

# 高能量高效率钕玻璃再生放大器

王小发<sup>1,2,3</sup> 樊仲维<sup>1,3</sup> 余 锦<sup>1</sup> 石朝辉<sup>3</sup> 赵天卓<sup>1</sup> 王培峰<sup>3</sup>  
康治军<sup>3</sup> 连富强<sup>1,2,3</sup> 黄玉涛<sup>1,2,3</sup> 唐熊忻<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100080  
<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049  
<sup>3</sup>北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100192

**摘要** 为了获得高能量、高效率的钕玻璃前置放大器,设计了一套钕玻璃再生放大系统。通过调节单程增益和优化腔模设计,使得增益介质中的小尺度自聚焦效应得到有效控制。在重复频率 1 Hz 运行下,获得最大输出能量 21 mJ、脉冲宽度 2.65 ns 的激光输出,相应的光-光转换效率为 5%,总增益达  $10^8$ ,光束质量因子  $M^2 = 1.5$ ,脉冲能量稳定性均方根(RMS)值小于 2%(超过 2 h 连续工作),光谱的中心波长为 1052.92 nm。

**关键词** 激光器;掺钕磷酸盐玻璃;再生放大器;小尺度自聚焦效应;光-光转换效率

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0802002

## High Energy and High Efficiency Nd:Glass Regenerative Amplifier

Wang Xiaofa<sup>1,2,3</sup> Fan Zhongwei<sup>1,3</sup> Yu Jin<sup>1</sup> Shi Zhaohui<sup>3</sup> Zhao Tianzhuo<sup>1</sup>  
Wang Peifeng<sup>3</sup> Kang Zhijun<sup>3</sup> Lian Fuqiang<sup>1,2,3</sup> Huang Yutao<sup>1,2,3</sup> Tang Xiongxin<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China  
<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup>Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100192, China

**Abstract** To obtain high energy, high efficiency Nd:glass preamplifier, a Nd:glass regenerative amplifier system is designed. By adjusting the single pass gain and carefully optimizing the cavity mode, the small-scale self-focusing effect in the gain medium is effectively controlled. Maximum pulse energy of 21 mJ, pulse width of 2.65 ns is obtained at the repetition frequency of 1 Hz, corresponding to a high optical-optical conversion efficiency of 5% and amplification ratio of  $10^8$ . The root-mean-square (RMS) of pulse to pulse energy stability is less than 2% during 2 h continuous operation. The laser has a good beam quality of  $M^2 = 1.5$ . The spectrum is measured to be at center wavelength of 1052.92 nm.

**Key words** lasers; neodymium-doped phosphate glass; regenerative amplifier; small-scale self-focusing effect; optical-optical conversion efficiency

**OCIS codes** 140.3480; 140.3280; 140.3380; 140.3530

## 1 引 言

掺钕磷酸盐玻璃因其具有增益带宽大、饱和通量高、破坏阈值高、上能级寿命长、受激发射截面低、易于制成大尺寸等优点,被广泛使用在超短脉冲放大、强场物理和激光核聚变等领域<sup>[1~11]</sup>。

钕玻璃由于具有高储能特性,非常适合作为再生放大器的增益介质。再生放大器有 3 个主要特点:1) 高增益;2) 易于实现对低单通增益介质的激光放大;3) 种子源能与腔的本征模匹配,实现模式的再生,保证种子光的光束质量在放大过程中不恶

收稿日期: 2012-03-02; 收到修改稿日期: 2012-04-23

基金项目: 海淀区重大科技成果转化和产业化项目(20101213)资助课题。

作者简介: 王小发(1979—),男,博士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: bluebaby0614@126.com

导师简介: 樊仲维(1965—),男,博士,研究员,主要从事全固态激光器方面的研究。

E-mail: fanzw002@163.com(通信联系人)

化<sup>[11]</sup>。结合了钕玻璃和再生放大器的优点,钕玻璃再生放大器非常适合作为高增益的前置放大器使用。然而,由于钕玻璃热导性非常差,热效应非常严重,因此,高能量、高效率钕玻璃再生放大器的研制一直是一个技术难题。钕玻璃再生放大器主要用于窄带纳秒脉冲<sup>[9,11]</sup>和宽带啁啾脉冲<sup>[10,12]</sup>的放大,输出能量一般限制在几十毫焦左右。在窄带纳秒脉冲钕玻璃再生放大器中,代表性装置为美国的国家点火装置(NIF),输出能量在 20 mJ 左右,增益达到  $10^8$ ,目前,NIF 装置已经实现了钕玻璃再生放大器的大规模工程化运行<sup>[9]</sup>。基于国产的 N31 型磷酸盐钕玻璃,早在 1998 年王晓东等<sup>[13]</sup>报道了氙灯抽运的钕玻璃再生放大器,获得输出能量 4 mJ,总增益为  $10^6$ 。到 2008 年,王江峰<sup>[14]</sup>采用附加后缀脉冲的方法研究了 1 Hz 重复频率下高稳定钕玻璃再生放大技术,获得了输出能量 13 mJ,总增益  $10^7$ ,方波扭曲小于 1.47,脉冲稳定性均方根(RMS)值小于 1%的较好水平。然而,由于更高能量的钕玻璃再生放大器受小尺度自聚焦效应和电光晶体破坏阈值的限制,一直未见报道。

本文为了获得 1 Hz 重复频率下,输出能量超过 20 mJ 的钕玻璃再生放大器,通过优化再生腔的结构和抽运方式,控制放大器的单程增益,使得高输出能量下钕玻璃内的小尺度自聚焦效应能得到有效控制,在注入脉冲能量 200 pJ 情况下,获得了总增益大于  $10^8$ ,总输出能量 21 mJ,光-光转换效率 5%,脉冲稳定性 RMS 值 2%(超过 2 h),光束质量因子  $M^2=1.5$  的较好水平。该装置大大提高了能量的提取效率、节约成本。

## 2 再生放大理论

N31 型掺钕磷酸盐玻璃属于四能级系统,1053 nm 波长的激光跃迁发生在钕原子  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{11/2}$  能级之间,再生放大器的本质是多程放大,因此,可以利用经典激光放大理论来计算再生放大器的输出能量<sup>[15,16]</sup>。经过  $n$  次增益介质后的放大脉冲的能量密度用  $J_n$  表示为

$$J_n = J_{\text{sat}} \ln \left( 1 + \exp \left( \frac{J_{\text{sto},n-1}}{J_{\text{sat}}} \right) \times \left[ \exp \left( \frac{J_{n-1} - LJ_{n-1}}{J_{\text{sat}}} \right) - 1 \right] \right), \quad (1)$$

$$J_{\text{sto},n} = J_{\text{sto},n-1} - [J_n - (1-L)J_{n-1}], \quad (2)$$

式中  $L$  表示再生腔中的单通损耗,  $J_{\text{sto},n}$  表示储存在增益介质中的能量密度。不考虑受激吸收的情况下,

饱和能量密度  $J_{\text{sat}}$  表示为

$$J_{\text{sat}} = \frac{hc}{\lambda\sigma}, \quad (3)$$

式中  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中的光速,  $\sigma$  为钕玻璃的受激发射截面,  $\lambda$  为注入种子脉冲的中心波长。

(1)式的初始条件为  $n=0$  时,

$$J_{\text{sto},0} = J_{\text{sat}} \ln(G_0), \quad (4)$$

式中  $G_0=G_0(\lambda)$  为在种子光中心波长  $\lambda$  处磷酸盐钕玻璃的小信号增益。为了方便起见,不考虑光谱宽度对放大特性的影响。

## 3 再生放大器系统模型

图 1 为再生放大器采用的基本实验结构。种子源采用自制的半导体激光器脉冲抽运的 Nd:YLF 腔倒空振荡器,种子脉冲首先由薄膜偏振片 TFP1 进入,再经过法拉第旋光器 FR 和  $\lambda/2$  波片后,由第 2 个薄膜偏振片 TFP2 进入再生腔中,再经过一个  $\lambda/4$  波片和 KD\*P 泡克耳斯盒,经过镀 1053 nm 高反膜的平镜 M1,在腔内往返一次再由 TFP1 输出, M2 为曲率 5 m、凹面镀 1053 nm 高反膜的平凹反射镜, TFP3 为腔内的薄膜偏振片,增益介质为半导体激光器脉冲侧泵模块,钕玻璃棒为国产的 N31 型,棒的尺寸为  $\phi 3 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ ,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  掺杂质量分数为 3.85%,有效抽运长度为 43 mm,由 3 个 3 kW 脉冲半导体激光器阵列环形排列,相邻阵列之间角度相差  $120^\circ$ ,采用直接抽运的方式,在  $300 \mu\text{s}$  抽运宽度下,总抽运能量可以达到 3 J,输出电流在  $0 \sim 200 \text{ A}$  可调,整个模块采用去离子水冷却,水温控制在  $(20 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ , KD\*P 晶体的尺寸为  $\phi 8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,  $\lambda/4$  波片电压为 4.9 kV,表面膜层的破坏阈值为  $150 \text{ MW}/\text{cm}^2$ ,再生腔设计的总腔长为 4 m,腔内增益介质处的腔模直径为 2.5 mm,电光晶体置于腔镜 M1 附近腔模光斑最大的位置,可有效避免 KD\*P 晶体破坏,钕玻璃棒置于腔模内瑞利长度范

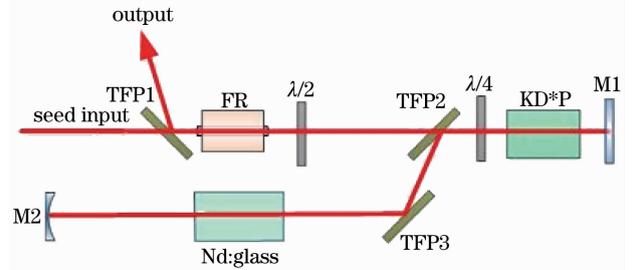


图 1 再生放大器的实验系统模型

Fig. 1 Experimental system model of the regenerative amplifier

围内,这样不但可以降低因棒的小尺寸产生的衍射损耗,而且可有效避免 3 ns 脉冲在再生腔内发生重叠。

## 4 结果与讨论

利用微秒和纳秒同步机分别控制腔倒空种子源和再生放大器的时序特性,其中,使用微秒同步机来触发纳秒同步机。同时,微秒同步机用来分别控制种子源和再生放大器增益介质的抽运电流脉宽,纳秒同步机用于分别控制腔倒空种子源电光 Q 和再生放大器电光 Q 的时序关系。对实验获得的再生放大器时域波形和光谱特性与种子源进行了对比,分析了影响再生放大器长期稳定性的因素以及更高输出能量的限制因素。此外,还利用 Matlab 软件对再生放大器输出能量进行数值模拟,模拟过程中再生放大器的单程损耗系数采用实验测量结果  $L=0.03$ ,钕玻璃的受激发射截面  $\sigma=4.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ <sup>[5]</sup>,  $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ,  $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $\lambda=1053 \text{ nm}$ ,小信号增益使用不同抽运电流下测得的实验结果,种子注入能量为 200 pJ,并就理论计算获得的结果与实验结果进行了比较。

### 4.1 再生放大脉冲与种子脉冲的特性对比

实验中,再生放大器增益模块的工作重复频率为 1 Hz,抽运电流为 75 A,抽运脉宽为 250  $\mu\text{s}$ ,腔内总的往返时间为 540 ns,抽运脉宽比钕玻璃的上能级寿命(340  $\mu\text{s}$ )短的目的是减少占空比,减少热积累。图 2 为腔倒空种子源和再生放大器输出的脉冲波形。从图 2(a)可以看出,种子脉冲为典型高斯脉

冲,脉冲宽度为 2.95 ns,波形非常干净,无明显的前脉冲和后脉冲。从图 2(b)可以看出,上图为激光脉冲在再生腔内的演化过程,两脉冲之间的间隔即为腔内的往返时间,约为 27 ns。下图为脉冲能量达到最大值时,再生腔倒空出来的再生波形,经过再生放大后,脉冲的宽度由开始的 2.95 ns 减少为 2.65 ns。脉冲宽度减少的原因主要来自增益饱和效应。这一点与方波脉冲输入时的方波扭曲类似,在接近增益饱和时,脉冲前沿获得的反转粒子数比脉冲后沿多,导致脉冲前沿和脉冲后沿获得的增益不一致,致使脉冲半峰全宽(FWHM)变窄。减少脉冲宽度变窄的方法可以在初始饱和位置就倒空脉冲,避免增益饱和效应的发生。但这样会损失一定能量,在参考文献[14]中,采用种子源附加后缀脉冲的办法也能很好地降低脉冲宽度的窄化效应。

实验中使用 Avantes 公司的光谱仪对输出光谱进行了测量(AvaSpec-3648),在波长 1053 nm 波段的测量精度为 0.08 nm,有效数字保留小数点后两位。图 3 为种子脉冲和再生脉冲光谱特性。从图 3(a)可以看出,种子源光谱半峰全宽为 0.34 nm,中心波长为 1052.92 nm,光谱曲线较为光滑,无多峰结构。图 3(b)为再生放大后的脉冲波形。与种子源光谱相比,中心波长为 1052.89 nm,光谱半峰全宽为 0.33 nm,再生放大后的中心波长和光谱宽度有些微弱的变化,光谱宽度和中心波长都变小了。这是由于种子源和再生放大器的增益模块工作在不同的温度下导致发射谱的峰值发生了微弱的偏离,当然也不排除存在测量的误差。

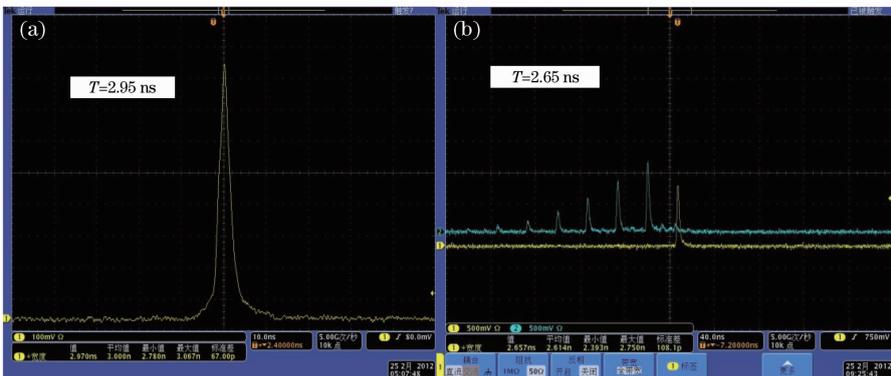


图 2 腔倒空种子脉冲(a)和再生放大器输出脉冲(b)的波形

Fig. 2 Pulse shape of (a) cavity-dumped seed and (b) regenerative amplifier

图 4 为腔倒空种子源和再生放大器的输出近场光斑。从图 4(a)可以看出,种子源的近场光斑中心圆度较好,但在 Y 轴方向呈微弱的椭圆状,无明显的旁斑,呈现基横模特性。图 4(b)为再生后的输出

光斑,光斑中心的圆度变差,这是由于种子源输出脉冲能量在放大的过程中遭到了干扰以及种子源能量太高引起了模式匹配恶化造成的。可以通过进一步减少种子源的能量来提高再生放大脉冲的光束质

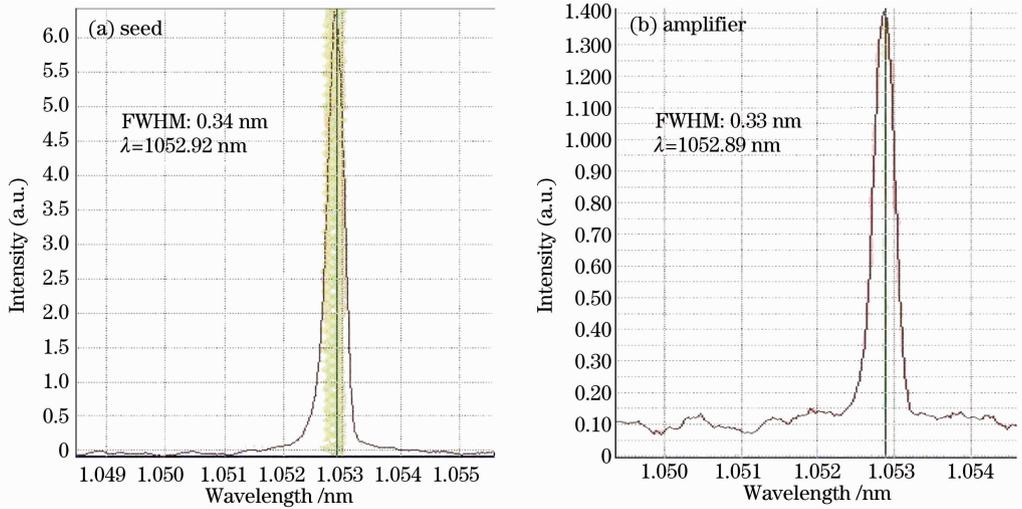


图 3 种子脉冲(a)和再生脉冲(b)的光谱特性

Fig. 3 Spectral characteristics of (a) seed pulse and (b) regeneration pulse

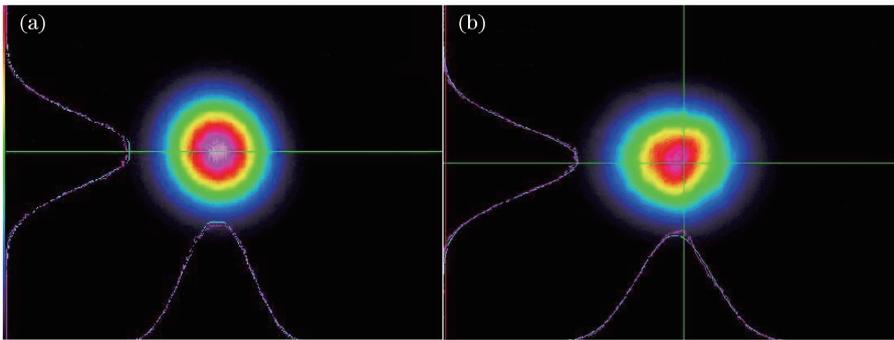


图 4 输出近场光斑。(a)种子脉冲;(b)再生脉冲

Fig. 4 Near-field spot. (a) Seed pulse; (b) regenerative pulse

量。此外,再生放大后的脉冲无旁斑,依然呈现基横模的特性,利用刀口法拟合得到再生放大器输出脉冲的光束质量因子  $M^2 = 1.5$ 。

#### 4.2 再生放大器能量稳定性

在重复频率 1 Hz、抽运电流 75 A、种子脉冲能量 200 pJ、腔内总往返时间为 540 ns(相当于 20 次腔内往返)时,使用相干公司能量计测得再生放大器的输出能量为 21 mJ 左右,测试 8000 发脉冲(2 h 左右)的稳定性均方根(RMS)值为 2%左右,如图 5 所示。稳定性较差的原因除了种子源的稳定性影响外,主要与再生放大器的单程净增益有关,单程净增益越高,脉冲输出能量稳定性越好,稳定性与最大输出能量密度成正比。考虑到器件的破坏阈值,只有牺牲脉冲能量的稳定性,在较低的增益下获取最高的能量输出,2% RMS 值的脉冲能量稳定性能满足实际工程需要。

继续增大抽运电流到 80 A,抽运脉冲宽度变为 350  $\mu$ s,再生放大器的脉冲稳定性提高到 1%左右,输出总能量达到 40 mJ,但是稳定输出脉冲的持

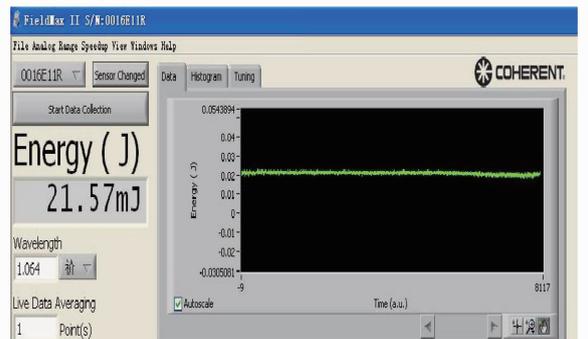


图 5 再生放大器输出脉冲的能量稳定性

续时间非常短,不足 1 h,此时,在钼玻璃中观察到小尺度自聚焦破坏特性,如图 6 所示。小尺度自聚焦特性是指峰值功率密度接近  $\text{GW}/\text{cm}^2$  量级时,由于增益介质的非线性折射率引起的部分光束的聚焦特性,它使激光束分成若干光丝,破坏激光元件,是限制激光器功率提高的主要因素<sup>[17,18]</sup>。图 6(a)为 CCD 相机下观察到的小尺度自聚焦现象,玻璃棒的表面出现很多随机分布且直径很小的坏点。图 6(b)为金像显

显微镜下观察到的局部坏点,测得坏点的直径在 0.01~0.10 mm 之间。实验中还发现增加抽运电流和抽运脉冲宽度,坏点出现的密度和尺寸会急剧增加。因此,为了获得稳定的脉冲输出,对输出能量和抽运脉

宽要进行合理控制,选择合适的单程增益,控制总输出能量的同时,使增益介质中的热累积降到合适的水平,从而可以避免小尺度自聚焦破坏现象的产生,提高激光器的长期稳定性。

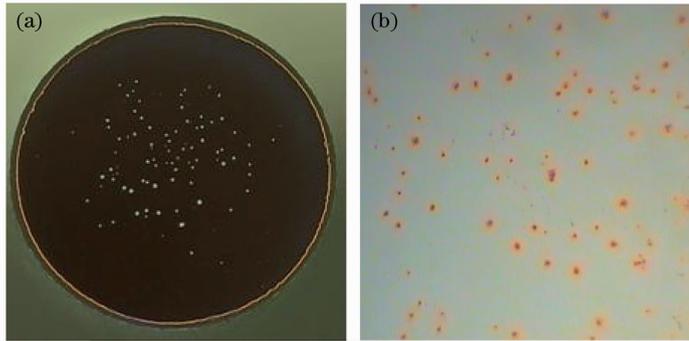


图 6 再生放大器中的小尺度自聚焦现象。(a)CCD 相机;(b)金像显微镜

Fig. 6 Small-scale self-focusing phenomenon in the regenerative amplifier. (a) CCD; (b) metallurgical microscope

### 4.3 再生放大器的能量提取

图 7 为不同抽运电流下,再生放大器输出的能量、腔倒空 Q 方式输出能量以及再生放大理论计算结果之间的对比。图中实线代表再生放大器的输出能量,虚线代表腔倒空 Q 方式输出能量,点线代表理论计算的结果。从图中可以看出,随着抽运电流由 60 A 增加到 75 A,再生放大器输出能量略小于腔倒空 Q 方式输出的能量,但是,继续增加电流到 80 A 时,由于抽运产生的高增益,使得腔内放大的往返次数减少,累积的热量增加,会导致光束质量的恶化,再生腔内模式匹配变差,在增益介质处会提取腔模以外的能量,因而,在图中会出现再生脉冲输出能量超过腔倒空方式输出能量的情况,实际工作中需要避免这种情况发生。此外还对比发现,在 75 A 抽运电流以下,再生放大器实验结果略小于理论计算,这是可以理解的,因为理论计算假定光束

质量没有恶化,腔倒空方式的输出能量略小于计算值是由小信号增益测量上存在的误差所致,整个图形基本呈现指数增长的规律,说明能量还有提升的空间。在抽运电流 75 A、抽运宽度 250  $\mu$ s、抽运能量 400 mJ 时,测到的小信号增益为 1.65,获得再生放大器光-光转换效率为 5%,腔倒空 Q 方式光-光转换效率为 5.5%左右,基本实现了有效储能的充分提取。

## 5 结 论

采用高峰值功率、低占空比的抽运方式控制单程增益,并对再生腔采用平凹长腔的大模场设计方案,有效避免了小尺度自聚焦效应的出现和再生腔内电光晶体的破坏。在重复频率 1 Hz、脉冲宽度 2.65 ns 和输出波长 1052.92 nm 的条件下,获得总增益大于  $10^8$ ,最大输出能量 21 mJ,光-光转换效率 5%,光束质量  $M^2=1.5$ ,脉冲稳定性 RMS 值为 2% (连续工作 2 h),所得能量提取效率与理论值符合较好。继续增加运行时间,由于种子源的稳定性缓慢下降,导致再生放大器的稳定性也出现缓慢下降,种子源稳定性下降的原因是由于种子源腔倒空内部较高的能量,造成了 KD\*P 晶体表面膜层的缓慢破坏所致,通过更换光纤种子源或者高破坏阈值的 KD\*P 晶体,长期稳定性问题能够得到有效解决。

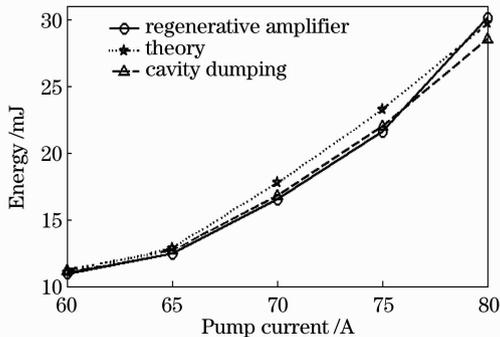


图 7 再生放大器输出能量、腔倒空 Q 输出能量以及再生放大理论值之间的关系

Fig. 7 Relationship between the regenerative amplifier output energy, cavity-dumped Q-switched output energy and theoretical value of regenerative amplifier

## 参 考 文 献

1 Zhao Junpu, Hu Dongxia, Dai Wanjun *et al.*. Wavefront characters of high power solid-state lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 152~156  
 赵军普, 胡东霞, 代万俊等. 高功率固体激光系统光束波前畸变特性分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(s1): 152~156

- 2 Chen Huiyu, He Dongbing, Hu Lili *et al.*. Surface strengthening treatment of phosphate laser glass with base and acid solutions [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2035~2040  
陈辉宇, 何冬兵, 胡丽丽 等. 磷酸盐激光玻璃的表面酸碱处理增强[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2035~2040
- 3 Wen Lei, Yang Jingxin, Liu Renhong *et al.*. Small signal gain coefficients in Nd<sup>3+</sup> doped phosphate glass [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302009  
温 磊, 杨镜新, 刘仁红 等. 掺钕磷酸盐玻璃的小信号增益性能[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302009
- 4 Deng Qinghua, Ding Lei, He Shaobo *et al.*. Evaluating specifications on coupled pump distribution in LDA side-pumped rod gain medium [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1176~1181  
邓青华, 丁 磊, 贺少勃 等. 激光二极管阵列侧面抽运棒状增益介质抽运储能分布的评价方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1176~1181
- 5 Jiang Zhonghong. ICF laser glasses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1165~1176  
姜中宏. 用于激光核聚变的玻璃[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1165~1176
- 6 R. Solarz, R. Beach, C. Bibeau *et al.*. Current research directions and topics in the laser directorate at Lawrence Livermore National Laboratory[J]. *Laser Physics*, 1997, **7**(1): 234~238
- 7 L. Yan, Jun Daling, P. T. Ho *et al.*. An actively mode-locked continuous wave Nd : phosphate glass laser oscillator and regenerative amplifier[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(2): 418~426
- 8 B. Santaun, L. B. Robert. Short pulse injection seeding of Q-switched Nd : glass laser oscillators-theory and experiment[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(1): 149~157
- 9 E. I. Moses, R. N. Boyd, B. A. Remington *et al.*. The National Ignition Facility: ushering in a new age for high energy density science[J]. *Physics of Plasmas*, 2009, **16**(4): 041006
- 10 D. Paramita, C. G. Kailash, K. F. Jayant. Nd : glass regenerative amplifier with increased bandwidth and high output energy for chirped pulse amplification systems[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(10): 1698~1706
- 11 V. Bagnoud, J. Luce, L. Videau *et al.*. Diode-pumped regenerative amplifier delivering 100-mJ single-mode laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(6): 337~339
- 12 X. Ribeyre, L. Videau, A. Migus *et al.*. Nd : glass diode-pumped regenerative amplifier, multi-millijoule short-pulse chirped-pulse amplifier laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(15): 1374~1376
- 13 Wang Xiaodong, Zhang Shukui, Guo Liangfu *et al.*. High-gain neodymium-doped phosphate glass regenerative amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(3): 340~342  
王晓东, 张树葵, 郭良福 等. 高增益磷酸盐玻璃再生放大器[J]. *强激光与粒子束*, 1998, **10**(3): 340~342
- 14 Wang Jiangfeng. Research on Highly Stable Nd : Glass Regenerative Amplifier [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 64~101  
王江峰. 高稳定钕玻璃再生放大技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2008. 64~101
- 15 L. M. Frantz, J. S. Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**(8): 2346~2348
- 16 W. H. Lowdermilk, J. E. Murray. The multipass amplifier: theory and numerical analysis [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(5): 2436~2444
- 17 Lin Xiaodong, Wang Xiao, Li Dayi *et al.*. Analysis of small-scale self-focusing effects in nonlinear media with gain[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 418~420  
林晓东, 王 道, 李大义 等. 非线性增益介质中的小尺度自聚焦特性分析[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5): 418~420
- 18 Jing Feng, Zhang Xiaomin, Zhu Qihua *et al.*. Study on characteristics of intense beam propagation in Nd<sup>3+</sup> doped glass media[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(5): 551~555  
景 峰, 张小民, 朱启华 等. 钕玻璃介质中强激光束传输特性的初步研究[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(5): 551~555

栏目编辑: 宋梅梅