

突发运行模式下的飞秒碟片再生放大器

陆 俊^{1,2,3}, 刘征征^{2,3}, 刘彦祺², 许 毅², 冷雨欣²

¹ 同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092;

² 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;

³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了获得高重复频率的飞秒激光脉冲, 将突发运行模式引入飞秒碟片再生放大系统中。通过将再生放大器的腔长设计为 9.3 m, 激光系统输出了接近衍射极限的激光脉冲, 且激光脉冲的重复频率为电光调制频率的 5 倍。在电光调制频率为 5 kHz、吸收的抽运功率为 98 W 的条件下, 获得了最高输出功率为 10.7 W、光谱半峰全宽为 1.18 nm、脉冲宽度为 777 fs 的双曲正割脉冲输出。再生放大器的光-光转换效率随着电光调制频率的增加而增加, 从频率为 0.5 kHz 时的 12.4% 增加到频率为 5 kHz 时的 25.3%。激光的输出稳定性在 18~20 °C 的温度区间内随着水冷温度的降低而提高, 激光系统输出功率的均方根从 20 °C 时的 0.93% 变为 18 °C 时的 0.52%。该研究结果对于设计具有高重复频率、高功率且性能稳定的飞秒激光系统具有参考价值。

关键词 激光光学; 半导体抽运激光器; 再生放大器; 突发运行模式; 碟片激光器

中图分类号 TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0501008

Femtosecond Thin-Disk Regenerative Amplifier Under Burst Operation Mode

Lu Jun^{1,2,3}, Liu Zhengzheng^{2,3}, Liu Yanqi², Xu Yi², Leng Yuxin²

¹ School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

² State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to obtain femtosecond laser pulses with high repetition rate, a burst operation mode is introduced into femtosecond thin-disk regenerative amplification system. The cavity length of the regenerative amplifier is designed as 9.3 m, so that the laser pulse which is close to the diffraction limit can be generated. The repetition rate of the laser pulse is 5 times of the electro-optic modulation frequency. Under the condition that the electro-optic modulation frequency is 5 kHz and the absorbed pump power is 98 W, hyperbolic secant pulses with maximum output power of 10.7 W, spectrum full-width-half-maximum (FWHM) of 1.18 nm, pulse width of 777 fs are obtained. The optical-optical conversion efficiency of the regenerative amplifier increases with the increasing of the electro-optic modulation frequency, and the optical-optical conversion efficiency increases from 12.4% at 0.5 kHz to 25.3% at 5 kHz. The laser output stability improves in the range of 18-20 °C with the decreasing of chiller temperature, and the output power root-mean-square of the laser system changes from 0.93% at 20 °C to 0.52% at 18 °C. These results have great values for designing the stable femtosecond laser system with high repetition rate and high power.

Key words laser optics; diode pumped laser; regenerative amplifier; burst operation mode; thin-disk laser

OCIS codes 140.7090; 140.3480; 140.3280; 140.3615

收稿日期: 2016-12-27; **收到修改稿日期:** 2017-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(1127901)、国家自然科学基金创新群体项目(61521093)

作者简介: 陆 俊(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事超快激光脉冲放大技术方面的研究。E-mail: junlu@siom.ac.cn

导师简介: 冷雨欣(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事强场激光物理科学与技术方面的研究。

E-mail: lengyuxin@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

超强超短激光器在过去的几十年里获得了广泛关注,其输出功率和脉冲能量得到了极大提升。激光用于声学显微成像^[1]、激光烧蚀^[2]、激光加速^[3]、粒子测速仪、平面米氏散射和平面激光诱导荧光^[4-5]等实验时,应具有高重复频率和高能量脉冲,以实现超快、高效的激光过程。在这些实验中,激光的高重复频率特性用来研究一些瞬态现象,高能量脉冲则用于激发中间物的反应以及提高信噪比。为了得到适用于激光超快测量的激光光源,研究人员付出了很多努力。连续光抽运的被动锁模激光器是一种传统且耐用的激光器,其重复频率为 80~110 MHz,平均功率约为 100 W,单脉冲能量一般不超过 1 μ J。此外,典型的闪光灯抽运的固体激光器可以输出焦耳量级或者能量更高的激光脉冲^[6],不过由于晶体热效应的影响,其重复频率一般控制在 100 Hz 以下。近几年,随着光纤以及固体激光技术发展的日趋完善^[7-11],研究人员逐渐将注意力转移到碟片激光器上,目前的碟片激光器可以获得功率高达 300 W、重复频率为 10 kHz、脉冲宽度为 1.6 ps 的超短激光脉冲输出^[12]。碟片激光器优异的性能源于其内部新晶体构型的引入,其卓越的面积体积比保证了晶体中的热量能够有效地从晶体中散发;利用背面水冷技术,保证了晶体内部的热流几乎呈一维分布,因此碟片激光器可以在优秀的光束质量下获得极高的能量输出^[13]。一般的碟片激光器将光纤激光器作为种子源,并且激光放大器采用碟片再生放大的构型^[14]。对于这种构型的激光系统,其输出激光的重复频率受限于电光(EO)或声光器件的工作状态。一般商业化的电光调 Q 器件的驱动器的工作频率小于 50 kHz。由于高昂的价格以及禁运限制,具有更高重复频率驱动器的通用性大幅降低。对于工业应用或者一些超快应用而言,常用的重复频率范围为 200~600 kHz。因此需找到一种有效的解决方案,通过在现有激光系统的基础上加以适当的改造,以满足使用者对产品的需求。

激光器有一种有趣的运行模式,称作突发运行模式。在该模式下,激光器可以产生重复频率高于电光调制频率的激光脉冲序列^[15-16]。Bai 等^[17]通过将长腔结构引入再生放大器中,获得了单脉冲能量为 5.6 mJ、重复频率为 1 kHz、脉冲宽度为 106.4 ps 的脉冲串输出;Mareczko 等^[18]也获得了单脉冲能量为 13 mJ、重复频率为 10 Hz、脉冲宽度为 460 fs 的脉冲串输出。实验中,先使用脉冲选择器将种子光的重复频率降低到工作频率,再对其进行放大,由此获得了高功率或超短激光脉冲串输出。通过进一步分析得知,再生腔内电光器件的开关特性同样可以对注入脉冲进行选择。因此,提出了一种将振荡器输出的频率为 80 MHz 的种子脉冲直接注入到运行在突发运行模式下的飞秒碟片再生放大器中的方法。利用该方法并结合色散及延时控制系统,获得了最高输出功率为 14.3 W、重复频率在 0.5~5 kHz 范围内可调、压缩后脉冲宽度为 777 fs 的超短脉冲串输出。

2 飞秒碟片再生放大系统

2.1 飞秒碟片再生放大系统概况

突发运行模式下工作的飞秒碟片激光系统示意图如图 1 所示,该系统由振荡器、展宽器、放大器和压缩器构成,在突发运行模式下工作的激光系统省去了在放大器之前的额外的脉冲选单操作。系统中使用的振

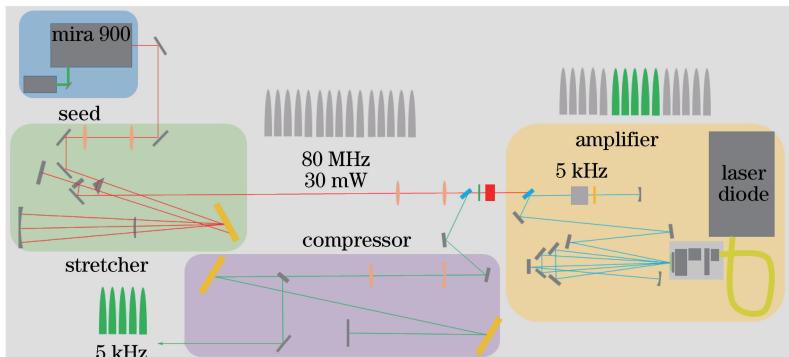


图 1 飞秒碟片再生放大系统的示意图

Fig. 1 Schematic of femtosecond thin-disk regenerative amplification system

荡器是由相干公司生产的商业化掺钛蓝宝石固体振荡器,输出功率约为 380 mW,脉冲宽度和重复频率分别为 110 fs 和 80 MHz。由振荡器产生的种子光被 Offner 构型的展宽器展宽,该展宽器支持的带宽和啁啾量分别为 10 nm 和 190 ps/nm。接着,展宽后的激光脉冲经准直后被注入到再生放大模块中,再生放大模块中的电光调制晶体的工作频率小于 5 kHz。注入的频率为 80 MHz 的脉冲序列中,满足偏振条件的脉冲将在腔内振荡并被放大。通过精心设计再生腔,使腔内模式与抽运光的模式相匹配,再生腔在整个抽运功率范围内满足稳定性条件。另外,腔周期约为入射脉冲间隔的 5 倍,在每个放大周期内可以同时放大 5 个脉冲。通过薄膜偏振片(TFP)将放大后的脉冲从再生放大器中导出,放大后的脉冲序列经扩束准直后被注入到 Treacy 构型的压缩器中。该压缩器的设计参数与展宽器相对应,支持的带宽和啁啾量分别为 10 nm 和 190 ps/nm。通过调节光栅对的入射角度和距离,可补偿放大过程中额外引入的材料色散。

2.2 放大模块

飞秒碟片激光系统中的放大模块为基于驻波腔结构的再生放大器,再生放大器的结构示意图如图 2 所示。该放大模块由抽运模块(TDM)、电光调制器、薄膜偏振片、旋光器、1/4 波片和 1/2 波片构成。抽运模块采用 Dausinger+Giesen 公司提供的 TDM 1.0 模块,晶体采用直径为 12 mm、厚度为 215 μm 、掺杂浓度为 7%(原子数分数)的 Yb:YAG 晶体;抽运源采用最大抽运功率为 300 W、光纤输出口径为 600 μm 的半导体激光器;抽运激光通过 K9 型号的成像透镜组成像到晶体表面,抽运光斑在晶体表面的直径约为 3.2 mm;该抽运模块采用多通抽运方案,抽运光在晶体表面反射 12 次,从而保证 90% 以上的抽运光被晶体吸收。电光调制模块采用 Ekspla 公司提供的 PCB6.3D 模块,该模块中偏硼酸钡(BBO)晶体的通光口径为 5.8 mm,1/4 电压为 3.5~3.6 kV,驱动器的上升沿、下降沿时间小于 7 ns,开门门宽为 10 μs 左右。薄膜偏振片采用对 S 偏振入射光高反射的构型,该薄膜偏振片由美国 Alpine Research Optics 公司提供。P 偏振入射光由薄膜偏振片 TFP1 透射到半波片上,1/2 波片将入射光转变为偏振方向与水平面夹角呈 45° 的线偏振光,接着旋光器再将线偏振光的偏振态改变为 P 偏振,最后通过薄膜偏振片 TFP2 将 P 偏振光注入到再生放大模块中。对于那些在电光调制器加电压之前已经往返 BBO 晶体一次并且处于再次到达 BBO 晶体之前的脉冲,若满足腔的导入条件,脉冲可在腔内持续振荡并得到放大,而在其他时刻导入的脉冲则无法在腔内形成振荡,因而被直接导出腔外。

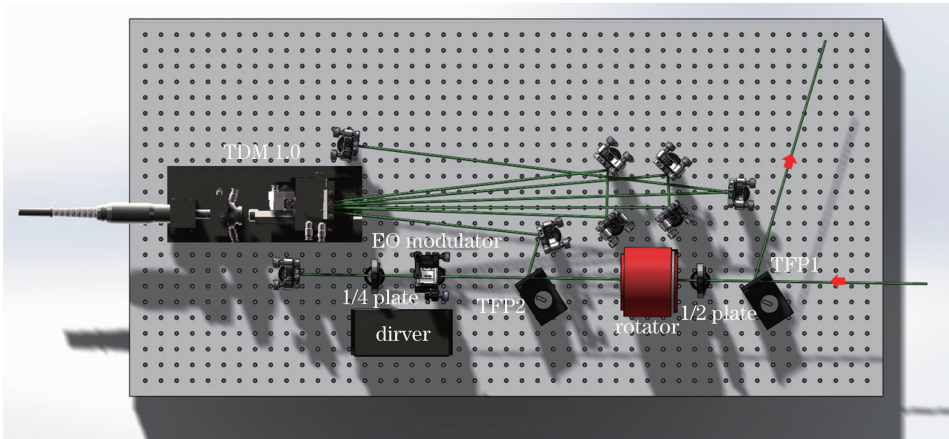


图 2 再生放大器的结构示意图

Fig. 2 Structural schematic of regenerative amplifier

2.3 理论模型

对于固体激光放大系统,Kroetz 等^[19]对经典的 Fowler-Nordheim 方程进行了适当的修改,给出了较成熟的理论模型。使用了反转分数 β 来衡量增益介质的反转粒子, β 定义为

$$\beta = \frac{n_e}{N_{\text{total}}}, \quad (1)$$

式中 n_e 为激发的粒子数, N_{total} 为总的粒子数。类似于单色光单次通过增益介质,光谱单次通过增益介质对应的增益或吸收 $G_{i-1}(\lambda)$ 可定义为

$$G_{i-1}(\lambda) = \exp[\sigma_{g,i-1}(\lambda)NL], \quad (2)$$

式中 N 为增益介质的掺杂粒子数密度; L 为增益介质的厚度; $\sigma_{g,i-1}(\lambda)$ 为光谱增益截面, 可表示为

$$\sigma_{g,i-1}(\lambda) = \beta_{i-1} [\sigma_{em}(\lambda) + \sigma_{abs}(\lambda)] - \sigma_{abs}(\lambda), \quad (3)$$

式中 β_{i-1} 为放大前的全局平均反转分数, $\sigma_{em}(\lambda)$ 和 $\sigma_{abs}(\lambda)$ 分别为辐射截面和吸收截面的面积。初始光谱通量 $J_{i-1}(\lambda)$ 与单次通过增益介质后的光谱通量 $J_i(\lambda)$ 的关系可表示为

$$J_i(\lambda) = J_{sat}(\lambda)T(\lambda)\ln\left\{1 + G_{i-1}(\lambda)\exp\left[\frac{J_{i-1}(\lambda)}{J_{sat}(\lambda)}\right] - 1\right\}, \quad (4)$$

式中 $T(\lambda)$ 为单次透射率; $J_{sat}(\lambda)$ 为饱和通量, 可表示为

$$J_{sat}(\lambda) = \frac{hc}{\lambda [\sigma_{abs}(\lambda) + \sigma_{em}(\lambda)]}, \quad (5)$$

式中 c 为真空中的光速, h 为普朗克常数, λ 为波长。放大后反转粒子数引起的反转分数 β_i 发生变化, 放大前的全局平均反转分数 β_{i-1} 与放大后的反转粒子数引起的反转分数 β_i 满足

$$\beta_i = \beta_{i-1} - \frac{\int \left\{ \lambda \left[\frac{J_i(\lambda)}{T(\lambda)} - J_{i-1}(\lambda) \right] \right\} d\lambda}{hcLN}. \quad (6)$$

放大原理示意图如图 3 所示, 假设激光工作的重复频率为 f , 则每隔 T_0 ($T_0 = 1/f$) 的时间, 再生腔会选择一个脉冲串并对其进行放大。当重复频率高于 1 kHz 时, 前一个放大周期引起的上能级反转粒子数变化 (Δn) 可能会对下一个周期的放大产生影响, 即上一个脉冲放大之后, 消耗了大量的反转粒子数, 使得下一个脉冲注入时, 上能级粒子未得到完全恢复。在此计算过程中, 将放大后的能量作为注入的第 100 个脉冲放大后对应的最大能量, 因为此时脉冲对能量的提取与增益介质的反转粒子数已经达到平衡。图 3 中 Δn_{max_i} ($1 \leq i \leq k+2$) 为在第 i 次抽运后晶体的最高上能级粒子数密度。

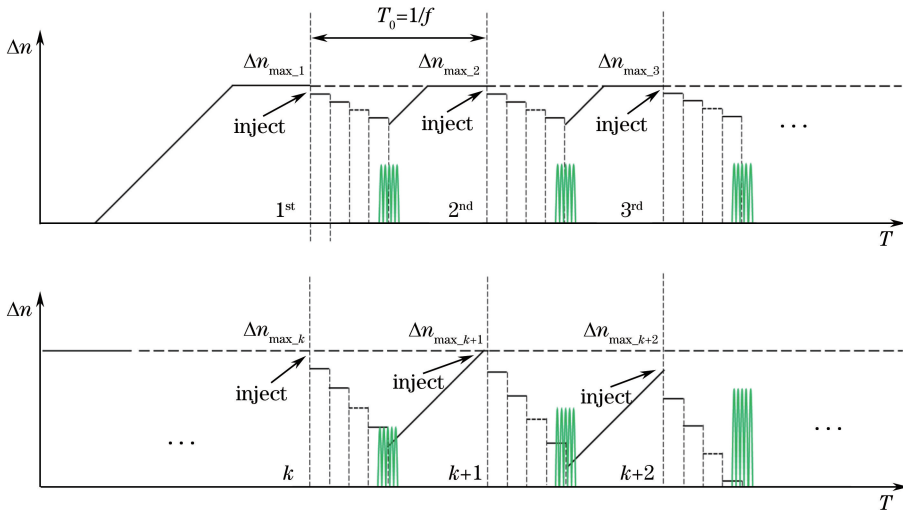


图 3 放大原理示意图

Fig. 3 Schematic of amplification principle

3 飞秒碟片再生放大器的性能

3.1 飞秒碟片再生放大器的热稳定特性

工作在突发运行模式下的激光放大系统可在一个放大周期内同时对 5 个脉冲进行放大, 振荡器产生的脉冲序列对应的时间间隔为 12.5 ns 左右, 需要 5 个脉冲同时在腔内振荡, 因此腔周期应该大于 62.5 ns。这是由于脉冲的注入是通过薄膜偏振片等偏振元件控制入射脉冲的偏振态来实现的, 以 P 偏振入射的种子光透过薄膜偏振片进入再生腔, 接着经过电光晶体和 1/4 波片, 脉冲经过电光晶体时电光开关关闭, 种子光往返 1/4 波片 1 次后其偏振态变为 S 偏振, 接着种子光经薄膜偏振片的反射后被导入腔内。当 5 个脉冲全部

注入完成后,打开电光开关。若再生腔的腔长过短,则第 5 个脉冲注入完成时第 1 个注入的脉冲有可能再次抵达电光晶体,这样 1/4 波片会再次将第 1 个注入脉冲的偏振态转变为 P 偏振并提前被导出腔外,因此再生腔的腔长直接决定了工作在突发运行模式下的再生腔可以同时放大脉冲的数目,且设计的腔长应该大于需要放大的脉冲数目乘以脉冲的时间间隔。除此之外,设计腔型需要考虑热效应导致的晶体表面曲率 K 的变化。晶体在室温下的表面曲率为 7.9 m^{-1} 左右,表面曲率随着抽运功率的增加而逐渐增大,随着抽运功率的继续增加,晶体表面可由凹面变为凸面。在抽运功率为 120 W 左右的抽运条件下,晶体表面曲率为 15 m^{-1} 左右,设计后的腔型可以保证晶体表面曲率在从 12 m^{-1} 增加到 20 m^{-1} 的过程中,晶体表面的腔内模式大小几乎保持不变,并且激光器在整个抽运功率范围内都满足稳定性条件。不同晶体表面曲率对应的再生放大器的腔内模式演化如图 4 所示,抽运光斑直径约为 3.2 mm ,腔内模式在晶体表面的直径约为 2.4 mm ,小于抽运光斑大小的 0.8 倍,从而保证了激光良好的输出质量^[20]。

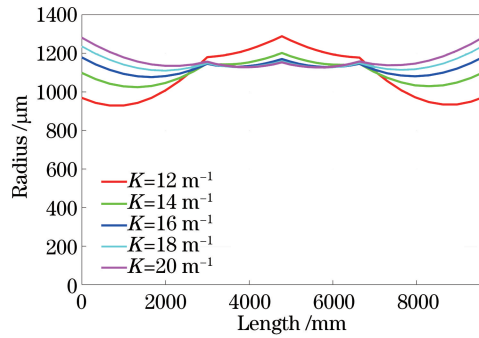


图 4 不同晶体表面曲率对应的再生放大器腔内模式演化

Fig. 4 Mode evolution in cavity of regenerative amplifier with different crystal surface curvatures

3.2 再生放大器的输出特性

腔内建立的脉冲序列以及导出后的脉冲序列如图 5 所示,在突发运行模式下工作的再生放大器和在普通模式下工作的放大器存在明显差异。由图 5(a)可知,每个放大周期内的 5 个脉冲依次在腔内被放大,脉冲导出时需要准确控制延时,以保证 5 个脉冲在最后一个放大周期完全放大后被导出。典型的导出脉冲序列如图 5(b)所示,由图可知,导出后每一个放大周期内的 5 个脉冲能量基本相同;5 个脉冲中,后一个脉冲的能量略微低于前一个脉冲的能量,这是由于每次经过增益介质时,前面的脉冲经历的增益略高于后面的脉冲。

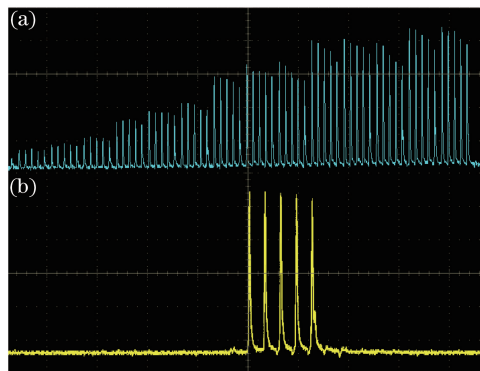


图 5 (a)再生放大器腔内建立的脉冲序列;(b)导出的脉冲序列

Fig. 5 (a) Pulse sequence built in cavity of regenerative amplifier; (b) exported pulse sequence

激光器在不同重复频率下的输出功率随着吸收抽运功率的变化特性如图 6(a)所示,由图可知,激光的输出功率随着抽运功率的增加而呈线性增加。随着激光重复频率的增加,相同抽运功率下输出的能量依次增加。当激光吸收的抽运功率约为 100 W 时,重复频率分别为 $0.5, 1, 2.5, 5 \text{ kHz}$ 的激光器对应的最大输出能量分别为 $7.3, 10.9, 11.8, 14.3 \text{ W}$ 。通过观察图 6(b)中红色圆圈可知,激光的光-光转换效率随着重复频率的增加而增加,光-光转换效率从频率为 0.5 kHz 时的 12.4% 增加到频率为 5 kHz 时的 25.3% 。对此,利用第 2.3 节中引入的数学模型进行模拟,初始条件设定为:吸收的抽运功率 $P_{\text{abs}} = 100 \text{ W}$,腔内的单次通过损耗

$\alpha_{\text{loss}} = 0.008$, 腔内模式直径 $D = 0.28 \text{ cm}$, 晶体的掺杂浓度 $C_p = 7\%$ (原子数分数), 晶体的厚度 $L_{\text{crystal}} = 220 \mu\text{m}$ 。图 6(b) 中绿线为模拟结果, 可见模拟结果与实验结果基本吻合。光-光转换效率随着重复频率的增加而增加的现象可以理解为: 低重复频率下有足够的时间恢复消耗的上能级粒子, 脉冲可以得到有效放大, 但是由于重复频率较低, 大多数的抽运能量通过荧光辐射或者无辐射跃迁等形式被释放。随着激光重复频率的增加, 激光上能级粒子被有效地消耗, 通过荧光辐射以及非辐射跃迁消耗的能量所占比例变小, 更多的能量通过脉冲放大的形式被提取, 因此光-光转换效率随着重复频率的增加而增加。当激光器的运行频率为 5 kHz、吸收的抽运功率接近 92 W 时, 对应的输出功率约为 12.3 W, 使用光谱仪 (HR2000+ 型, Ocean Optics 公司) 测量光谱, 得到激光输出的光谱如图 7(a) 所示。由图可知, 输出激光的中心波长约为 1030.9 nm, 对应的半峰全宽 (FWHM) 约为 1.18 nm。放大后的脉冲经扩束准直后被注入到压缩器中进行压缩, 该压缩器与前端的 Offner 展宽器相匹配, 通过微调光栅的角度以及光栅对的距离, 得到了较为理想的压缩脉冲, 压缩器的压缩效率为 75%, 运行在频率为 5 kHz、抽运电流为 26 A 的抽运条件下的激光系统压缩后的脉冲功率为 10.7 W。压缩后的脉冲时域分布如图 7(b) 所示, 蓝线为测量得到的二阶自相关信号; 假设脉冲时域满足双曲正割函数分布, 则黑色虚线为与测得的自相关信号拟合较好的双曲正割函数曲线。通过分析可知, 压缩后的脉冲宽度约为 777 fs, 使用实验室自制的自相关仪测量脉冲。

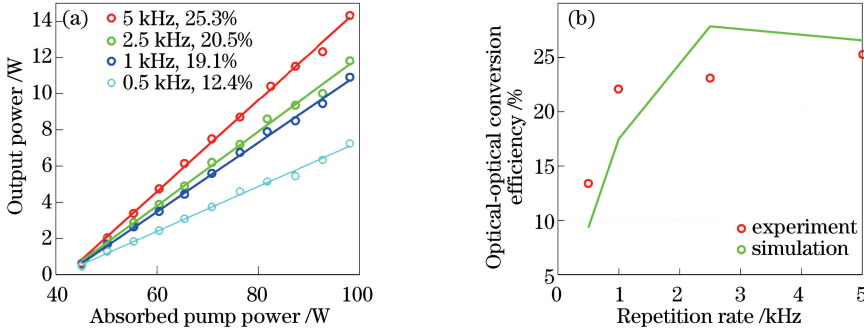


图 6 (a) 不同重复频率下输出功率随吸收抽运功率的变化; (b) 光-光转换效率随重复频率的变化
Fig. 6 (a) Variation in output power with absorbed pump power at different repetition rates;
(b) variation in optical-optical conversion efficiency with repetition rate

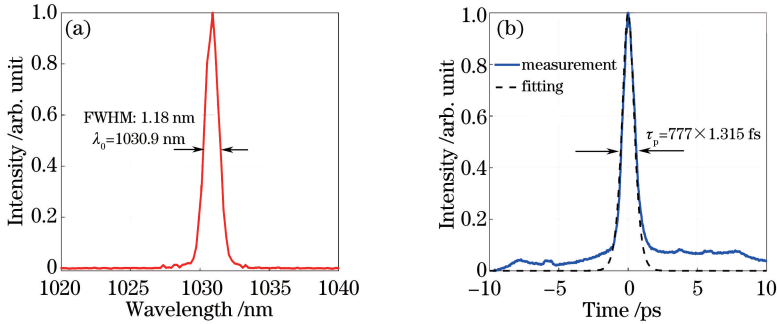


图 7 (a) 输出功率约为 12.3 W 时对应的输出光谱; (b) 压缩后的脉冲时域分布

Fig. 7 (a) Output spectrum when output power is 12.3 W; (b) distribution of pulse temporal domain after compression

放大器输出功率为 12 W 时对应的光斑空间分布如图 8 所示, 图 8(a) 为激光的近场光斑分布, 图 8(b) 为激光的远场光斑分布。由图可见, 激光的输出模式接近于衍射极限, 图 8(b) 中出现了光晕是因为在测量输出光斑空间分布时, 使用的白片减小了脉冲强度, 且白片后表面的反射对主光斑产生了影响, 通过使用后表面打毛的白片或者在双面光面的白片后表面涂抹凡士林等方法可以有效避免该问题。激光输出的功率稳定性对晶体水冷温度的变化较为敏感, 在水冷温度从 20 °C 逐渐降低到 18 °C 的过程中, 激光输出的功率稳定性逐渐增强。在室温为 23.1 °C、湿度约为 30%、抽运电流为 25 A 的条件下, 激光输出的功率稳定性曲线如图 9 所示, 60 min 后测量得到的水冷温度分别为 18, 19, 20 °C 时对应的激光输出功率的均方根 (RMS) 分别为 0.52%、0.68% 和 0.93%。文献 [21] 中提到激光输出功率的稳定性在很大程度上受抽运激光器稳定性的

影响,故在相同环境下对抽运激光二极管(LD)的稳定性进行测试。在水冷温度从 20 °C降低到 18 °C的过程中,抽运 LD 的输出稳定性降低,不同温度下抽运 LD 的输出功率的稳定性曲线如图 10 所示,30 min 后测量得到的水冷温度分别为 18,19,20 °C 时 LD 输出功率的均方根分别为 0.32%、0.40%和 0.56%。这是由于抽运 LD 出厂时是针对 25 °C 工作温度进行优化的,随着温度的降低,LD 模块偏离其最优工作状态,故 LD 的性能降低。激光器输出功率在温度为 18 °C 时达到最高,产生这种现象的原因是该温度下晶体的热量被高效地移除,使得晶体表面的温度降低,减小了由于热致畸变引起的衍射损耗,从而使得激光输出功率的稳定性得到加强。

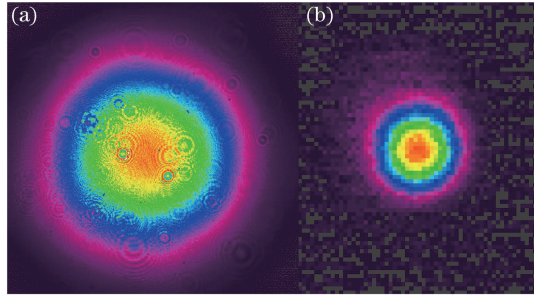


图 8 放大器输出功率为 12 W 时激光的(a)近场和(b)远场的光斑分布

Fig. 8 Laser spot distributions of (a) near field and (b) far field when output power of amplifier is 12 W

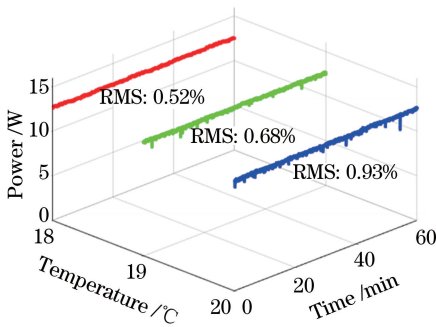


图 9 不同温度下的激光输出功率的稳定性曲线

Fig. 9 Laser output power stability curves at different temperatures

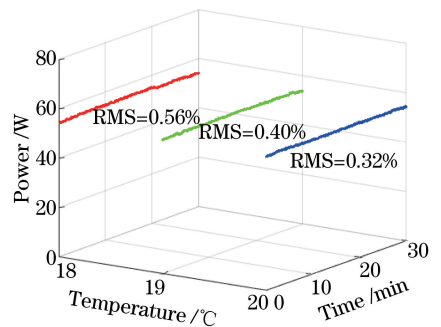


图 10 不同温度下抽运 LD 的输出功率的稳定性曲线

Fig. 10 Output power stability curves of pumped LD at different temperatures

4 结 论

通过优化设计再生放大器的腔型,保证再生放大器在整个抽运功率范围内为稳定腔。设计的再生放大器中晶体表面处的腔模直径小于抽运光斑直径的 0.8 倍,从而得到了接近衍射极限的激光输出。通过将突发运行模式引入到飞秒碟片再生放大器中,得到了重复频率为电光调制频率 5 倍的脉冲序列输出。当电光调制频率为 5 kHz 时,得到了最高输出功率为 10.7 W、光谱半峰全宽为 1.18 nm、中心波长为 1030.9 nm 及脉冲宽度为 777 fs 的双曲正割脉冲输出。激光的光-光转换效率随着电光调制频率的增加而增加,在电光调制频率从 0.5 kHz 增加到 5 kHz 的过程中,光-光转换效率从 12.4% 增加到 25.3%。激光输出的功率稳定性对水冷温度具有很强的依赖性,当水冷温度为 18 °C 时,激光输出功率最稳定,连续工作 60 min 后输出功率的均方根为 0.52%,这可能是由于该温度下晶体产热得到了有效释放,减弱了晶体热畸变引入的衍射损耗等因素对激光输出功率的影响。该实验结果对设计具有更高功率、更高重复频率且性能更稳定的飞秒激光系统具有参考价值。该系统仍存在结构不够紧凑、输出功率不高和输出重复频率较低等问题。因此,下一步将采用啁啾布拉格光纤光栅或者啁啾布拉格体光栅与压缩器的组合方式,以使系统更为紧凑,并选用支持更高重复频率的延时系统以及具有更大光学口径的电光晶体,从而获得具有更高重复频率、更高输出功率的飞秒碟片再生放大系统。

参 考 文 献

- [1] Liu T, Wang J, Petrov G I, *et al.* Photoacoustic generation by multiple picosecond pulse excitation[J]. *Medical Physics*, 2010, 37(4): 1518-1521.
- [2] Lapczynya M, Chen K P, Herman P R, *et al.* Ultra high repetition rate (133 MHz) laser ablation of aluminum with 1.2-ps pulses[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 1999, 69(1): S883-S886.
- [3] Will I, Templin H I, Schreiber S, *et al.* Photoinjector drive laser of the FLASH FEL[J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 23770-23781.
- [4] Thurow B, Jiang N, Lempert W. Review of ultra-high repetition rate laser diagnostics for fluid dynamic measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 24(1): 012002.
- [5] Thurow B S, Satija A, Lynch K. Third-generation megahertz-rate pulse burst laser system[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(11): 2086-2093.
- [6] Okada H, Yoshida H, Fujita H, *et al.* Nd:YAG split-disk laser amplifier for 10 J output energy [J]. *Optics Communications*, 2006, 260(1): 277-281.
- [7] Huang Y J, Su K W, Chen Y F. >100 W master oscillator power amplifier based on Nd:YVO₄ crystal with multiple doping concentrations[C]. *Advanced Solid State Lasers*, 2014: AM2A. 3.
- [8] 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.
- [9] Rothhardt J, Rothhardt C, Müller M, *et al.* 100 W average power femtosecond laser at 343 nm[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1885-1888.
- [10] Wang Ke, Zhu Jiangfeng, Gao Ziyue, *et al.* Continuous wave and wavelength tuning performances of diode-pumped Yb:YAG ceramic laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1202004.
汪 珂, 朱江峰, 高子叶, 等. 二极管抽运 Yb:YAG 陶瓷连续激光器和波长调谐实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1202004.
- [11] Yu Yang, Zhu Jiangfeng, Li Jiang, *et al.* High power passively Q-switched laser of diode-pumped domestic Yb:YAG ceramic[J], *Chinese J Lasers*, 2016, 43(10): 1001007.
于 洋, 朱江峰, 李 江, 等. 二极管抽运国产 Yb:YAG 陶瓷高功率被动调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1001007.
- [12] Teisset C, Schultze M, Bessing R, *et al.* 300 W picosecond thin-disk regenerative amplifier at 10 kHz repetition rate [C]. *Mid-Infrared Coherent Sources*, 2013: JTh5A.1.
- [13] Giesen A, Speiser J. Fifteen years of work on thin-disk lasers: Results and scaling laws[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 598-609.
- [14] Chyla M, Miura T, Smrz M, *et al.* 30-mJ, 1-kHz, Yb:YAG thin disk regenerative amplifier with pulsed pumping at 969-nm[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)*, 2013: 13777741.
- [15] Bai Z N, Bai Z X, Yang C, *et al.* High pulse energy, high repetition picosecond chirped-multi-pulse regenerative amplifier laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 46: 25-28.
- [16] Yan R P, Li X D, Yu X, *et al.* High-repetition-rate, high-pulse-energy burst mode laser from a Nd:YVO₄/Nd:YAG MOPA system[C]. *Advanced Solid State Lasers*, 2016: JTu2A.14.
- [17] Bai Z A, Bai Z X, Chen M, *et al.* A 28 W multi-pulse high energy regenerative amplifier for a picosecond laser system [J]. *Lasers in Engineering*, 2014, 29(1): 115-121.
- [18] Mareczko A, Clet V, Courjaud A, *et al.* 100 mJ level Yb:CaF₂ regenerative amplifier for multipulse femtosecond regime[C]. *Advanced Solid State Lasers Congress*, 2013: ATu3A.47.
- [19] Kroetz P, Ruehl A, Murari K, *et al.* Numerical study of spectral shaping in high energy Ho:YLF amplifiers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9905-9921.
- [20] Mende J, Speiser J, Spindler G, *et al.* Mode dynamics and thermal lens effects of thin-disk lasers[C]. *SPIE*, 2008, 6871: 68710M.
- [21] Kroetz P, Ruehl A, Chatterjee G, *et al.* High energetic and highly stable pulses from a Ho:YLF regenerative amplifier [C]. *SPIE*, 2016, 9726: 97260S.