse energy of 220  $\mu$ J is output, and the optical-optical efficiency of the amplifier is about 13.4%. For the regenerative amplifier based on two thin-disk modules connected in series, a seed source with a pulse width of 800 ps is adopted; then, we obtain a laser output of 126 W at a repetition frequency of 200 kHz and maximum single pulse energy of 0.96 mJ at a repetition frequency of 100 kHz. Considering the effect of amplified spontaneous emission, the dynamic process of the regenerative amplifier with one thin-disk module is theoretically modeled, and the results are consistent with the experimental ones. Further simulations show that the low single-pass gain makes the optical-optical efficiency of the thin-disk regenerative amplifiers greatly affected by the intra-cavity loss, and reducing the intra-cavity loss is one of the keys to achieving a high-efficiency thin-disk regenerative amplifier.

收稿日期: 2020-12-08; 修回日期: 2021-01-18; 录用日期: 2021-02-22

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)

通信作者: \*zx@hust.edu.cn

**Key words** lasers; thin-disk laser; regenerative amplifier; picosecond laser; pulse dynamics

**OCIS codes** 140.3580; 140.3615; 140.3280

## 1 引言

近些年来,超短脉冲激光在平均功率和单脉冲能量方面的提高极大促进了工业激光加工领域的进步。特别是脉冲宽度小于 10 ps 的脉冲在加工过程中的热效应显著减弱<sup>[1]</sup>,使得激光成为一种“冷加工”的工具。这种加工特性促使超快激光器广泛应用于硬脆材料的切割<sup>[2-3]</sup>。与此同时,为进一步提高激光加工效率和加工能力,需获得更高平均功率、更大单脉冲能量的超短脉冲激光器。

超短脉冲激光一般指脉冲宽度在 ps 或 fs 的脉冲激光。要产生这种宽度的激光脉冲,通常可以通过电调制<sup>[4]</sup>或者锁模技术<sup>[5-6]</sup>来实现,受限于光学器件的损伤阈值和谐振腔设计与实现的困难,直接通过这两种方式产生的脉冲单脉冲能量都较低,更大的单脉冲能量输出需要通过增加后置放大级来产生。同时,为获得高平均功率、高光束质量的激光,必须要尽量降低晶体的热负载。目前,薄片<sup>[7]</sup>、板条<sup>[8]</sup>和光纤啁啾脉冲放大器<sup>[9]</sup>都获得了千瓦级的基模脉冲激光输出。与光纤和板条增益介质相比,薄片增益介质具有厘米级的激光光斑和较弱的非线性效应,使得薄片放大器更容易获得高峰值功率、大脉冲能量的超快激光<sup>[10-12]</sup>。采用啁啾脉冲放大的薄片再生放大器通过多个放大级串接的方式实现了单脉冲能量 200 mJ 的脉冲输出<sup>[13]</sup>。

本文基于实验室自研的薄片模块和薄片晶体,分别使用单薄片模块和串接的双薄片模块,实现了薄片激光再生放大器的 ps 脉冲输出。其中单薄片模块激光再生放大器获得了平均功率 44.2 W、脉冲宽度 9.3 ps、单脉冲能量 220 μJ 的脉冲输出。基于串接的双薄片模块的激光再生放大器,采用脉宽 800 ps 的种子源,获得了最大平均功率 126 W 的激光输出,获得的最大单脉冲能量为 0.96 mJ,验证了多薄片串接方式在薄片再生放大器中获得高平均功率、大单脉冲能量的可行性。

## 2 单薄片模块激光再生放大器的结构及结果分析

### 2.1 单薄片模块激光再生放大器的结构

基于 Yb:YAG 单薄片模块的薄片再生放大器实验装置如图 1 所示,包含了 ps 种子源、光隔离器、

法拉第旋转器、薄膜偏振片(TFP)、电光普克尔盒、再生放大腔,以及多通泵浦模块。种子光进入再生放大腔后,通过在时序上控制普克尔盒的加压时间点与种子脉冲间的时间延迟,把种子光锁定在腔内,再控制普克尔盒的加压宽度,以及控制普克尔盒的退压时间点与腔内放大脉冲间的延迟,导出腔内放大的脉冲激光。其中 ps 种子源采用的是单模输出的皮秒光纤激光器(HR-Seed-ps, Huaray, 武汉),脉冲的重复频率为 200 kHz、平均功率为 60 mW。实验用的薄片激光晶体直径为 15 mm,掺杂摩尔分数为 7%,厚度 200 μm,薄片前表面镀有 940~1030 nm 的增透膜,后表面镀有 940~1030 nm 的高反膜。晶体通过钢焊的方式固定在 2 mm 厚的铜热沉上,在铜热沉的背面采用射流冲击的方式进行冷却,可有效地带走晶体产生的热量。泵浦系统采用共轭双抛物面结构<sup>[14-16]</sup>,泵浦次数可达 48 次。泵浦源采用最大抽运功率为 1000 W、光纤输出口径为 400 μm、波长为 969 nm 的半导体激光器(BDL-CW1000-969,凯普林,北京)。泵浦光准直在薄片上呈直径约为 2.7 mm 的圆光斑。969 nm 泵浦通常称为零声子线泵浦,与常见 940 nm 泵浦波长对比,969 nm 的量子亏损相较 940 nm 更低,低至 5.9%,因此,采用波长 969 nm 的泵浦源时,晶体的产热量可以降低大约 1/3,晶体从而具有更小的热畸变<sup>[17]</sup>。电光普克尔盒由两块 6 mm×6 mm×20 mm 的偏硼酸钡(BBO)晶体构成(CPDBPC-06L-WC,快谱光电,济南),其 1/4 电压约为 3.5 kV。谐振腔中各位置处光斑尺寸如图 2 所示,薄片上基模光斑直径为 2 mm,谐振腔总腔长为 2.34 m,腔内往返时间为 15.6 ns。在谐振腔中,M5 为曲率为 2 m 的平凹镜,其他反射镜均为平面镜。

### 2.2 薄片再生放大器动力学理论模型

Yb:YAG 薄片再生放大的动力学过程可以用速率方程理论来描述,根据谐振腔的状态(普克尔盒的加压和不加压),用两个状态来描述再生放大过程。分别对其用不同的速率方程来描述。第一个状态为谐振腔关断,增益介质积累反转粒子数,此时速率方程可以表述为

$$\frac{dN}{dt} = R_p - \frac{N}{\tau}, \quad (1)$$

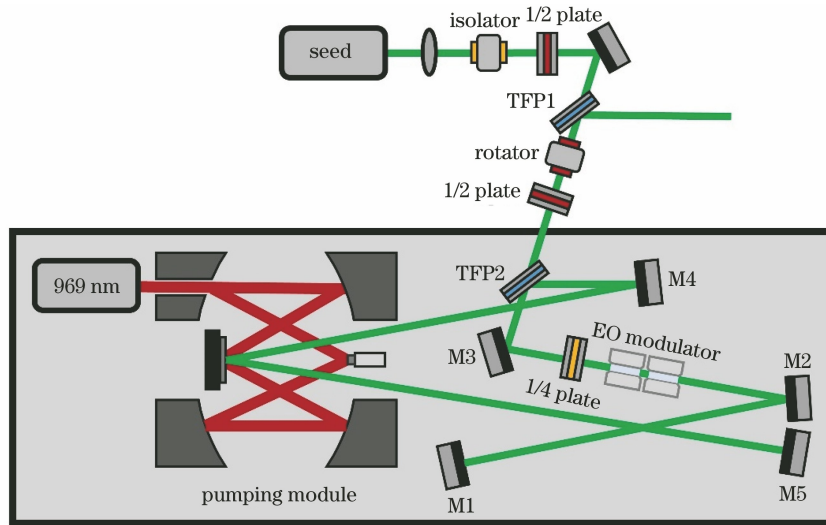


图 1 Yb:YAG 薄片再生放大器结构图

Fig. 1 Schematic of the Yb:YAG thin-disk regenerative amplifier

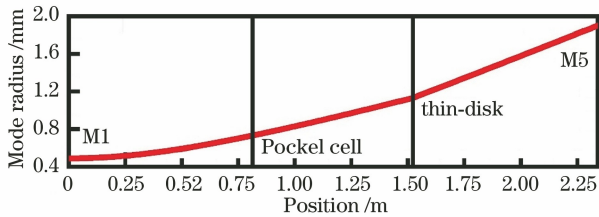


图 2 理论计算的再生放大谐振腔内基模光斑尺寸

Fig. 2 Theoretical calculation of spot size of fundamental mode in regenerative amplifier cavity

式中： $N$  为上态簇粒子数密度； $R_p$  为泵浦速率； $\tau$  为有效上能级寿命，在放大器中，其值与放大的自发辐射 (ASE) 的强度有关<sup>[18-19]</sup>； $t$  为时间。薄片采用多重泵浦结构进行泵浦时，可以简化地用对泵浦光的吸收效率  $\eta_p$  来表示泵浦速率，即

$$R_p = \frac{I_p \eta_p}{h \nu_p L}, \quad (2)$$

式中： $I_p$  为泵浦光强； $h$  为普朗克常数； $\nu_p$  为泵浦光频率； $L$  为薄片晶体的厚度。

第二个状态为谐振腔导通，除了要考虑上态簇粒子数密度  $N$  变化外，还要考虑腔内的单脉冲能量密度  $E$  随时间的演化，可以得到速率方程，表示为

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = R_p - \\ M\sigma_1 [(f_1^{up} + f_1^{low})N - f_1^{low}N_{tot}] \frac{E}{h\nu_1 T_{rt}} - \frac{N}{\tau}, \\ \frac{dE}{dt} = \frac{\{2M\sigma_1 L [(f_1^{up} + f_1^{low})N - f_1^{low}N_{tot}] - \alpha\} E}{T_{rt}} \end{cases}, \quad (3)$$

式中： $\nu_1$  为激光频率； $\sigma_1$  为激光的受激发射截面； $f_1^{up}$

为激光上能级占上态簇的比例； $f_1^{low}$  为激光下能级占下态簇的比例； $N_{tot}$  为总的粒子数密度； $M$  为一个往返通过薄片反射的次数； $T_{rt}$  为腔内往返时间； $\alpha$  为谐振腔内一次往返损耗。

基于上面的理论模型，通过连续迭代求解上述两组微分方程(组)，可以得到数值解。基于实验条件，将重复频率设置为 200 kHz，泵浦功率设为 330 W，腔内往返周期设为 110 次，腔内损耗设为 8% 时，数值求解得到腔内脉冲能量和反转粒子数随时间周期性变化的曲线如图 3 所示。

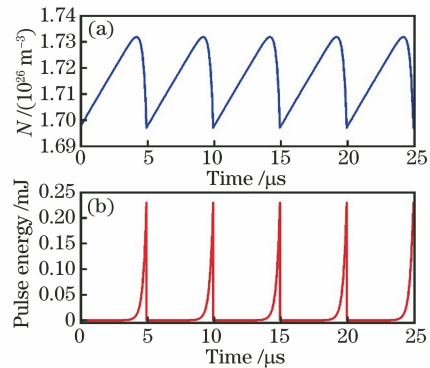


图 3 数值求解理论模型结果。(a) 上态簇粒子数密度  $N$  随时间变化曲线；(b) 腔内脉冲能量随时间变化曲线  
Fig. 3 Results of numerical solution of the theoretical model. (a) Curve of the upper state population density  $N$  varying with time; (b) curve of the pulse energy in the cavity varying with time

### 2.3 单薄片模块薄片激光再生放大器结果分析

通过控制电光的开关时间以及电光开关信号的延时，将种子脉冲关在腔内一定往返周期后输出得到了放大的皮秒激光。脉冲放大过程中腔内建立的

脉冲序列(光电探测器被放置在腔镜 M2 后,测量腔内透射的光强)和输出的脉冲波形分别如图 4 所示。

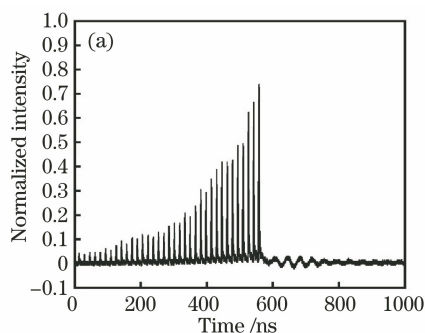


图 4(b)中皮秒脉冲输出后,显示的波形振荡来源于普克尔盒的高压干扰。

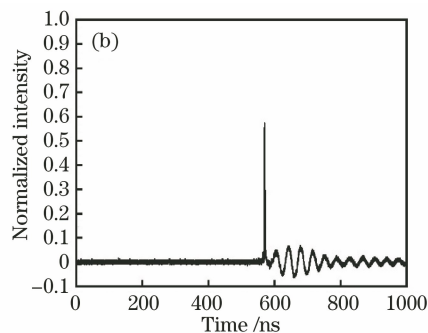


图 4 实验结果。(a)实验测得的再生放大器腔内脉冲放大过程;(b)实验测得的输出脉冲

Fig. 4 Experimental results. (a) Pulse amplification process in the regenerative amplifier cavity measured by experiment; (b) output pulse measured by experiment

设定泵浦功率为 270 W 和 330 W 时,在不同的腔内往返次数下(控制电光开关时间),测得的放大器的输出功率曲线和理论计算的结果如图 5(a)所示,在泵浦功率设为 330 W 时,放大器最大输出功率为 44.2 W,光光效率约为 13.4%。理论计算使用的腔内往返损耗为 8%(实验测量薄片前表面单次反射损耗约为 0.5%,电光晶体单次透射损耗约为 2%,其他腔内往返损耗约为 2%,包括全反镜的透射损耗以及谐振腔的衍射损耗等)。实验测量的结果显示,当种子光在腔内往返约 110 次时(电光开关时间为 1716 ns),输出功率会达到最大,此时再继续增加腔内往返次数,功率会出现一定程度的下降。在输出功率达到最大前,理论计算和实验测得的数

据能够较好的拟合。当输出功率达到最大后,理论计算的结果显示输出功率会随放大次数逐渐发生饱和,而实验测量得到的输出功率则出现缓慢下降。可能原因之一是当增益介质达到饱和后,此时腔内的光学元件承受了较高的热负载,更多的腔内往返次数会导致腔内其他损耗的增加。由于在薄片放大器中单程增益较低,需要足够多的腔内往返次数才能有效地提取增益,这使得放大器的光光效率对腔内损耗敏感。为此进一步对不同损耗条件下的输出功率进行了仿真。当泵浦功率 330 W 时,针对不同腔内损耗和往返时间计算的输出功率曲线如图 5(b)所示,从图中可以看出,降低 3%的损耗可以使输出功率明显增加。

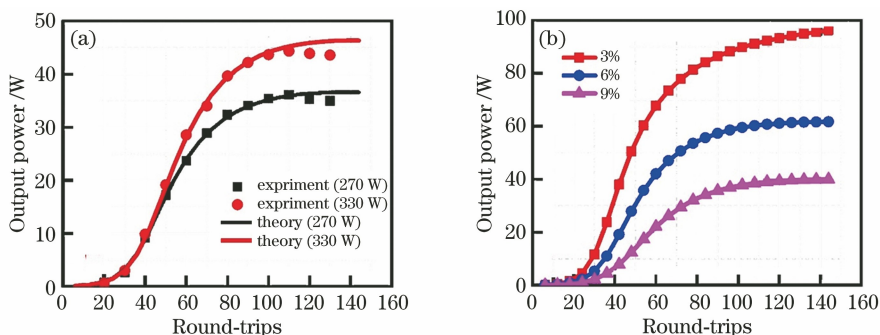


图 5 实验结果。(a)实验测量和理论计算得到的不同往返次数的输出功率;(b)理论计算的不同损耗在不同往返次数的输出功率

Fig. 5 Experimental results. (a) Output power with different round-trips obtained by experimental measurement and theoretical calculation; (b) theoretically calculated output power of different losses with different round-trips

为了进一步实验验证腔内损耗对谐振腔输出功率的影响,本文分别测量了再生放大腔在有普克尔盒时的连续输出功率,结果如图 6(a)所示,普克尔盒引入的插入损耗使得整体光光效率降低了约 8%,这表明降低腔内损耗可以有效地提高薄片再生

放大器光光效率。在泵浦功率 330 W 时,测量了再生放大器输出的皮秒激光的光束质量  $M^2$  因子,结果如图 6(b)所示,其中两个方向  $M^2$  因子分别为 1.42 和 1.25。



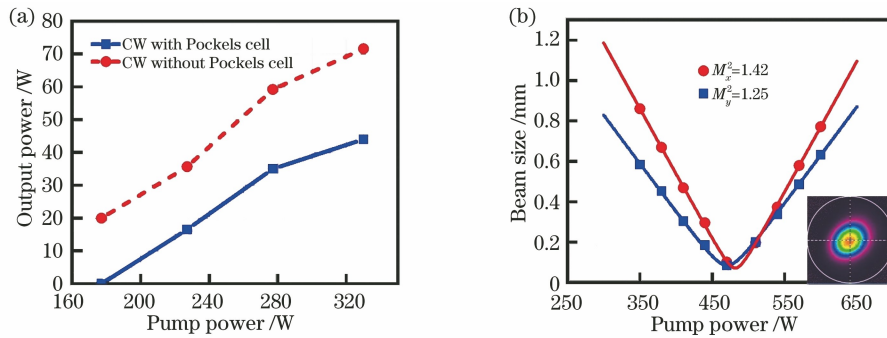


图 6 实验结果。(a)不同泵浦功率下的连续输出功率；(b)输出激光的光束质量

Fig. 6 Experimental results. (a) Continuous output power at different pump powers; (b) beam quality of the output laser

本文用光谱仪(LIBS2500 plus, Ocean Optics, 美国)测量的种子光光谱和放大光光谱如图 7 所示, 种子光光谱的中心波长为 1031.7 nm, 半峰全宽为 3.87 nm, 输出激光的中心波长为 1030.9 nm, 半峰全宽为 3.23 nm, 这表明输出激光实际可以被压缩到更窄。另外一方面可以看出, 输出激光的频谱相对于种子光发生了略微的窄化和谱线蓝移, 这主要和 Yb:YAG 晶体的增益带宽有关系。这也说明在 Yb:YAG 固体放大器中, 由于 Yb:YAG 晶体增益谱较窄, 种子光需要和 Yb:YAG 的光谱实现匹配<sup>[20]</sup>。

进一步地, 本文用 Femtochrome FR-103XL 自相关仪分别测量种子光的自相关曲线和输出放大光的自相关曲线如图 8 所示, 种子光的自相关曲线可以和高斯线型拟合得较好, 测量得到的宽度为

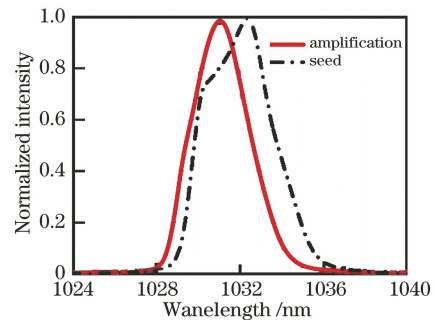


图 7 种子光和放大光的光谱

Fig. 7 Spectrum of seed light and amplified light

8.8 ps, 而放大光自相关曲线则发生了一定程度的畸变, 腔内多次往返累积的色散效应使得放大光相对种子光发生了轻微的展宽, 其脉冲宽度变为 9.3 ps。

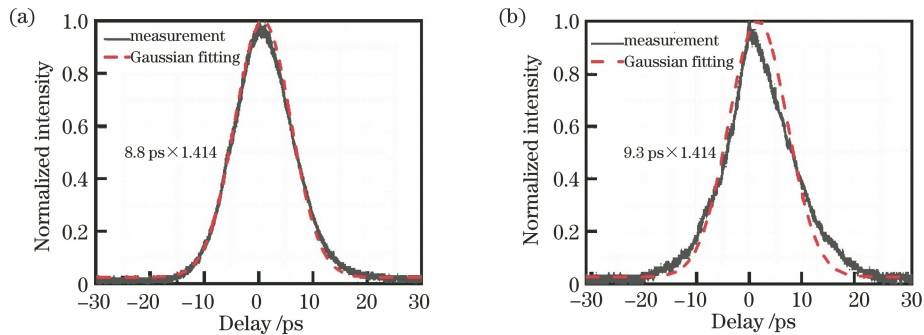


图 8 实验结果。(a)种子光的自相关曲线；(b)放大光的自相关曲线

Fig. 8 Experimental results. (a) Autocorrelation curve of seed light; (b) autocorrelation curve of amplified light

### 3 双薄片模块激光再生放大器的结构及输出功率特性

提高薄片激光器的输出功率可以通过进一步优化光学元件的参数, 也可以基于现有薄片模块采用增大泵浦光斑, 或者多薄片串接的结构来实现。为了实验验证这种方式在薄片再生放大器中的可行性, 基于更大的泵浦光斑, 本文设计了基于双薄片模块串接方式的激光再生放大器, 并对输出功率特性

进行了测量。

#### 3.1 双薄片模块激光再生放大器的结构

双薄片模块的激光再生放大器如图 9 所示, 不同于前面单薄片模块的激光再生放大器, 其中皮秒种子通过分布式反馈(DFB)半导体激光器产生, 脉宽约为 800 ps, 经过后置掺镱光纤放大器, 种子光的平均功率达到 100 mW, 其重复频率在 100 kHz~1 MHz 可变。两个薄片模块的泵浦光斑均为

4 mm×4 mm 的方光斑,分别采用最大功率为 700 W(EB-DDLF-700,长光华芯,苏州)和 1000 W(BDL-CW1000-940,凯普林,北京)的波长为 940 nm 的光纤耦合输出半导体激光器作为泵浦源。其中为了保证激光光斑在两个薄片晶体上具有相同

的尺寸,采用 4f 成像的结构(M3、M4、M5 构成)将两个薄片模块串接起来,其中 4f 系统中的聚焦镜为 M3 和 M5,其曲率半径为 1 m,分别与对应薄片晶体的距离为 0.5 m。通过调节端镜 M6(曲率半径为 1 m)的位置实现与薄片晶体的热焦距进行匹配。

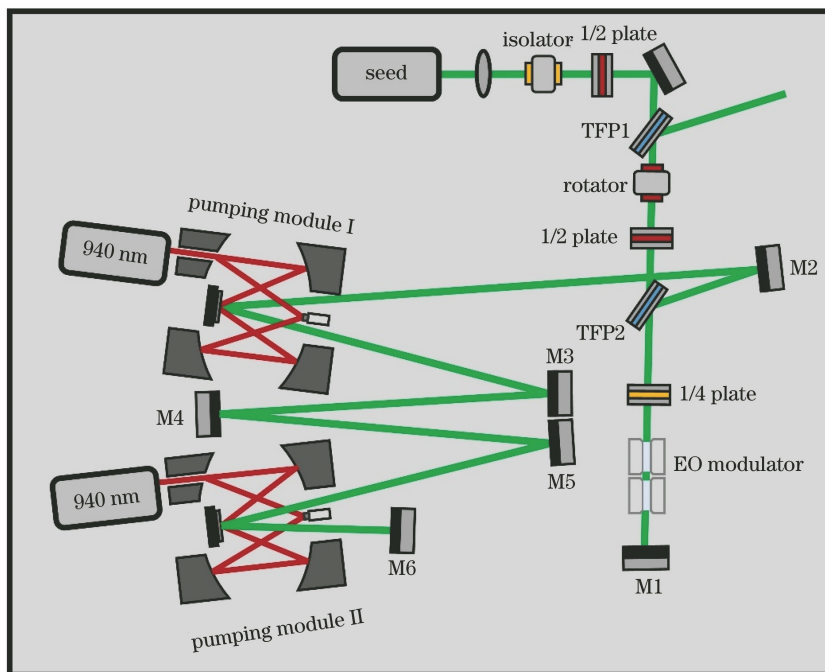


图 9 基于双薄片模块的再生放大器结构图

Fig. 9 Schematic of the regenerative amplifier based on double thin-disk modules

### 3.2 双薄片模块激光再生放大器的输出功率特性

如图 10 所示,本文测量了重复频率为 100 kHz 和 200 kHz 激光再生放大器的输出功率。当重复频率为 100 kHz 时,每个薄片泵浦功率为 500 W,得到的输出功率为 96 W,此时光光转换效率约为 9.6%,斜率效率约为 17.8%。在重复频率为 200 kHz 时,每个薄片泵浦功率最大设置到 600 W,此时最大输出功率为 126 W,光光转换效率约为

10.5%。为了保证光学元件不被损坏,没有进一步提高泵浦功率。光光效率较单薄片模块再生放大器效率低的原因主要是,在该实验中两个模块使用的泵浦源波长均为 940 nm,相对于 969 nm 泵浦光,它的量子效率更低,温度更高。

## 4 结 论

基于薄片增益介质的超快激光再生放大器是一种同时得到高平均功率和大脉冲能量激光输出有效的方式。薄片激光再生放大器的种子源可以使用锁模光纤激光器或者 DFB 半导体激光器产生,对种子光功率要求较低,单级再生放大器就可以实现高平均功率的输出,所以控制稳定性上相对其他需采用多级放大的普通固体激光放大器更加容易。相比于光纤激光器,输出激光脉冲宽度在 10 ps 左右时,无需使用复杂的展宽压缩系统,就可以获得大脉冲能量激光输出。

本文分别搭建了一套基于单薄片模块的激光再生放大器和采用两薄片模块串接的激光再生放大器。基于单薄片模块的激光再生放大器最大输出平

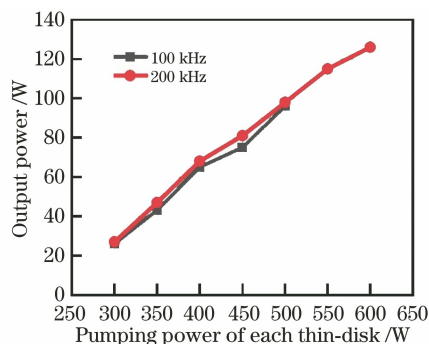


图 10 基于双薄片模块的再生放大器的输出功率

Fig. 10 Output power of regenerative amplifier based on double thin-disk modules

均功率为 44.2 W, 脉冲宽度为 9.3 ps, 输出激光的重复频率为 200 kHz, 单脉冲能量达到 220  $\mu$ J, 峰值功率达到 23.7 MW。x、y 方向  $M^2$  因子分别为 1.42 和 1.25, 光光效率约为 13.4%。通过理论建模对不同腔内往返次数的输出功率进行了仿真, 理论结果可以和实验结果吻合得较好。放大器的光光效率较低原因之一和谐振腔较大的腔内损耗有关, 因此在理论上计算在不同腔内损耗条件下输出功率特性, 并实验对比了在有电光普克尔盒时的输出功率。除此以外, 搭建了基于双薄片模块串接方式的激光再生放大器, 采用基于 DFB 半导体激光器的种子源, 其脉冲宽度约为 800 ps, 在重复频率为 200 kHz 时最高得到 126 W 的激光输出, 在重复频率为 100 kHz 时, 最高获得 0.96 mJ 的脉冲输出。在实验上验证了提高薄片激光再生放大器的平均功率可以通过多薄片模块串接的方式来实现。

为进一步获得更高的功率输出, 首要的是对腔内损耗的优化, 一方面是提高器件的镀膜反射率, 例如电光器件的损耗理论上可以通过提高电光器件的增透膜的透射率以及去掉器件封装中使用的窗口片来降低。另外一方面, 当薄片晶体在激光波长的损耗可以忽略时也可以采用主动多次通过薄片的腔型来降低单程损耗增益比。与此同时, 进一步优化薄片晶体的设计, 降低晶体温度, 降低热畸变也是比较重要的优化方向。

### 参 考 文 献

- [1] Foehl C, Dausinger F. High precision deep drilling with ultrashort pulses [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5063: 346-351.
- [2] Bärsch N, Körber K, Ostendorf A, et al. Ablation and cutting of planar silicon devices using femtosecond laser pulses [J]. Applied Physics A, 2003, 77(2): 237-242.
- [3] Yang Z Q, Duan J, Chen H, et al. Chemically strengthened glass fabricated by picosecond bessel beam cutting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1102010.  
杨泽齐, 段军, 陈航, 等. 皮秒贝塞尔光束切割化学强化玻璃 [J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102010.
- [4] Kanzelmeyer S, Sayinc H, Theeg T, et al. All-fiber based amplification of 40 ps pulses from a gain-switched laser diode [J]. Optics Express, 2011, 19(3): 1854-1859.
- [5] Dong J, Ma L J, Chen Y Q, et al. Experimental characterization of a SESAM mode-locked Yb:YAG thin disk laser [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10811: 108110U.
- [6] Chen B L, Fang X H. Influence of output mirror transmittance on semiconductor saturable absorber mirror mode-locked laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 191401.  
陈博伦, 方晓惠. 输出镜透过率对半导体可饱和吸收镜锁模激光器的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 191401.
- [7] Negel J P, Voss A, Ahmed M A, et al. 1.3 kW average output power Yb:YAG thin-disk multipass amplifier for multi-mJ picosecond laser pulses [C]// CLEO: Science and Innovations 2014, June 8-13, 2014, San Jose, California, United States. Washington D.C.: OSA, 2014: STu1O.2.
- [8] Russbuedt P, Mans T, Weitenberg J, et al. Compact diode-pumped 1.1 kW Yb:YAG Innoslab femtosecond amplifier [J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4169-4171.
- [9] Müller M, Kienel M, Klenke A, et al. 1 kW 1 mJ eight-channel ultrafast fiber laser [J]. Optics Letters, 2016, 41(15): 3439-3442.
- [10] Zhao Z G, Cong Z H, Liu Z J. Review on ultrashort pulse laser amplifiers based on bulk Yb-doped gain media [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071605.  
赵智刚, 丛振华, 刘兆军. 基于掺镱块材料的超短脉冲激光放大器综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071605.
- [11] Saraceno C J, Emaury F, Schriber C, et al. Toward millijoule-level high-power ultrafast thin-disk oscillators [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(1): 106-123.
- [12] Fattahi H, Barros H G, Gorjan M, et al. Third-generation femtosecond technology [J]. Optica, 2014, 1(1): 45-63.
- [13] Nubbemeyer T, Kaumanns M, Ueffing M, et al. 1 kW, 200 mJ picosecond thin-disk laser system [J]. Optics Letters, 2017, 42(7): 1381-1384.
- [14] 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.
- [15] Jia X S, Dong J, Wang H L, et al. High-speed drilling of alumina ceramic by sub-microsecond pulsed thin disk laser [J]. Optics Express, 2020, 28(22): 33044-33052.
- [16] Song E M, Zhu G Z, Wang H L, et al. Minimizing thermal load and stabilizing mode in Yb:YAG thin disk laser by 1030 nm multi-pass pumping [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(16): 1011-1014.

- [17] Smrž M, Miura T, Chyla M, et al. Suppression of nonlinear phonon relaxation in Yb:YAG thin disk via zero phonon line pumping[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4919-4922.
- [18] Peterson P, Gavrielides A, Newell T C, et al. ASE in thin disk lasers: theory and experiment[J]. Optics Express, 2011, 19(25): 25672-25684.
- [19] Chen Y Q, Zhu G Z, Chen H T, et al. Evaluation of amplified spontaneous emission in thin disk lasers using the spectral linewidth [J]. Optics Express, 2019, 27(9): 12110-12125.
- [20] Song E M, Zhu G Z, Wang H L, et al. Design and experimental investigation of Yb : YAG thin-disc multipass laser amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1214001.  
宋恩茂, 朱广志, 王海林, 等. Yb:YAG 薄片多程激光放大器的设计及实验研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1214001.