

文章编号: 0258-7025(2010)11-2825-04

# 重复频率 100 kHz, 平均功率 2.5 W 的皮秒脉冲再生放大器

麻云凤<sup>1,2,3</sup> 樊仲维<sup>1,3</sup> 牛 岗<sup>3</sup> 邱基斯<sup>1,2,3</sup> 赵天卓<sup>1,3</sup> 连富强<sup>1,2,3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电研究院, 北京 100094; <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 100190)

**摘要** 报道了采用 RTP 晶体作为电光晶体、激光二极管(LD)端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的锁模皮秒脉冲再生放大器。利用 ABCD 矩阵优化激光腔几何参数, 实现最佳皮秒种子模式与再生模式匹配。在抽运功率 7.5 W 时, 获得了脉宽为 12 ps, 峰值功率为  $2.08 \times 10^6$  W, 重复频率为 100 kHz 的锁模皮秒激光。光-光转换效率达 33.3%, 能量增益  $7.67 \times 10^3$  倍。TEM<sub>00</sub> 模输出, 光束质量因子  $M^2 \leq 1.2$ , 长期稳定性均方根值小于 3%。

**关键词** 激光器; 再生放大器; 皮秒脉冲; 激光二极管抽运

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2825

## 2.5 W Picosecond Pulse Regenerative Amplifier with 100 kHz Repetition Rate

Ma Yunfeng<sup>1,2,3</sup> Fan Zhongwei<sup>1,3</sup> Niu Gang<sup>3</sup> Qiu Jisi<sup>1,2,3</sup>  
Zhao Tianzhuo<sup>1,3</sup> Lian Fuqiang<sup>1,2,3</sup>

(<sup>1</sup> Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)  
(<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)  
(<sup>3</sup> Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100190, China)

**Abstract** The use of RTP crystals as electro-optical crystals, laser diode (LD) end-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal pulse mode-locked picosecond regenerative amplifier is reported. Geometric parameters of the laser cavity are optimized to achieve the best mode matching between picosecond seed and regenerative amplifier by ABCD matrix. Laser pulses are provided at pump power 7.5 W with a pulse duration of 12 ps, a peak power of  $2.08 \times 10^6$  W, a repetition rate of 100 kHz, optical-optical conversion efficiency of 33.3%, energy gain of  $7.67 \times 10^3$  times. And TEM<sub>00</sub> mode is achieved with the beam quality factor  $M^2$  less than 1.2 and the long-term stability root mean square (RMS) is less than 3%.

**Key words** lasers; regenerative amplifier; picosecond pulse; laser diode pumping

## 1 引 言

高能量皮秒激光器以其高的峰值功率、窄的脉冲宽度, 在材料微加工领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。然而皮秒激光器平均功率与重复频率的固有矛盾限制了其在工业应用领域的发展。

近年来, 随着高压高重复频率电光驱动电源技术的突破及新的电光晶体的开发, 使皮秒脉冲重复频率高达上百千赫兹。例如 RTP 电光晶体, 具有大的电光系数、低的介电常数、高的损伤阈值、小的插入损耗及不潮解等优点, 可以作为重复频率百千赫

收稿日期: 2010-01-22; 收到修改稿日期: 2010-03-28

基金项目: 国家 863 计划(2008AA031901)和国家自然科学基金(60927010)资助课题。

作者简介: 麻云凤(1981—), 女, 博士研究生, 主要从事全固态皮秒激光器及大型复杂全固态激光器等方面的研究。

E-mail: yunfeng39@163.com

导师简介: 樊仲维(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事全固态皮秒激光器及大型复杂全固态激光器等方面的研究。E-mail: fanzw002@163.com(通信联系人)

兹再生放大器的电光开关晶体<sup>[2]</sup>。同时,促进高稳定度、高峰值功率、超短同步激光脉冲的再生放大器的发展,也促进了皮秒再生放大器的研究<sup>[3~7]</sup>。

由于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 具有高的热导率, *c* 轴: 11.4 W/(m·K), *a* 轴: 10.1 W/(m·K), 大的增益带宽 (330 GHz), 适合于超短脉冲激光再生放大器, 且吸收截面是 Nd:YVO<sub>4</sub> 的 1.9 倍, Nd:YAG 的 7.4 倍<sup>[8]</sup>。本文对以 RTP 晶体作为电光晶体, 激光二极管(LD)端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的皮秒再生放大器展开研究。并通过 ABCD 矩阵优化腔形模式匹配设计, 获得了稳定的皮秒脉冲输出。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。抽运源发射波长 808 nm, 通过光纤耦合输出, 数值孔径 0.22, 最大输出平均功率为 7.5 W, 光斑经聚焦透镜组聚焦到晶体上的光斑尺寸为 150 μm。Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm, Nd 离子掺杂原子数分数

约为 0.4%, 一面镀 808 nm 增透膜, 1064 nm 高反膜, 另一面镀 1064 nm 增透膜。为减少晶体的热透镜效应, 晶体用铝箔包裹放在紫铜块里, 并用半导体制冷器(TEC)制冷。腔镜 M<sub>1</sub> 为曲率半径 R=500 mm 的平凹镜, M<sub>2</sub>, M<sub>4</sub> 为 0° 反射镜, M<sub>3</sub> 为 45° 反射镜, 且内表面均镀 1064 nm 高反膜; 电光晶体采用一对 4 mm×4 mm×10 mm 的 RTP 晶体, 且端面均镀 1064 nm 增透膜, 其底面与光学平台水平面成 45° 放置, 且两块晶体加电方向正交, 此方法可以补偿晶体自然双折射, 并且降低一半高压, 减轻高频电光驱动电源的高压压力。且系统电光晶体加载四分之一波电压为 625 V; P 为偏振片; λ/2, λ/4 分别为二分之一和四分之一波片; FR 为法拉第磁光隔离器; PBS 为偏振分光棱镜; seed laser 为北京国科世纪激光技术有限公司研制的皮秒脉冲种子振荡源, 皮秒种子注入平均功率为 300 mW, 脉冲宽度为 12 ps, 重复频率为 92 MHz。

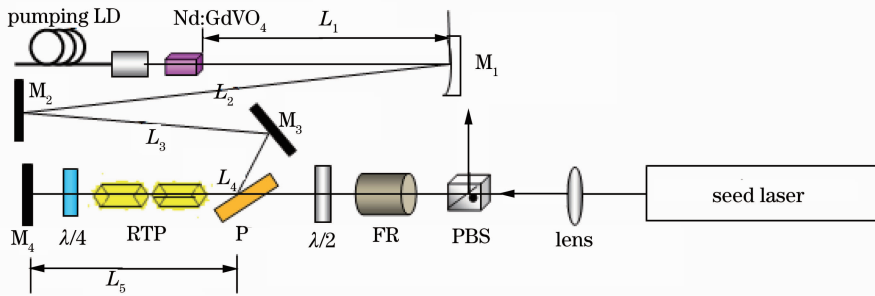


图 1 Nd:GdVO<sub>4</sub>/RTP 再生皮秒放大器

Fig. 1 Nd:GdVO<sub>4</sub>/RTP picosecond regenerative amplifier

## 3 模式匹配优化

图 1 的等效谐振腔如图 2 所示。

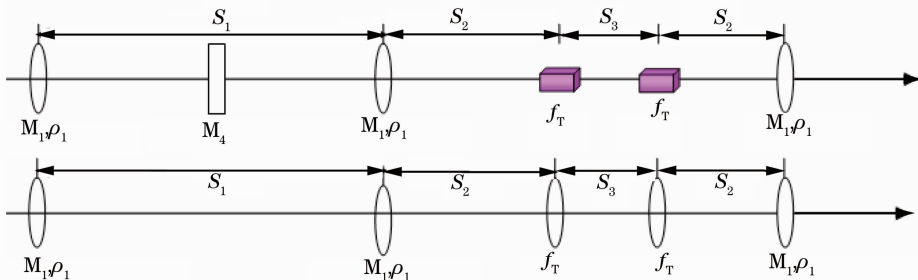


图 2 等效谐振腔

Fig. 2 Equivalent resonant cavity

以 M<sub>1</sub> 为参考面, 根据模式自再现原理, 由 ABCD 矩阵计算再生腔模参数

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & S_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & S_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/\rho_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & S_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/\rho_1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $S_1 = 2(L_2 + L_3 + L_4 + L_5 - l_{\text{RTP}} + l_{\text{RTP}}/n_{\text{RTP}})$ ,  $S_2 = L_1 + l/(2n)$ ,  $S_3 = l/n$ ,  $L_1 = 250$  mm,  $L_2 = 350$  mm,  $L_3 = 150$  mm,  $L_4 = 100$  mm,  $L_5 = 150$  mm; 一对 RTP 晶体长度  $l_{\text{RTP}} = 20$  mm 及折射率  $n_{\text{RTP}} = 1.9$ ; Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体长度  $l = 5$  mm, 计算求得热焦距  $f_T = 27.2$  mm, 此时 Nd 离子掺杂原子数分数为 0.4%, 及折射率  $n = 1.972$ ; M<sub>1</sub> 曲率半径  $\rho_1 = 500$  mm;  $\lambda = 1064$  nm。经计算,  $A = 33.4568$ ,  $B = -8535.1$ ,  $C = 0.1362$ ,  $D = -34.7191$ , 且  $|A + D| \leq 2$  为稳腔设计。再生腔内腰斑半径

$$\omega_i = \sqrt{\left| \frac{\lambda B \sqrt{[4 - (A + D)^2]}}{2\pi(1 - AD)} \right|} = 0.2564 \text{ mm},$$

腰斑到 M<sub>1</sub> 距离

$$l_{o1} = \frac{B(D - A)}{2(1 - AD)} = 250.2550 \text{ mm},$$

到偏振片光程 0.6497 m; 种子振荡器中腰斑半径  $\omega_0 = 0.2417$  mm, 腰斑到振荡器耦合输出镜距离 0.3491 m。

再根据高斯光束模式匹配公式

$$\text{物方焦距: } s_0 = f \pm \omega_0/\omega_i \sqrt{f^2 - f_0^2}, \quad (2)$$

$$\text{像方焦距: } s_i = f \pm \omega_i/\omega_0 \sqrt{f^2 - f_0^2}, \quad (3)$$

式中  $f_0 = \pi\omega_0\omega_i/\lambda$ , 选取模式匹配透镜焦距  $f = 600$  mm;  $\omega_0$  为物方腰斑, 即种子入射腰斑,  $\omega_i$  为像方腰斑, 即再生腔内腰斑。两个腰斑互为物像共轭, 即实现高斯光束模式匹配公式<sup>[9]</sup>。两个腰斑间距  $s = s_i + s_0$ , 求得  $s_0 = 1.1386$  m,  $s_i = 1.2062$  m, 从而求出模式匹配透镜到皮秒振荡器输出镜及皮秒再生放大器偏振输出镜各自距离分别为 0.7895 m, 0.5565 m, 实现最佳高斯光束模式匹配。

## 4 工作机制

整个光路过程为, 种子光为皮秒脉冲 s 偏振光, 经过模式匹配透镜垂直通过 PBS。模式匹配透镜的作用是使皮秒种子脉冲的输出模式与再生谐振腔的固有模式一致, 提高耦合效率, 增加系统稳定性。再由 FR 与二分之一波片共同作用, 变成 p 偏振光, p 偏振光通过偏振片 P, 透射注入再生放大腔进行放大。

电光开关未加电之前, 皮秒脉冲在再生放大腔中往返循环一圈两次注入 Nd:GdVO<sub>4</sub> 放大, 通过 PBS 反射输出; 电光晶体加电, 皮秒脉冲在再生放大腔中多次通过放大晶体 Nd:GdVO<sub>4</sub>, 能量增益放大; 电光晶体突然断电, 形成的皮秒巨脉冲 p 偏振光

从偏振片 P 输出, 再通过 FR 与二分之一波片, 经 PBS 反射输出。其中法拉第磁光隔离器的作用是防止再生放大器的强光反馈到皮秒脉冲种子振荡器部分, 以免影响种子振荡器的稳定性, 同时此光学设计巧妙地使 p 偏振光通过 PBS 反射输出。

## 5 实验结果与分析

皮秒种子脉冲光的波形如图 3 所示。开机自启动锁模时间小于 30 s, 锁模稳定, 脉冲稳定性均方根值(RMS)小于 1%, 且锁模波形整齐。

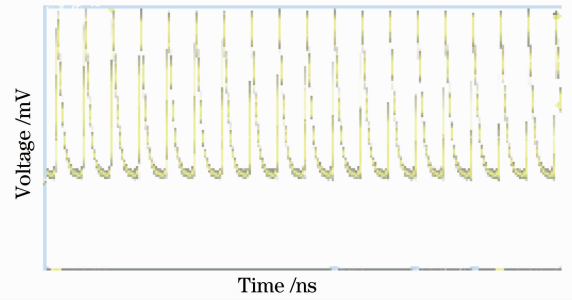


图 3 皮秒种子脉冲光波形

Fig. 3 Mode-locked picosecond laser pulse

再生腔内振荡脉冲波形及再生放大器选单脉冲波形如图 4 所示。其中曲线 4 为再生腔内振荡脉冲波形; 曲线 3 为再生放大器选单输出脉冲波形。

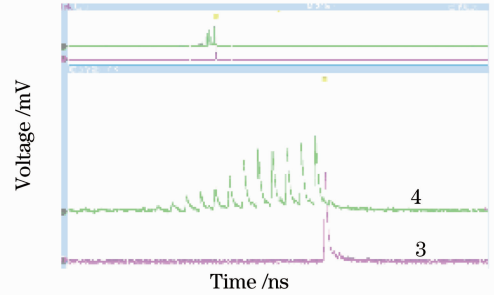


图 4 再生腔内振荡脉冲波形及再生放大器选单脉冲波形

Fig. 4 Regeneration cavity oscillation pulse and amplified output pulse

曲线 4 说明随着放大次数的增加, 脉冲能量越来越大, 而反转粒子数越来越少, 增益逐渐降低。当增益达到饱和时, 脉冲能量最大, 此时撤掉电光晶体上施加的 1/4 波电压, 于是激光脉冲又从 s 偏振变成 p 偏振, 透过 P 从再生腔倒出, 再生放大过程结束。调节电光开关驱动电源脉宽旋钮, 脉宽设置为 88 ns, 再生腔长为 1 m,  $1 \text{ m}/(3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 3.3 \text{ ns}$ ,  $88 \text{ ns}/(2 \times 3.3 \text{ ns}) \approx 13$ , 即图 4 中曲线 4 有 13 个尖峰脉冲。脉宽的选择取决于系统输出的频

率及腔长,这也决定了振荡脉冲尖峰的个数。曲线3为再生放大输出的单脉冲,对比度4200:1。对于百千赫兹重复频率皮秒激光系统,系统增益比较低,所以需要多次提取能量。

系统从频率92 MHz的皮秒脉冲中,选出100 kHz的皮秒脉冲进行放大,测得直流分量近似 $0.1\text{ mV} \times 1000 / 2100\text{ mV} = 4.8\%$ 。采用国科公司自制的电光开关驱动电源,其上升时间达1 ns,下降时间达1 ns。

并应用此皮秒再生放大器对太阳能电池导电薄膜TCO刻蚀,获得线宽 $40\text{ }\mu\text{m}$ ,无烧蚀现象,边缘无毛刺,平滑,刻划深度均匀,如图5所示。



图5 刻蚀太阳能电池导电薄膜TCO

Fig. 5 Etched solar cell conductive thin-film TCO

## 6 结 论

报道了同时利用RTP晶体作为电光晶体及Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体作为放大晶体的LD端面抽运皮秒再生放大器。系统通过高斯光束的模式匹配实现皮秒种子脉冲模式与再生腔模式的最佳匹配,最终实现了光-光转换效率达33.3%,平均功率为2.5 W,重复频率为100 kHz,脉冲宽度为12 ps的皮秒再生放大器。获得脉冲能量增益为 $7.67 \times 10^3$ 倍,单脉冲能量为25 μJ,峰值功率为2.08 MW,直流分量

为4.8%。系统实现模块化装校,使得空间光束质量和能量稳定性大大提高,保证了工作效率,并且此设备已应用于材料微加工领域。

## 参 考 文 献

- 1 J. Kleinbauer, R. Knappe, R. Wallenstein. A powerful diode-pumped laser source for micro-machining with ps pulses in the infrared, the visible and the ultraviolet[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**: 315~320
- 2 Liu Xiaofeng, Gao Yanwei, Huang Yongzong *et al.*. Q-switched characteristics of RTP crystals [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(1): 15~17  
刘晓峰, 高彦伟, 黄永宗等. RTP晶体的调Q特性研究[J]. *光学与光电技术*, 2008, **6**(1): 15~17
- 3 J. Kleinbauer, R. Knappe and R. Wallenstein. 13-W picosecond Nd:GdVO<sub>4</sub> regenerative amplifier with 200-kHz repetition rate [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**: 163~166
- 4 Detlef Nickel, Christian Stolzenburg, Adolf Giesen. Ultrafast thin-disk Yb:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> regenerative amplifier with a 200-kHz repetition rate [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(23): 2764~2766
- 5 Deng Mingfa, Bi Guojiang, Mao Xiaojie *et al.*. Study on laser diode pumped regenerative amplifier [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(2): 152~154  
邓明发, 秘国江, 毛小洁等. 二极管泵浦再生放大器技术研究[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(2): 152~154
- 6 Wang Jiangfeng, Zhu Haidong, Li Xuechun *et al.*. Highly stable, laser diode-pumped Nd:YLF regenerative amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 187~190  
王江峰, 朱海东, 李学春等. 高稳定激光二极管抽运Nd:YLF再生放大器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 187~190
- 7 Zhu Xiaolei, Xu Shixiang, Liu Yupu *et al.*. A stable Ti:sapphire regenerative amplifier operating at 1056 nm [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8): 979~982  
朱小磊, 徐世祥, 刘玉璞等. 钛宝石再生放大器1056 nm波长稳定输出[J]. *光学学报*, 1998, **18**(8): 979~982
- 8 T. Jensen, V.G. Ostroumov, J.-P. Meyn *et al.*. Spectroscopic characterization and laser performance of diode laser pumped Nd:GdVO<sub>4</sub>[J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**: 373~379
- 9 Lü Baida. Laser Optics—Laser Beam Transformation and Beam Quality Control [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. 99~100  
吕百达. 激光光学—激光束的传输变换和光束质量控制[M]. 成都: 四川大学出版社, 1992. 99~100