

基于大基模体积的 10 mJ 飞秒钛宝石激光再生放大器

杨帅帅 滕浩 何鹏 黄杭东 王兆华 董全力 魏志义

10 mJ femtosecond Ti:Sapphire regenerative amplifier with large mode size

Yang Shuai-Shuai Teng Hao He Peng Huang Hang-Dong Wang Zhao-Hua Dong Quan-Li Wei Zhi-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 104209 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.104209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.104209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I10>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

18 mJ, 100 Hz 飞秒钛宝石激光放大器

A 18 mJ femtosecond Ti: sapphire amplifier at 100 Hz repetition rate

物理学报.2016, 65(22): 224204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224204>

不同 2×2 集束聚焦方式下高功率激光靶面光强分布特性

Light intensity distribution of high-power laser beams on target plane under different focus system of 2×2 beam array

物理学报.2016, 65(6): 064203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064203>

高稳定性、高质量脉冲压缩飞秒光纤激光系统研究

Femtosecond fiber laser for high-stability and high-quality pulse compression

物理学报.2015, 64(16): 164207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164207>

Ba<sub>1-x</sub>B<sub>2-y-z</sub>O<sub>4</sub>Si<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>Ga<sub>z</sub> 晶体和频可调谐深紫外飞秒激光器

Tunable deep ultraviolet femtosecond sum frequency laser based on Ba<sub>1-x</sub>B<sub>2-y-z</sub>O<sub>4</sub>Si<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>Ga<sub>z</sub> crystal

物理学报.2015, 64(16): 164205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164205>

于 1064 nm 光纤皮秒种子源的 Nd: YAG 再生放大器

A Nd: YAG regenerative amplifier seeded by 1064 nm picosecond fiber

物理学报.2014, 63(13): 134207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134207>

# 基于大基模体积的10 mJ飞秒钛宝石激光再生放大器\*

杨帅帅<sup>1)2)</sup> 滕浩<sup>2)†</sup> 何鹏<sup>3)</sup> 黄杭东<sup>3)</sup> 王兆华<sup>2)</sup> 董全力<sup>1)†</sup> 魏志义<sup>2)4)†</sup>

1)(鲁东大学物理与光电工程学院, 烟台 260405)

2)(中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

3)(西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710126)

4)(中国科学院大学物理学院, 北京 100049)

(2017年1月25日收到; 2017年4月20日收到修改稿)

文章报导了基于大基模体积的高能量飞秒钛宝石激光再生放大器的设计与实验研究, 在重复频率10 Hz、抽运能量60 mJ的激励下, 得到了单脉冲能量17.4 mJ的种子脉冲放大结果, 压缩后的脉冲宽度为40.6 fs, 能量为13.9 mJ. 借助于此大基模体积再生腔, 仅增加一级多通放大, 实现了峰值功率达1.9 TW飞秒激光脉冲输出. 结果表明, 大模体积再生放大不仅降低了后续放大对抽运能量的要求, 也可以单独压缩实现再生腔直接输出10 mJ量级的飞秒激光脉冲, 是大能量高峰值功率飞秒激光系统的优质前端.

**关键词:** 飞秒激光, 啁啾脉冲放大, 再生放大器, 太瓦

**PACS:** 42.60.-v, 42.60.By, 42.60.Da, 42.65.Re

**DOI:** 10.7498/aps.66.104209

## 1 引言

随着克尔透镜锁模飞秒钛宝石激光的实现<sup>[1]</sup>以及啁啾脉冲放大(chirped-pulse amplification, CPA)技术<sup>[2]</sup>的发明, 飞秒激光在脉冲宽度不断变窄的同时, 峰值功率也在不断的提高, 峰值功率超过拍瓦(PW)的超强激光已经在一些实验室实现<sup>[3-5]</sup>.

在常规的CPA方案中, 飞秒振荡器输出的种子脉冲能量只有纳焦耳量级, 其放大过程要经历指数增长和线性增长两个阶段<sup>[6,7]</sup>. 指数增长阶段是将种子脉冲从纳焦耳提升到几百微焦耳或毫焦耳量级, 其增长约 $10^6$ 倍. 为了实现指数增长, 必须将钛宝石晶体中的激光光斑控制得非常小, 激光在晶体中的能流密度非常高; 线性增长阶段是将能量

从毫焦放大到焦耳甚至更高, 该阶段采用大能量抽运, 晶体上的光斑也较大, 放大倍数为几倍到几十倍. 指数增长阶段通常在激光放大中被称为预放大, 线性增长阶段被称为大能量放大.

预放大又分为多通预放大和再生放大<sup>[8]</sup>. 再生放大由于是振荡腔结构, 其输出的光束质量高, 稳定性和指向性好, 而且还可以隔离振荡器和后续放大器, 压缩后输出的光束质量与振荡器种子光无关; 多通预放大的光束质量依赖种子光源, 由于放大程数少, 在晶体上的光斑控制得非常小, 容易损伤晶体, 但多通放大结构简单, 易于操作, 更适合用于后面的线性增长大能量放大.

预放大是种子脉冲与后续大能量放大的桥梁, 其输出激光品质的好坏直接影响整体放大效率和光束质量. 大能量输出的预放大脉冲可以大大降低线性放大器对抽运能量的要求, 特别是双CPA放

\* 国家重大科学仪器设备开发专项基金(批准号: 2012YQ12004701)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB922401)和国家自然科学基金(批准号: 11474002, 11674386)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hteng@iphy.ac.cn; qldong@iphy.ac.cn; zywei@iphy.ac.cn

大方案中高对比度交叉偏振滤波 (cross-polarized wave generation, XPW) 技术<sup>[9,10]</sup>的转换效率约百分之十, 只有提高压缩脉冲的能量才能够输出更高能量的高对比度种子脉冲. 多通预放大由于放大程数少, 放大后脉冲能量通常较低, 而再生放大可以控制腔模来获得大能量的输出, 所以研究大基模体积高能量再生放大是非常有意义的.

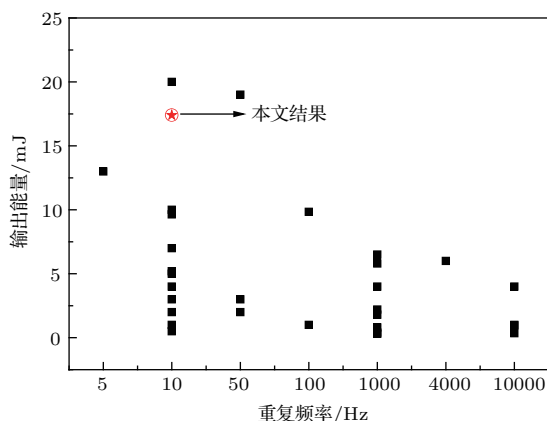


图1 已报道的不同重复频率的钛宝石飞秒再生腔输出能量, 本文结果用红色星号表示

Fig. 1. Overview of the state of art of output energy from regenerative amplifier at different repetition rate, the results in this letter is highlighted in red star.

钛宝石晶体的飞秒再生放大器, 根据不同的应用和不同重复频率来进行设计, 大多数再生放大器一般都工作在几个毫焦耳. 我们将已发表的再生放大器的输出能量按照不同重复频率整理在图1中, 可以看出高重复频率(1—10 kHz)的再生放大器由于晶体热透镜效应的影响, 输出脉冲能量普遍比较低, 基本维持在1—3 mJ, 在特殊冷却方式和补偿热透镜情况下, 最高能量为6.5 mJ<sup>[11–19]</sup>. 低重频再生放大器由于每发之间持续时间长, 热量有足够长的时间被带走, 不会出现高重复频率工作时形成热堆积, 所以可以不考虑热效应, 其输出能量相对较高, 但大多输出能量也不足10 mJ<sup>[20–29]</sup>. 文献<sup>[30]</sup>报道了重复频率为5 Hz的再生放大能量为13 mJ. 在文献<sup>[31, 32]</sup>中分别报道了重复频率10 Hz的再生放大输出能量为20 mJ, 其中文献<sup>[31]</sup>中采用双晶体结构的再生放大器, 腔长非常长, 结构复杂, 调节难度也较大, 且抽运能量为150 mJ, 光-光转换效率较低; 文献<sup>[32]</sup>中报道的再生腔放大结果是双波段放大的能量, 而单一波段输出也只有10 mJ. 对于50 Hz再生放大也报道过输出能量为19 mJ的放大结果<sup>[33]</sup>, 但其输出脉冲的光谱较

窄, 加入光谱整形后也只有12 mJ的激光输出. 相比于前述已经报道的这些再生放大器, 我们设计的再生放大器采用了增大腔内模场体积的方法来提提高能量输出, 仅一块钛宝石晶体, 腔长短、结构简单易于维护, 在60 mJ抽运能量下放大后的脉冲能量为17.4 mJ, 其光谱半高宽为35 nm, 压缩后的能量输出为13.9 mJ, 脉冲宽度为40.6 fs, 是大能量太瓦级飞秒系统的优质前端.

## 2 大基模体积再生放大的设计和实验结果

大基模体积再生腔型的设计中首先要考虑的是腔模光斑尺寸是否支持高能量激光脉冲的放大, 以及抽运激光和种子光光斑与腔内模式的匹配<sup>[34]</sup>. 根据需要放大的能量, 腔内钛宝石晶体中光斑大小的控制既要保证其能流密度大于钛宝石晶体饱和能流密度( $\sim 0.8 \text{ J/cm}^2$ ), 又要确保其小于晶体的损伤阈值( $10 \text{ J/cm}^2$ ), 只有合适的光斑才能保证再生腔内放大后的能量既处于过饱和状态又不至于损伤晶体. 再生腔内的其他光学元件则只需要考虑光斑尽可能大, 能流密度相对低, 让其工作在安全区域.

高重复频率比如kHz再生放大器<sup>[17,18]</sup>, 抽运激光通常采用YLF调Q倍频激光, 由于该激光脉冲宽度宽( $\sim 200 \text{ ns}$ )而且能量低, 耦合到钛宝石晶体上采用紧聚焦方式, 所以再生腔内的腔模较小, 放大后的能量较低. 对于低重复频率如10 Hz的再生放大器<sup>[29]</sup>, 抽运激光采用灯泵532 nm激光, 由于其能量高、脉冲宽度窄( $\sim 10 \text{ ns}$ ), 所以聚焦在钛宝石晶体上的光斑较大, 适合大腔模体积的高能量再生放大器.

如图2(b)所示为大基模体积再生腔结构图, 其腔型为线性稳定腔, 由两端镜M1和M4, 以及腔内钛宝石晶体(Ti:S)和一个普克尔盒(PC)组成, 其中M1为凹面反射镜, 曲率半径为10 m, M4为平面反射镜. 钛宝石距离M4为30 cm, PC距离M1为20 cm. 总腔长为1.9 m, 激光脉冲往返一次的时间间隔为12.7 ns. 由于激光器运行在低重复频率, 钛宝石晶体上的热透镜效应可以不考虑, 所以整个腔内光斑的分布如图2(a)所示, 腔内光斑大小从M1到M4是逐渐下降的, 但最小的光斑(M4)半径约1 mm, M1上的光斑半径则为1.1 mm, 其腔内光

斑明显大于常规的高重复频率再生腔, 所以可以支持大能量激光脉冲的放大.

在前述腔型计算的基础上, 实验室搭建的实际光路图如图 3 所示, 包括飞秒振荡器、展宽器、大基模体积的再生放大器和压缩器.

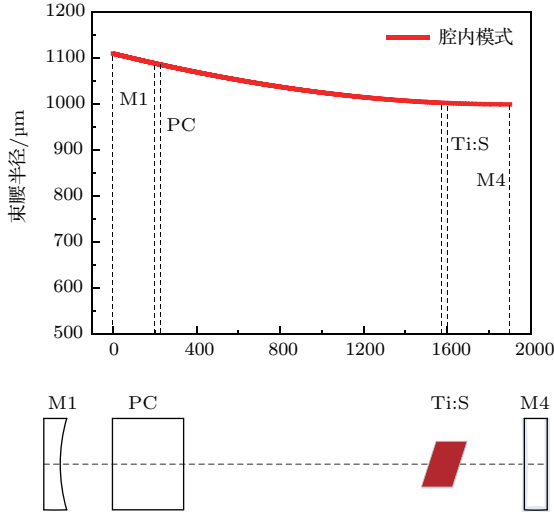


图 2 (网刊彩色) 大基模体积再生腔腔内模式分布 (a) 和结构图 (b) (M1, M4 为腔镜; PC 为普克尔盒; Ti: S 为钛宝石晶体)

Fig. 2. (color online) Radius of TEM<sub>00</sub> mode in large mode size cavity (a) and scheme of corresponding cavity (M1, M4 are end mirrors, PC is pockels cell, Ti:S is Ti:sapphire crystal).

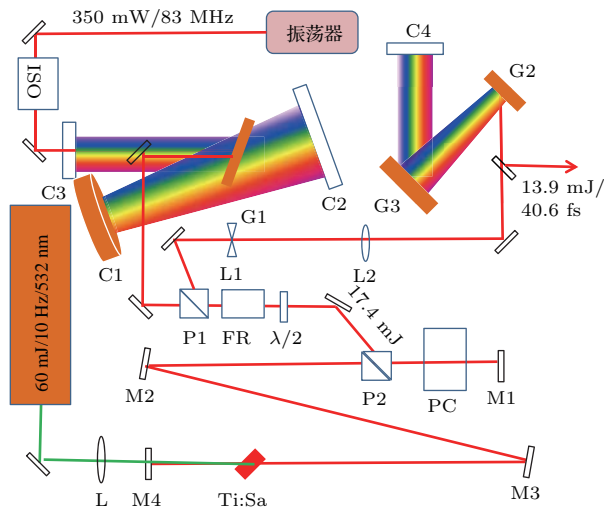


图 3 (网刊彩色) 大基模体积再生放大系统光路图 (ISO 代表隔离器; G 代表光栅; C 代表条形镜; P 代表格兰棱镜; FR 代表旋光器; Ti:Sa 代表钛宝石; PC 代表普克尔盒; M 代表腔镜; L 代表透镜)

Fig. 3. (color online) Optical layout of the regenerative amplifier with large mode size.

种子激光采用啁啾镜色散补偿的钛宝石振荡器 [35] (型号 FlashWave-30, 盐城物科光电有限公

司), 该振荡器输出功率为 350 mW, 重复频率为 83 MHz, 光谱半高全宽 85 nm, 脉冲宽度小于 20 fs. 经过 Martinez 展宽器 [36] 后脉冲宽度为 185 ps, 光谱宽度为 60 nm. 展宽后的脉冲通过格兰棱镜 (P1)、法拉第旋光器 (FR) 和半波片, 偏振态由 P 偏振变为 S 偏振, 经过格兰棱镜 (P2) 注入到再生腔中. 再生腔中普克尔盒晶体处于静态 1/4 波片状态, 工作时再加 1/4 波片高压实现单脉冲选择, 单脉冲被锁在再生腔内振荡并放大, 直到去掉高压电源后放大脉冲的偏振态又变回 S 偏振, 由格兰棱镜 (P2) 从腔内导出. 再生腔的抽运激光采用的是灯泵 Nd:YAG 电光调 Q 纳秒脉冲激光的倍频激光 (532 nm), 其输出总能量为 450 mJ, 脉冲宽度约为 8 ns. 用一片半波片和一片薄膜偏振片控制再生腔抽运激光的能量. 抽运激光通过一焦距为 600 mm 的凸透镜聚焦在钛宝石晶体上, 钛宝石晶体尺寸为 6 mm × 6 mm × 20 mm, 品质因数 (figure of merit, FOM) > 150, 对 532 nm 激光的吸收大于 90%, 端面布儒斯特角度切割. 为了避免抽运激光聚焦后损伤钛宝石晶体, 晶体放置在焦点之前, 抽运激光聚焦在晶体中的光斑控制在 2 mm, 抽运激光能流密度为 1.5 J/cm<sup>2</sup>, 远低于钛宝石的损伤阈值. 由于抽运能量比较低, 钛宝石晶体采用自然冷却.

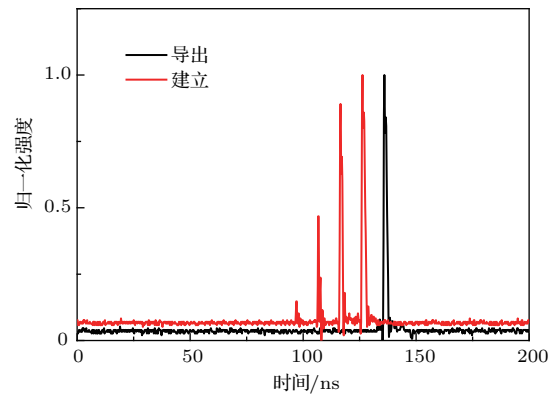


图 4 (网刊彩色) 再生腔中种子脉冲注入后的建立时间和倒空脉冲

Fig. 4. (color online) Built-up time of amplified seed in the cavity (red) and dumped pulse (black).

展宽后的种子激光注入再生腔后, 种子脉冲在再生腔内的建立时间过程见图 4. 经过优化腔内激光建立时间, 将 PC 的倒出时间选择在放大峰值的第二个脉冲处, 获得了稳定的放大脉冲输出. 我们首先研究了再生腔放大输出能量与抽运激光能量的关系, 如图 5 所示, 放大能量随抽运激光能量是线性增长的, 但增长曲线在高能量抽运下低于模拟



结果, 其原因是高能量抽运下会有一些的热积累效应, 导致放大效率降低. 在实验中经过优化, 在能量为 60 mJ 抽运激光激励下, 再生腔放大后的单脉冲能量为 17.4 mJ, 光光转换效率为 29.0%.

用光谱仪测量放大后脉冲光谱, 中心波长为 790 nm, 光谱宽度为 35 nm, 如图 6 所示, 不同输出能量下, 脉冲的光谱分布几乎没变化. 相对于种子脉冲, 再生放大激光脉冲光谱由于增益窄化效应而变窄<sup>[37]</sup>, 但 35 nm 的谱宽也足够支持小于 40 fs 的激光脉冲输出.

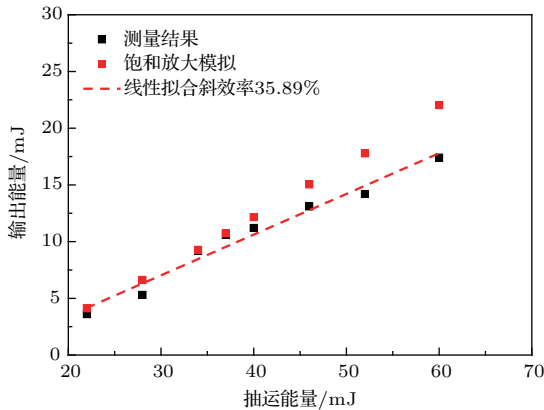


图 5 (网刊彩色) 大基模体积再生腔能量输出曲线  
Fig. 5. (color online) Output energy as a function of pump energy.

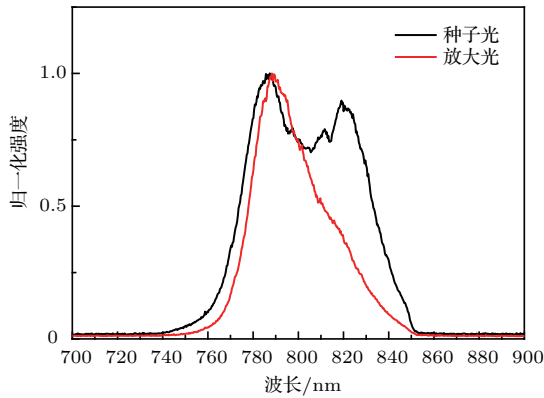


图 6 (网刊彩色) 种子光和再生腔有种子注入的光谱曲线  
Fig. 6. (color online) Spectrum of seeding laser pulses and amplified laser pulses.

再生放大后的激光脉冲经过扩束准直后进入压缩器进行压缩. 压缩器由两块光栅常数为 1500 lp/mm 的光栅和爬低镜组成, 经过优化入射角和光栅对之间的距离, 压缩后的脉冲宽度采用商品化自参考光谱干涉的自相关仪 (Wizzler-800, Fastlite 公司) 进行测量, 其脉冲宽度为 40.6 fs, 如图 7(a) 所示. 图 7(b) 为反演出的脉冲光谱相位分布曲线, 可以看出相位分布接近直线, 压缩后的能量为 13.9 mJ.

压缩后的脉冲还未能完全达到变换极限脉宽, 主要原因是由于压缩器没能完全补偿展宽器和再生腔内材料引入的高阶色散. 展宽器和压缩器引入的色散可通过光线追迹法模拟计算, 再生腔内材料的二阶色散和三阶色散可根据以下公式给出:

$$GDD = \frac{d^2\phi}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3 l}{2\pi c^2} \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2}, \quad (1)$$

$$TOD = \frac{d^3\phi}{d\omega^3} = -\frac{\lambda^4 l}{4\pi^2 c^3} \left( 3 \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} + \lambda \frac{d^3 n(\lambda)}{d\lambda^3} \right), \quad (2)$$

其中 (1) 和 (2) 式中  $\phi$  为光频相位,  $\omega$  为光频,  $\lambda$  为波长,  $l$  为材料长度,  $c$  为光速,  $n(\lambda)$  为材料的折射率可由赛尔迈耶 (Sellmeier) 公式给出. 在最优压缩角度下得到模拟计算结果如表 1 所列, 追迹波长选取中心波长 790 nm. 可见通过优化压缩器光栅入射角和光栅间距, 在完全补偿二阶色散基础上, 还有一部分三阶色散未能完全补偿, 故未实现压缩至变换极限脉宽, 后续可在展宽器前加入色散补偿的声光调制器 (Dazzler) 补偿色散, 可实现更短脉宽的输出.

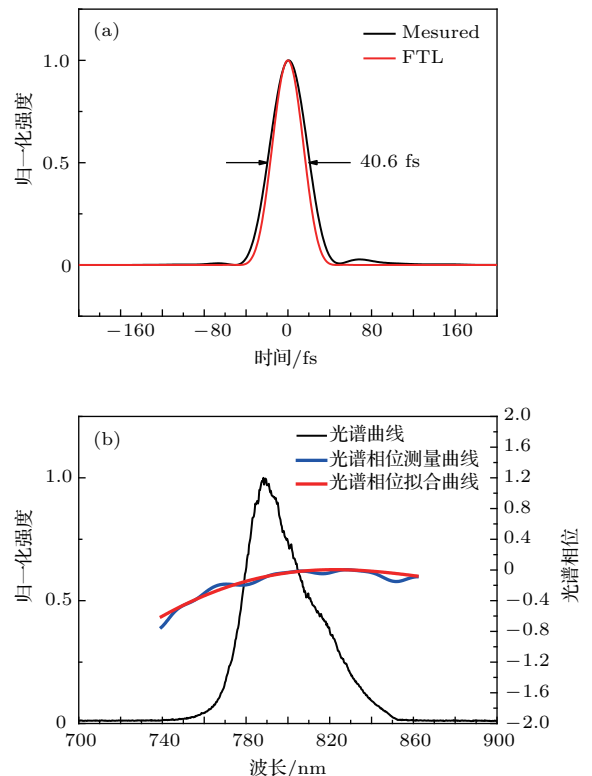


图 7 (网刊彩色) 再生腔输出脉冲压缩后的脉冲宽度 (a), 光谱相位分布曲线 (b)  
Fig. 7. (color online) (a) The pulse duration of compressed pulses directly from regenerative amplifier and (b) corresponding distribution of spectral phase.

表1 系统中各部分色散列表  
Table 1. Lists of dispersion in the CPA laser system.

色散类型	二阶色散/fs <sup>2</sup>	三阶色散/fs <sup>3</sup>
马丁内兹展宽器	1685940	-4271070
材料色散	74743	51125
压缩器	-1760683	4226835
富余量	0	6890

图8所示为压缩后的激光脉冲光束质量, 采用  $M^2$  因子仪器测量结果为1.28. 这表明我们设计的大基模体积再生放大器输出的激光具有较好的光束质量.

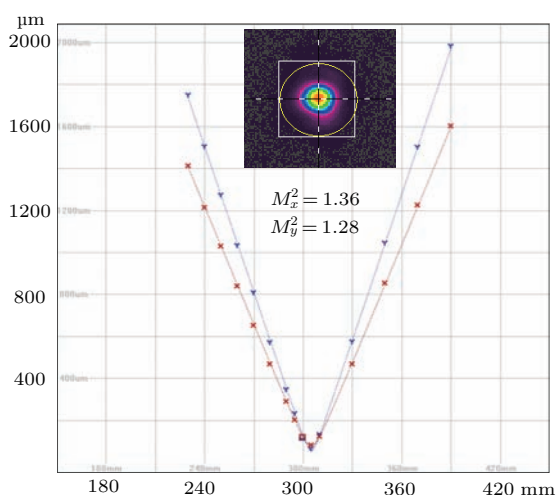


图8 (网刊彩色) 压缩后光束质量

Fig. 8. (color online) The beam quality ( $M^2$ ) of laser beam from the regenerative amplifier and compressor

### 3 基于大基模体积再生放大的TW激光输出

以上述大能量再生放大器为基础, 将再生放大器输出的激光经过扩束准直后注入到六通放大器进一步放大. 六通放大器是采用Bowtie对称结构, 将532 nm抽运激光抽运再生放大器的剩余能量分成两路, 分别通过真空像传递管缩束后从两端对称抽运钛宝石晶体, 经过优化后, 脉冲能量放大到110 mJ. 放大后的脉冲再次注入上述的压缩器中进行压缩, 经过测量脉冲宽度为43 fs, 压缩后的能量为81.4 mJ, 对应的峰值功率为1.9 TW. 能量稳定性经过测量为2.15%(RMS), 光束质量( $M^2$ )为1.5.

### 4 结论

本文报道了一种具有输出能量大于10 mJ的大基模体积飞秒钛宝石激光再生放大方案, 在60 mJ抽运能量下, 得到了放大能量为17.4 mJ的结果, 光光转换效率为29%, 压缩后实现了能量为13.9 mJ、脉冲宽度为40.6 fs的飞秒激光输出. 在此基础上, 通过增加一级多通放大器, 建成一台紧凑型太瓦级飞秒钛宝石激光装置, 压缩后的输出能量为81.4 mJ, 脉冲宽度为43 fs, 对应的峰值功率为1.9 TW, 能量稳定性为2.15%. 该结果表明大基模体积的高能量再生放大器不仅可以有效降低后续放大级对抽运能量的要求, 而且具有光束质量好, 结构紧凑、稳定等优点, 是开展强场物理实验、超快科学特别是户外飞秒激光大气传输等离子体通道等研究工作<sup>[38-41]</sup>的优质光源.

### 参考文献

- [1] Spence D E, Kean P N, Sibbett W 1991 *Opt. Lett.* **16** 42
- [2] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **55** 219
- [3] Wang Z H, Liu C, Shen Z W, Zhang Q, Teng H, Wei Z Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 3194
- [4] Yu T J, Lee S K, Sung J H, Yoon J W, Jeong T M, Lee J 2012 *Opt. Express* **20** 10807
- [5] Chu Y X, Gan Z B, Liang X Y, Yu L H, Lu X M, Wang C, Wang X L, Xu L, Lu H H, Yin D J, Leng Y X, Li R X, Xu Z Z 2015 *Opt. Lett.* **40** 5011
- [6] Frantz L M, Nodvik J S 1963 *J. Appl. Phys.* **34** 2346
- [7] Lowdermilk W H, Murray J E 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 2436
- [8] Koechner W 2005 *Solid-State Laser Engineering* (6th Ed.) (Berlin: Springer) p156
- [9] Yanovsky V, Kalinchenko G., Reed S, Rousseau P, Chvykov V 2007 *Acta Horticulturae* **18** 193
- [10] Liebetrau H, Hornung M, Keppler S, Hellwing M, Kessler A, Schorcht F 2016 *Opt. Lett.* **41** 3006
- [11] Takeuchi S, Kobayashi T 1994 *Opt. Commun.* **109** 518
- [12] Nabekawa Y, Kuramoto Y, Togashi T, Sekikawa T, Watanabe S 1998 *Opt. Lett.* **23** 1384
- [13] Zhang J, Suzuki M, Baba M, Wei Z, Wang Z, Wang P, Zhang J, Zheng J, Kuroda H 2007 *Appl. Opt.* **46** 2498
- [14] Chen S, Chen S, Chini M, Wang H, Yun C, Mashiko H, Wu Y, Chang Z 2009 *Appl. Opt.* **48** 5692
- [15] Takada H, Torizuka K 2006 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **12** 201
- [16] Amani E A, Nabekawa Y, Ishikawa K L, Takahashi H, Midorikawa K 2008 *Opt. Express* **16** 13431

- [17] Shen Z W, Wang Z H, Fan H T, Qin S, Teng H, He P, Wei Z Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104211 (in Chinese) [沈忠伟, 王兆华, 范海涛, 秦爽, 滕浩, 何鹏, 魏志义 2014 物理学报 **63** 104211]
- [18] He P, Teng H, Zhang N H, Liu Y Y, Wang Z H, Wei Z Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 244201 (in Chinese) [何鹏, 滕浩, 张宁华, 刘阳阳, 王兆华, 魏志义 2016 物理学报 **65** 244201]
- [19] Matras G, Huot N, Baubeau E, Audouard E 2007 *Opt. Express* **15** 7528
- [20] Xu Z, Yang X, Vlgroux L, Saviot F, Zhou J, Zhang Z, Wang Y, Zhang W 2000 *Science China Mathematics* **43** 533
- [21] Leng Y X, Lin L H, Xu Z Z 2002 *Acta Optica Sinica* **22** 170 (in Chinese) [冷雨欣, 林礼煌, 徐至展 2002 光学学报 **22** 170]
- [22] Itatani J, Faure J, Nantel M, Mourou G, Watanabe S 1998 *Opt. Commun.* **148** 70
- [23] Barty C P, Guo T, Le B C, Raksi F, Rose-Petruck C, Squier J, Wilson K R, Yakovlev V V, Yamakawa K 1996 *Opt. Lett.* **21** 668
- [24] Tokita S, Kobayashi T 2008 *Opt. Express* **16** 14875
- [25] Kiriya H, Inoue N, Akahane Y, Yamakawa K 2006 *Opt. Express* **14** 438
- [26] Li C, Lu X M, Wang C, Leng Y X, Liang X Y, Li R X, Xu Z Z 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1276
- [27] Huang X J, Peng H S, Wei X F, Wang X D, Zeng X M, Zhou K N, Guo Y, Liu L Q, Wang X, Zhu Q H, Lin D H, Tang X D, Zhang X M, Chu X L, Wang Q Y 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1685 (in Chinese) [黄小军, 彭翰生, 魏晓峰, 王晓东, 曾小明, 周凯南, 郭仪, 刘兰琴, 王逍, 朱启华, 林东晖, 唐晓东, 张小民, 楚晓亮, 王清月 2005 强激光与粒子束 **17** 1685]
- [28] Nabekawa Y, Eilanlou A A, Furukawa Y, Ishikawa K L, Takahashi H, Midorikawa K 2010 *Appl. Phys. B* **101** 523
- [29] Zhang W, Teng H, Wang Z H, Shen Z W, Liu C, Wei Z Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104211 (in Chinese) [张伟, 滕浩, 王兆华, 沈忠伟, 刘成, 魏志义 2013 物理学报 **62** 104211]
- [30] Ohmae G, Yagi T 2000 *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering* Osaka, Japan, November 01, 1999 3886 407
- [31] Liu C, Wang Z H, Shen Z W, Zhang W, Teng H, Wei Z Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094209 (in Chinese) [刘成, 王兆华, 沈忠伟, 张伟, 滕浩, 魏志义 2013 物理学报 **62** 094209]
- [32] Yamakawa K, Barty C P 2003 *Opt. Lett.* **28** 2402
- [33] Ito S, Ishikawa H, Miura T, Takasago K, Endo A, Torizuka K 2003 *Appl. Phys. B* **76** 497
- [34] Shang L J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1408 (in Chinese) [尚连聚 2003 物理学报 **52** 1408]
- [35] Tian J R, Han H N, Zhao Y Y, Wang P, Zhang W, Wei Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4725 (in Chinese) [田金荣, 韩海年, 赵研英, 王鹏, 张伟, 魏志义 2006 物理学报 **55** 4725]
- [36] Song Y R, Zhang Z G, Wang Q Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 581 (in Chinese) [宋晏蓉, 张志刚, 王清月 2003 物理学报 **52** 581]
- [37] Cao D M, Wei Z Y, Teng H, Xia J F, Zhang J, Hou X 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1202 (in Chinese) [曹东茂, 魏志义, 滕浩, 夏江帆, 张杰, 侯洵 2000 物理学报 **49** 1202]
- [38] Zhou J, Peatross J, Murnane M M, Kapteyn H C, Christov I P 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 752
- [39] Remington B A, Drake R P, Takabe H, Arnett D 1999 *Phys. Plasmas* **7** 1641
- [40] Clark E L, Krushelnick K, Zepf M, Beg F N, Tatarakis M, Machacek A, Santala M I, Watts I, Norreys P A, Dangor A E 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 1654
- [41] Zhang J, Hao Z Q, Yuan X H, Zheng Z Y, Zhang Z, Yu J 2006 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **23** 282 (in Chinese) [张杰, 郝作强, 远晓辉, 郑志远, 张喆, 俞进 2006 量子电子学报 **23** 282]

# 10 mJ femtosecond Ti:Sapphire regenerative amplifier with large mode size\*

Yang Shuai-Shuai<sup>1)2)</sup> Teng Hao<sup>2)†</sup> He Peng<sup>3)</sup> Huang Hang-Dong<sup>3)</sup> Wang Zhao-Hua<sup>2)</sup>  
Dong Quan-Li<sup>1)†</sup> Wei Zhi-Yi<sup>2)4)†</sup>

1) (School of Physics and Optoelectronic Engineering, Ludong University, Yantai 260405, China)

2) (Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

3) (School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710126, China)

4) (School of Physical Sciences, University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 25 January 2017; revised manuscript received 20 April 2017 )

## Abstract

With advent of chirped-pulse amplification, the peak power of femtosecond laser pulse was reached to petawatt (PW) or hundreds of terawatt (TW). Many progresses of high-field physics and ultrafast dynamics in matter are achieved using TW or PW laser. Pre-amplifier is an exponential growth amplifier which is also a bridge between oscillator and power amplifier. The best choice of pre-amplifier is amplification in regenerative cavity, due to its high stability and beam quality. The quality of pre-amplified laser pulse is significant to efficiency and beam quality of the successive power amplifier. High energy pre-amplifier with high beam quality will reduce the requirement of pump laser in final power amplifier. But typical regenerative amplifier only support low output energy of few millijoule. Higher energy from only one regenerative amplifier is crucial to whole laser system.

High energy regenerative amplifier can be achieved by increasing the size of TEM<sub>00</sub> in cavity. A new femtosecond Ti:sapphire regenerative amplifier with large mode size was demonstrated in this letter. The regenerative cavity is designed as stable linear resonator in which end mirrors are planar, the diameter of beam waist in Ti:sapphire crystal is larger than 2 mm, which can support high energy pulse amplified in cavity. By matching the focal spot of pump laser with the size of mode and optimization of cavity, the output laser energy up to 17.4 mJ was achieved under the pump energy of 60 mJ at repetition rate of 10 Hz, which corresponds to the efficiency of 29%. The amplified laser pulse from regenerative amplifier was compressed in a grating-pair compressor. By carefully alignment of incident angle and distance between the two gratings of compressor, the shortest pulses duration of 40.6 fs and energy of 13.9 mJ are obtained, which is a little bit longer than Fourier-transform limit based on spectrum of laser. The dispersion in the CPA laser system was also analyzed, after optimization of compressor, there are still high order dispersions uncompensated, which results in the duration of compressed pulses longer than Fourier-transform limit.

Based on this large mode size regenerative amplifier, peak power of 1.9 TW laser pulses which compressed pulse energy of 81.4 mJ in 43 fs were also further realized by following only one stage of multipass amplifier. The beam quality ( $M^2$ ) was measured to be 1.6 and 1.5 in  $X$  and  $Y$  directions respectively, and the energy stability is 2.15% (rms). The results show that this large mode size regenerative amplifier is an ideal choice of pre-amplifier in TW laser system.

**Keywords:** femtosecond laser, chirped-pulse amplification, regenerative amplifier, terawatt

**PACS:** 42.60.-v, 42.60.By, 42.60.Da, 42.65.Re

**DOI:** 10.7498/aps.66.104209

\* Project supported by the Special Foundation of State Major Scientific Instrument and Equipment Development of China (Grant No. 2012YQ12004701), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2013CB922401), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11474002, 11674386).

† Corresponding author. E-mail: [hteng@iphy.ac.cn](mailto:hteng@iphy.ac.cn); [qldong@iphy.ac.cn](mailto:qldong@iphy.ac.cn); [zywei@iphy.ac.cn](mailto:zywei@iphy.ac.cn)