

# 1.3 $\mu\text{m}$ 高脉冲能量锁模皮秒再生放大器

王璐璐<sup>1</sup> 牛岗<sup>1</sup> 石朝辉<sup>1</sup> 闫莹<sup>2</sup> 麻云凤<sup>2</sup> 黄玉涛<sup>2</sup> 樊仲维<sup>1,2</sup>

Mikhail Grishin<sup>3</sup> Donatas Joksas<sup>3</sup> Zenonas Kuprionis<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100192  
<sup>2</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100080  
<sup>3</sup>EKSPLA, 维尔纽斯, 立陶宛

**摘要** 报道了激光二极管抽运工作波长为 1.3  $\mu\text{m}$  的高能量皮秒再生放大器, 种子源为重复频率 65 MHz、平均输出功率 140 mW 的被动锁模皮秒激光振荡器。通过优化再生放大器, 获得了重复频率为 1 kHz、脉宽小于 20 ps、单脉冲能量大于 1 mJ 的高脉冲能量皮秒脉冲激光, 脉冲能量稳定性均方根值小于 0.3%, 其倍频光束 671 nm 的质量因子  $M^2$  小于等于 1.1, 这表明再生放大器输出激光具有很好的光束质量。

**关键词** 激光器; 激光技术; 再生放大; 皮秒脉冲

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.1102007

## 1.3 $\mu\text{m}$ Picosecond Regenerative Amplifier with High Pulse Energy

Wang Lulu<sup>1</sup> Niu Gang<sup>1</sup> Shi Zhaohui<sup>1</sup> Yan Ying<sup>2</sup> Ma Yunfeng<sup>2</sup> Huang Yutao<sup>2</sup>

Fan Zhongwei<sup>1,2</sup> Mikhail Grishin<sup>3</sup> Donatas Joksas<sup>3</sup> Zenonas Kuprionis<sup>3</sup>

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

**Abstract** A laser diode pumped 1.3  $\mu\text{m}$  high energy picosecond regenerative amplifier is reported. The passively mode-locked oscillator as a seed source provides repetition rate of 65 MHz and power of 140 mW. An effective regenerative amplifier is designed. The regenerative amplifier is operated at 1 kHz and its pulse duration is shorter than 20 ps. Its output pulse energy is 1 mJ. Its pulse stability root mean square is less than 0.3%. The beam quality factor  $M^2$  is less than or equal to 1.1 after second harmonic generation to 671 nm, which shows its good beam profile.

**Key words** lasers; laser technique; regenerative amplifier; picosecond pulse

**OCIS codes** 140.3280; 140.4050; 320.7090; 320.7160; 140.3070

## 1 引言

1.3  $\mu\text{m}$  附近是非常重要的激光波段, 可应用在光传感与定位、材料加工及医疗卫生等领域, 1.3  $\mu\text{m}$  超短脉冲光源被广泛应用于光纤通讯领域<sup>[1]</sup>。除此之外, 1.3  $\mu\text{m}$  激光还可以作为掺铬(Cr)晶体可调谐固体激光介质的抽运源, 实现可调谐的飞秒脉冲激光输出。1.3  $\mu\text{m}$  激光结合腔外倍频(SHG)技术, 可获得高功率红光输出, 在激光彩色显示方面应用广泛。

全固态皮秒激光器设计复杂, 目前的研究与生产主要集中在常见的 1.06  $\mu\text{m}$  波段。1.06  $\mu\text{m}$  波段对应于掺钕( $\text{Nd}^{3+}$ )激光介质的能级跃迁( $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ ), 受激发射截面大, 增益高, 易于实现大功率激光振荡和锁模皮秒脉冲<sup>[2,3]</sup>。但对增益较低的能级跃迁( $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ ), 即 1.3  $\mu\text{m}$  波段的皮秒激光器研究较少。目前, 1.3  $\mu\text{m}$  波段国内外尚无毫焦级大能量、重复频率千赫兹的皮秒脉冲激光器产品报道。仅有文献报道 Keller 等<sup>[4]</sup> 和 Huang 等<sup>[5]</sup>

收稿日期: 2012-08-10; 收到修改稿日期: 2012-07-17

基金项目: 科技部国际科技合作项目(2010DFR50650)资助课题。

作者简介: 王璐璐(1984—), 女, 硕士, 主要从事全固态皮秒激光器及其相关技术的研究。

E-mail: tiffanywang1984@163.com。

从事过该波段连续锁模皮秒激光研究。本文对激光二极管(LD)抽运  $1.3 \mu\text{m}$  的锁模皮秒再生放大器(RA)进行了实验研究,获得重复频率  $1 \text{ kHz}$ 、脉宽小于  $20 \text{ ps}$ 、单脉冲能量大于  $1 \text{ mJ}$ 、倍频后光束质量因子  $M^2$  小于等于  $1.1$  的皮秒脉冲激光输出。

## 2 再生放大器实验装置及光学设计

实验装置如图 1 所示。LD 抽运源波长为  $808 \text{ nm}$ ,通过数值孔径为  $0.22$  的光纤耦合输出,光纤芯径为  $600 \mu\text{m}$ ,抽运模块使用 JOLD-120-QPXF-2P( $120 \text{ W}$ , Jenoptik AG),抽运光采用  $1:2$  的放大聚焦系统,聚焦到晶体上的光斑尺寸直径为  $1.2 \text{ mm}$ 。LD 采用脉冲方式抽运,电流为  $67 \text{ A}$  时输出功率为  $92 \text{ W}$ ,重复频率为  $1 \text{ kHz}$ ,脉冲持续时间为  $90 \mu\text{s}$ ,即单脉冲注入能量  $8 \text{ mJ}$ 。增益晶体采用沿  $a$  轴切割、掺杂原子数分数为  $0.3\%$  的  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ ,其尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ,晶体一面镀  $808$ 、 $1342$ 、 $1064 \text{ nm}$  增透膜,另一面镀  $1342$ 、 $1064 \text{ nm}$  增透膜。增益晶体用铝箔包裹后固定在紫铜热沉中,并用水制冷。谐振腔腔镜 R1 和 R2 的曲率半径  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  分别为  $1200 \text{ mm}$  和  $1000 \text{ mm}$ ,内表面均镀  $1342 \text{ nm}$  高反膜,晶体到 R1 的距离  $L_1$  为  $510 \text{ mm}$ ,晶体到 R2 的距离  $L_2$  为  $1000 \text{ mm}$ ,晶体热焦距  $f$  的估计值为  $800 \text{ mm}$ 。M1、M2、AO1、AO2 均为  $1342 \text{ nm}$   $45^\circ$  折转镜;P 为偏振片; $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$  分别代表  $\lambda/2$  和  $\lambda/4$  波片;Faraday 为法拉第旋光器。

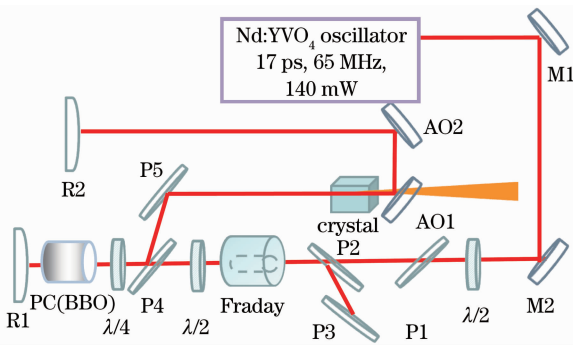


图 1 再生放大器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of RA

电光 Q 开关采用一对尺寸为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的偏硼酸钡(BBO)晶体,沿  $z$  轴切割,端面均镀  $1342 \text{ nm}$  增透膜,这样可使工作电压降低一半,大幅减轻高频电光驱动源的工作压力。BBO 电光 Q 开关晶体上加载  $2.84 \text{ kV}$  的  $1/4$  波电压。高压驱动采用立陶宛 EKSPLA 公司生产的 PCD-UHV 型驱动,重复频率为  $1 \text{ kHz}$ ,高压上升、下降时间均在  $3 \text{ ns}$

以内。PCD-UHV 驱动由 2 个晶体管逻辑电路(TTL)信号控制。一个信号负责启动 PC 高压,另一个负责关闭 PC 高压。同步板采用立陶宛 EKSPLA 公司生产的 SY3000 型产品,SY3000 可输出 4 个 TTL 信号,其中两个用来控制 PCD-UHV 高压驱动,精度为  $0.1 \text{ ns}$ ,另外两个用来与皮秒激光振荡器的光电探头互锁。皮秒激光振荡器由北京国科世纪激光技术有限公司研制,波长为  $1342 \text{ nm}$ ,平均功率为  $140 \text{ mW}$ ,脉冲宽度为  $17 \text{ ps}$ ,重复频率为  $65 \text{ MHz}$ 。

种子光脉冲为 s 偏振,第一个  $\lambda/2$  波片将 s 偏振变为 p 偏振,P1 进一步提纯种子光的偏振态,P1 与 P2 形成倒“八”字设计,不改变光路传输,方便调节及更换器件。法拉第旋光器是材料为铽镓石榴石(TGG)晶体的  $45^\circ$  法拉第旋光器。第二个  $\lambda/2$  波片与法拉第旋光器配合调节,使得 P2、P3 输出最大功率的再生放大脉冲,并且有效阻止放大光对种子光的反馈,保护种子源<sup>[6]</sup>。

种子脉冲继续经过 P5、P4 进入再生腔。电光 Q 开关未加电压时,泡克耳斯盒(PC)不产生任何作用,种子脉冲两次通过  $\lambda/4$  波片和 PC, $\lambda/4$  波片将光的偏振态旋转  $90^\circ$ ,脉冲在腔内往返一圈后偏振态再次旋转  $90^\circ$  输出腔外。在这个过程中种子光脉冲两次通过增益介质,但并不能积累足够高的反转粒子数。电光晶体加上  $1/4$  波电压后,被选出的种子脉冲两次经过 PC, $\lambda/4$  波片不再改变种子偏振态,种子脉冲在再生放大腔中多次通过增益介质,实现高增益放大。随着放大次数的增加,脉冲能量越来越大,反转粒子数越来越少,增益逐渐变低,当增益达到饱和时脉冲从腔内输出<sup>[7]</sup>。种子光振荡的最佳程数取决于再生腔的系统参数。PC 上所加高压启动和关闭的响应时间应该越短越好,典型值为几纳秒,这样种子光中的下一个脉冲才不会被再生腔捕获,即种子光中的其他脉冲不允许通过增益介质,所以 PC 工作类似于脉冲选择器。当腔内能量积累达到最大,加在 PC 上的电压关闭,形成 p 偏振光的皮秒巨脉冲,再经过第二个  $\lambda/2$  波片与法拉第旋光器,由 P2、P3 反射输出。

图 2 是利用矩阵光学计算模拟所得再生腔内激光晶体上的光斑尺寸,可以看到在热透镜焦距为  $800 \text{ mm}$  左右,腔模直径大概是  $1 \text{ mm}$ ,抽运光斑直径为  $1.2 \text{ mm}$ ,这满足模式匹配条件,从而保证高光束质量的单横模激光输出。同时通过计算可得 BBO 晶体处的光斑直径约为  $1.2 \text{ mm}$ ,对应的功率密度大约为  $7.5 \text{ GW/cm}^2$ ,小于 BBO 的损伤阈值,可见

该腔型设计有效避免了电光晶体易损伤的问题，图 3 是再生放大器内的模式分布。

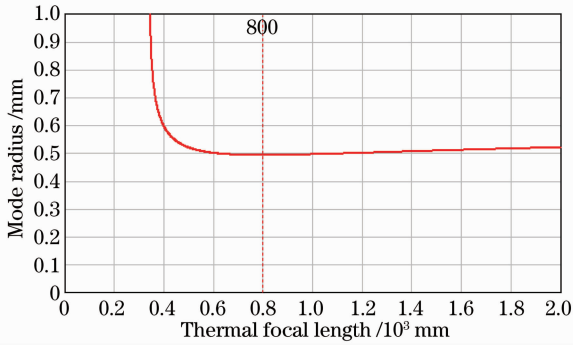


图 2 再生放大器内激光晶体上的腔模半径

Fig. 2 Mode radius at laser crystal in RA resonator

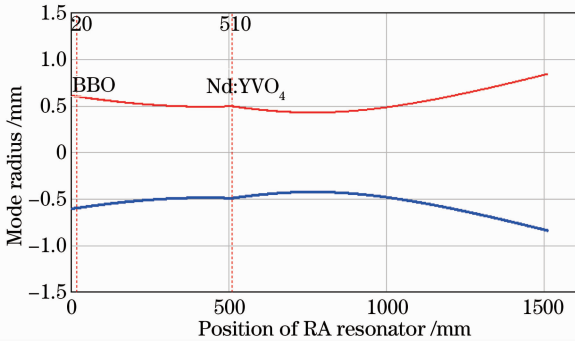


图 3 再生放大器内腔模半径分布

Fig. 3 Distribution of mode radius in RA resonator

### 3 实验结果与分析

图 4 为再生腔连续运转时输出功率曲线，连续 (CW) 运转时 PC 不接高压，只引入一定插入损耗。实验表明，单脉冲注入 8.2 mJ 时，输出 1.5 mJ 单脉冲能量，光-光转换效率为 18% 左右。

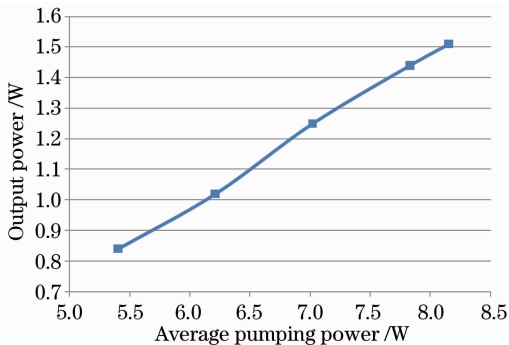


图 4 连续运转时输出功率曲线

Fig. 4 Curve of output power versus the average pumping power in CW operation

图 5 为再生腔调 Q 运转下输出功率曲线。调 Q 运转时 PC 接 2.84 kV 的 1/4 波高压。实验表明单脉冲注入 8.2 mJ 时，输出 1.15 mJ 单脉冲能量。

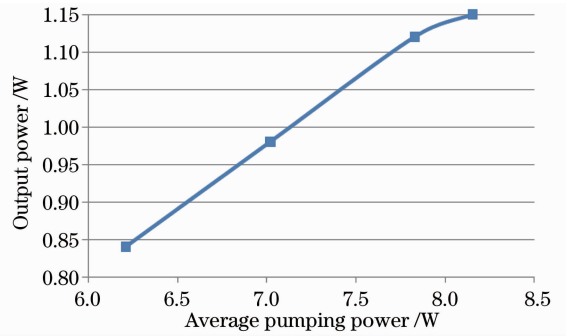


图 5 调 Q 动转时输出功率曲线

Fig. 5 Curve of output power versus the average pumping power in Q-switched operation

图 6 为种子光脉冲进入再生腔后放大光脉冲能量曲线。进入再生腔放大的种子光脉冲重复频率为 65 MHz，平均功率为 30 mW。当其他条件不变时，增加抽运光功率可以使再生放大器输出能量增加。当抽运能量增加到一定程度后，再生放大的脉冲将趋于饱和，因此抽运能量有一个最佳值，仔细调节谐振腔，使再生放大器工作在一个最佳值<sup>[8]</sup>。图 7 为再生放大光脉冲能量与脉冲振荡次数的关系，可见

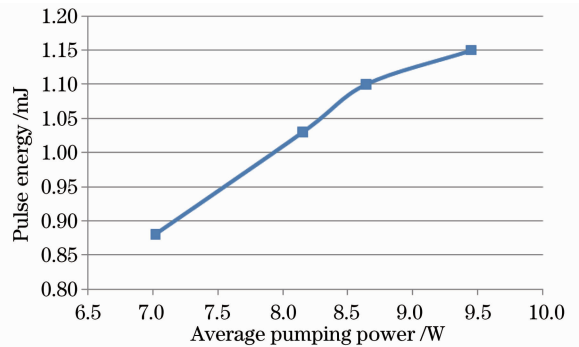


图 6 再生腔单脉冲能量曲线

Fig. 6 Curve of output pulse energy versus the average pumping power in RA operation

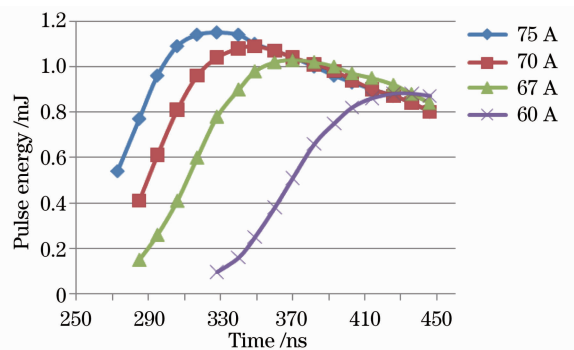


图 7 不同工作电流下再生腔内单脉冲能量与放大时间关系曲线

Fig. 7 Output pulse energy dependence on amplification time in RA with different laser diode currents

放大光脉冲的能量随放大次数的增加而增加。随着腔内脉冲能量密度的增加,增益系数不断降低,当增益系数等于腔内损耗时,脉冲能量不再增加,此时将光脉冲倒空输出为最佳。

该再生腔长约等于 1.5 m,往返总光程为 3 m,在腔内往返一次的时间为 10 ns,实验结果表明,种

子脉冲在腔内往返 35 次(放大时间约为 350 ns)后获得最大输出能量,输出能量为 1 mJ。图 8 为再生腔内种子光成长放大过程波形图。图 9 为单个再生放大脉冲的波形图,再生放大波形主从脉冲比优于 200:1。当没有种子光注入时,再生放大器没有自发辐射。

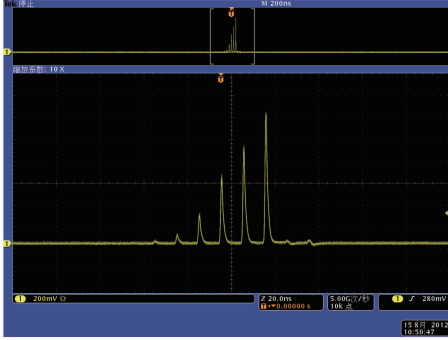


图 8 再生腔内种子光放大过程波形图  
Fig. 8 Temporal traces of the seed pulse when it is amplified in RA

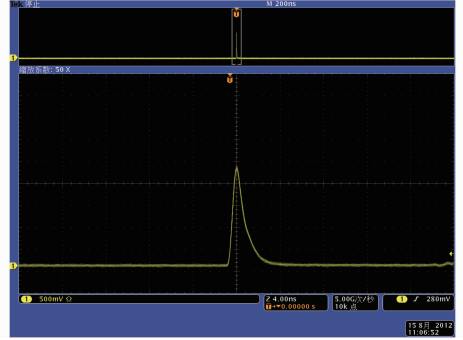


图 9 单个再生放大脉冲波形图  
Fig. 9 Temporal traces of the single pulse

对于再生腔输出激光光束质量的测量,由于没有 1.3  $\mu\text{m}$  波段响应的 CCD,将激光倍频至 671 nm 后进行测量。图 10 为再生放大器倍频后输出激光

光束质量测量结果。输出单脉冲能量为 1 mJ 时,激光在两个方向上的光束质量因子分别为 1.04 和 1.06。图 11 为再生放大器倍频后光斑测量结果,从

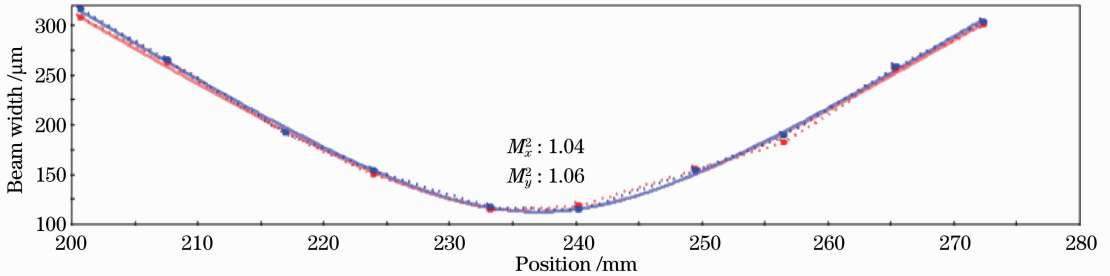


图 10 倍频后再生放大器输出激光光束质量  
Fig. 10 Beam quality  $M^2$  of laser pulse in RA after SHG

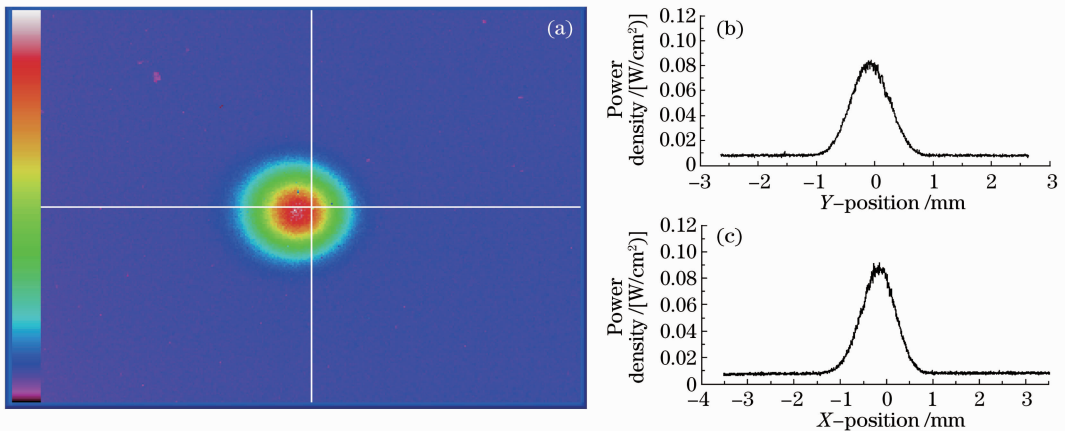


图 11 倍频后再生放大器输出激光光斑。(a)二维光斑分布;(b)垂直方向光斑分布;(c)水平方向光斑分布  
Fig. 11 Spot size of laser pulse in RA after SHG. (a) Two-dimension profile; (b) vertical line profile; (c) horizontal line profile

图中可以看出光斑为高斯分布,分布较为均匀,结合光束质量结果,可认为是基模输出。图 12 为再生放大器自相关曲线,测得脉冲宽度为 19.76 ps。图 13 为测得的种子光脉冲与再生放大器输出激光脉冲光谱曲线,由于克尔效应,再生放大器输出激光脉冲的光谱出现凹陷现象。

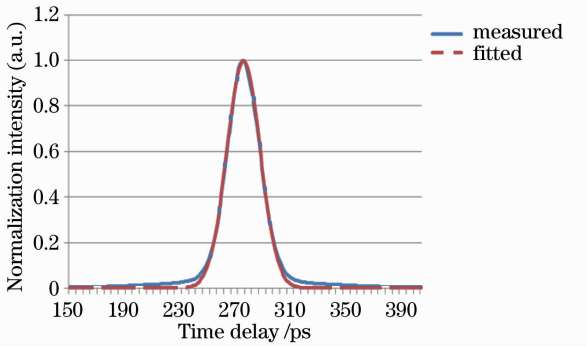


图 12 再生放大器输出激光脉冲自相关曲线

Fig. 12 Autocorrelation of laser pulse in RA

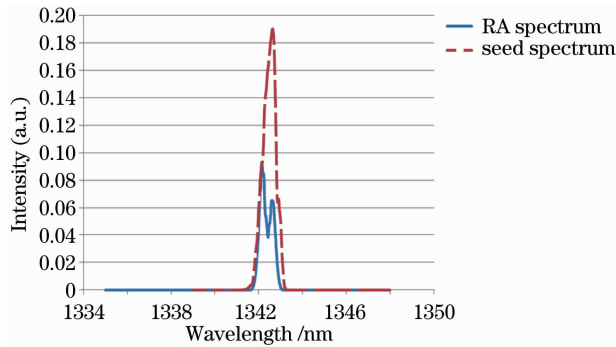


图 13 种子光脉冲及再生放大器输出激光脉冲光谱曲线

Fig. 13 Spectra of seed pulse and laser pulse in RA

## 5 结 论

实验研究了 LD 抽运 1.3  $\mu\text{m}$  的锁模皮秒再生

放大器,获得重复频率为 1 kHz、脉宽小于 20 ps、单脉冲能量大于 1 mJ、光束质量因子  $M^2 \leq 1.1$  的锁模皮秒脉冲激光。在此基础上采用双端抽运,或者插入标准具展宽脉宽后增大抽运功率,可获得更大单脉冲能量输出。

## 参 考 文 献

- 1 R. Fluck, B. Braun, E. Gini *et al.*. Passively Q-switched 1.34  $\mu\text{m}$  Nd:YVO<sub>4</sub> microchip laser with semiconductor saturable-absorber mirrors[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 991~993
- 2 R. Fluck, G. Zhang, U. Keller *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked 1.3  $\mu\text{m}$  Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YLF lasers by use of semiconductor saturable absorbers [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1378~1380
- 3 R. D. Peterson, H. P. Jenssen, A. Cassanho. Investigation of the spectroscopic properties of Nd:YVO<sub>4</sub> [C]. *Advanced Solid State Lasers*, 2002, **68**: TuB17
- 4 G. J. Spühler, L. Krainer, V. Liverini *et al.*. Passively mode-locked 1.3  $\mu\text{m}$  multi-GHz Nd:YVO<sub>4</sub> lasers with low timing jitter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(6): 1319~1321
- 5 S. C. Huang, H. L. Cheng, Y. F. Chen *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked 1342 nm Nd:YVO<sub>4</sub> laser with an AlGaInAs quantum-well saturable absorber[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(15): 2348~2350
- 6 Ma Yunfeng, Fan Zhongwei, Niu Gang *et al.*. 2.5 W picosecond pulse regenerative amplifier with 100 kHz repetition rate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2825~2828  
麻云凤, 樊仲维, 牛岗等. 重复频率 100 kHz, 平均功率 2.5 W 的皮秒脉冲再生放大器 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2825~2828
- 7 Yan Ying, Fan Zhongwei, Niu Gang *et al.*. Laser diode end-pumped kilohertz Nd:YVO<sub>4</sub> picosecond regenerative amplifier [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(2): 021402  
闫莹, 樊仲维, 牛岗等. 激光二极管千赫兹级 Nd:YVO<sub>4</sub> 皮秒脉冲激光再生放大器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(2): 021402
- 8 Fu Jie, Pang Qingsheng, Chang Liang *et al.*. Research on cavity-dumping mode-locked laser of picosecond at 10 kHz [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0314002  
付洁, 庞庆生, 常亮等. 10 kHz 腔倒空锁模皮秒激光器研究 [J]. *光学学报*, **31**(3): 0314002

栏目编辑: 宋梅梅