

## 多脉冲序列飞秒钛宝石激光的啁啾脉冲放大\*

葛绪雷<sup>1)2)</sup> 马景龙<sup>2)†</sup> 郑轶<sup>2)</sup> 鲁欣<sup>2)</sup> 蒋刚<sup>1)</sup> 李玉同<sup>2)</sup> 魏志义<sup>2)</sup> 张杰<sup>2)3)</sup>

1) (四川大学原子与分子物理研究所, 成都 610065)

2) (中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100190)

3) (上海交通大学物理系激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240)

(2012年3月29日收到; 2012年5月16日收到修改稿)

在数太瓦钛宝石啁啾脉冲放大系统中(极光II升级装置), 对多脉冲序列的放大过程进行了详细的实验研究, 获得了多脉冲序列的放大输出. 每一个放大脉冲串中包含有19个独立的飞秒单脉冲, 其相邻间隔为14.8 ns, 对应的重复频率为67.5 MHz. 脉冲串的总能量约为122 mJ, 各单脉冲能量从20 mJ指数衰减至0.5 mJ, 脉宽约为60 fs, 对应的峰值功率约为 $10^{11}$ — $10^{10}$  W. 这种脉冲序列在产生长寿命激光等离子体、激光微加工等方面有重要应用前景.

关键词: 脉冲序列, 啁啾脉冲放大, 普克尔盒

PACS: 42.55.-f, 42.60.-v, 42.65.Re

## 1 引言

钛宝石飞秒激光器自发明以来, 在科研、工业和医学中得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>. 飞秒脉冲产生于振荡器, 常见的脉冲频率为几十兆赫兹, 单脉冲能量一般仅数 nJ<sup>[4]</sup>. 利用 Herriott 型光学长腔技术, 降低频率到兆赫兹, 可以提高单脉冲能量, 但是也不过几百纳焦耳<sup>[5]</sup>, 对于许多实际应用来说仍远远不够. 高功率的飞秒激光脉冲可以通过啁啾脉冲放大技术(CPA)获得<sup>[6,7]</sup>. 这种激光器一般是单脉冲输出的, 重复频率多在100 Hz以下. 将振荡器输出的几十兆赫兹的脉冲序列全部放大到所需能量是十分困难的. 比如, 仅将每个70兆赫兹振荡器脉冲放大到1 mJ, 激光平均功率就高达70 kW, 这需要数百千瓦的平均抽运激光功率, 显然是不现实的. 所以, 振荡器脉冲中通常只能有一个被选出来再去放大. 目前, 出现了一些需要毫焦耳量级脉冲序列的应用, 比如利用间隔为纳秒量级的飞秒激光脉冲序列产生长寿命的空气等离子体通道. 高功率飞秒脉冲序列在材料打孔中也有很重要的应用. 与

传统的单脉冲打孔不同, 脉冲序列可以使材料保持高温和塑性, 所以孔洞边缘不会破裂, 打出的孔比较光滑<sup>[8]</sup>.

在利用飞秒脉冲产生空气等离子体通道的应用中, 通道的寿命是一个至关重要的参数. 单个脉冲虽然可以产生数百米长的等离子体通道, 但是局部等离子体的寿命仅几个纳秒, 难以形成真正的导电长通道. 如果采用脉冲序列, 后续脉冲可以维持前面脉冲产生的电离状态, 从而延长了等离子体通道的寿命. 因此该领域的研究人员在产生脉冲序列方面进行了若干尝试. 中国科学院上海光学与精密机械研究所的研究人员通过调节再生放大器普克尔盒上的电压, 让激光脉冲在再生腔内每往返一次就“漏出”一点能量, 然后将“漏出”的脉冲序列导入主放大器进行放大, 最终得到了有6个较强脉冲组成的脉冲序列<sup>[9]</sup>. 中国科学院物理研究所的研究人员将飞秒锁模振荡器输出的“天然”高重复频率脉冲序列展宽后不加以选单就进行多级的多通放大, 最终获得了由17个能量达到毫焦耳量级的飞秒脉冲组成的脉冲序列, 脉冲间隔为14.8 ns, 从而在脉冲数量上实现了较大突破, 并利用这种脉冲

\* 国家自然科学基金(批准号: 10974250, 60978031)资助的课题.

† E-mail: majinglong@iphy.ac.cn

序列在空气中产生了寿命达到微秒量级的等离子体通道<sup>[10]</sup>.

虽然对振荡器输出的脉冲序列进行全多通放大已经获得了初步的成功<sup>[10]</sup>,但是目前对飞秒激光装置的这种特殊工作模式的运行机制和技术细节尚未进行深入研究.本文在以前工作的基础上,对飞秒脉冲序列在全多通放大链中的放大过程进行了详细的跟踪和研究.我们在升级后的极光II飞秒激光放大装置的前级系统中进行了脉冲序列的放大实验研究,结果表明,在多通放大器中注入多个种子脉冲,经过几个放大器的放大,最终可以得到脉冲数为19.单脉冲能量从20 mJ指数衰减到0.5 mJ、总能量122 mJ、脉冲宽度为60 fs的脉冲序列,对应的峰值功率为0.3 TW—8 GW.此脉冲序列在大气中产生了寿命为微秒量级的等离子体通道<sup>[10]</sup>,这种长寿命等离子体通道在高压放电和激光引雷等方面有重要的应用<sup>[11,12]</sup>.本文的实验结果和分析对飞秒脉冲序列的若干性能指标,例如脉冲数量以及能量均匀性的进一步优化能够提供参考.

## 2 实验装置

本实验是在极光II升级系统的前端系统中进行的<sup>[13]</sup>,光路布局如图1所示.该装置的前端是由对比度高达 $10^9$ 的钛宝石激光系统(Femtopower Compact Pro)改造而成的.振荡器是由啁啾镜补偿色散的克尔锁模钛宝石飞秒激光器,用4 W 532 nm 激光抽运可得400 mW 锁模输出,重复频率为67.5 MHz(图2(a)).经过高色散材料SF57展宽到10 ps后,脉冲序列入射到一个九通放大器中,此放大器的抽运源(DM-10-527, Photonics Industries)为1 kHz,功率为6 W,脉冲宽度(FWHM)大于200 ns.放大晶体安置在真空中,并冷却

至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,以此来减小热透镜效应,并增加高能级的电子寿命(3.72  $\mu\text{s}$ ),减小自发辐射放大(ASE).振荡器产生的脉冲序列经过2次和4次放大后,脉冲序列中各脉冲的能量分布分别如图2(b)和2(c)所示.调节普克尔盒1的延迟时间,并把门宽调至最大(约1  $\mu\text{s}$ ),使得如图2(c)所示的脉冲序列的前沿恰好等于普克尔盒的开门时间.脉冲序列经过普克尔盒1的选择和一个色散补偿器Dazzler后,又返回到此多通放大器中,再经过5次放大后,输出的脉冲序列分布如图2(d)所示.将此脉冲序列注入到一个Martinez型脉冲展宽器中,该展宽器由一个1200刻线的光栅、一块凹面镜和一块反射镜组成.经过两次展宽,将脉宽展宽至240 ps.第二次展宽后的脉冲序列经过普克尔盒2,将频率降到10 Hz,然后入射到多通预放大器中经过四次放大.预放大器的抽运源(Quanta-Ray Lab-130)频率为10 Hz,入射到晶体上的脉冲能量为50 mJ.最后此脉冲序列经过普克尔盒3,入射到1.5 J, 10 Hz 双边抽运(Quanta-Ray Pro-350)的主放大器中,得到约180 mJ的总能量.对比在相同的抽运下,单脉冲模式的种子可以放大到450 mJ的能量.在预放大和主放大的过程中,需要用光电二极管和示波器来对脉冲序列进行实时监测,并分别调节三台抽运源的延迟时间,以保证预放大和主放大过程中脉冲序列包含的脉冲数目较多,各脉冲之间的能量差别较小.

## 3 结果分析和讨论

脉冲序列经历各级放大后的幅度分布示于图2.随着放大次数的增加,单脉冲能量逐渐提高,但是脉冲序列中包含的脉冲数目逐渐减少.放大级数越多,有效放大的脉冲数目就越少.各阶段脉冲序列的特征列于表1.

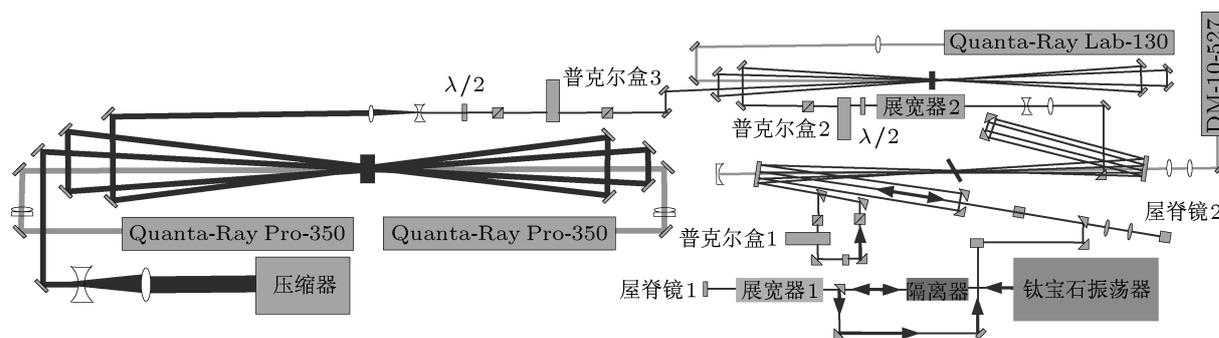


图1 飞秒钛宝石脉冲序列激光系统光路图

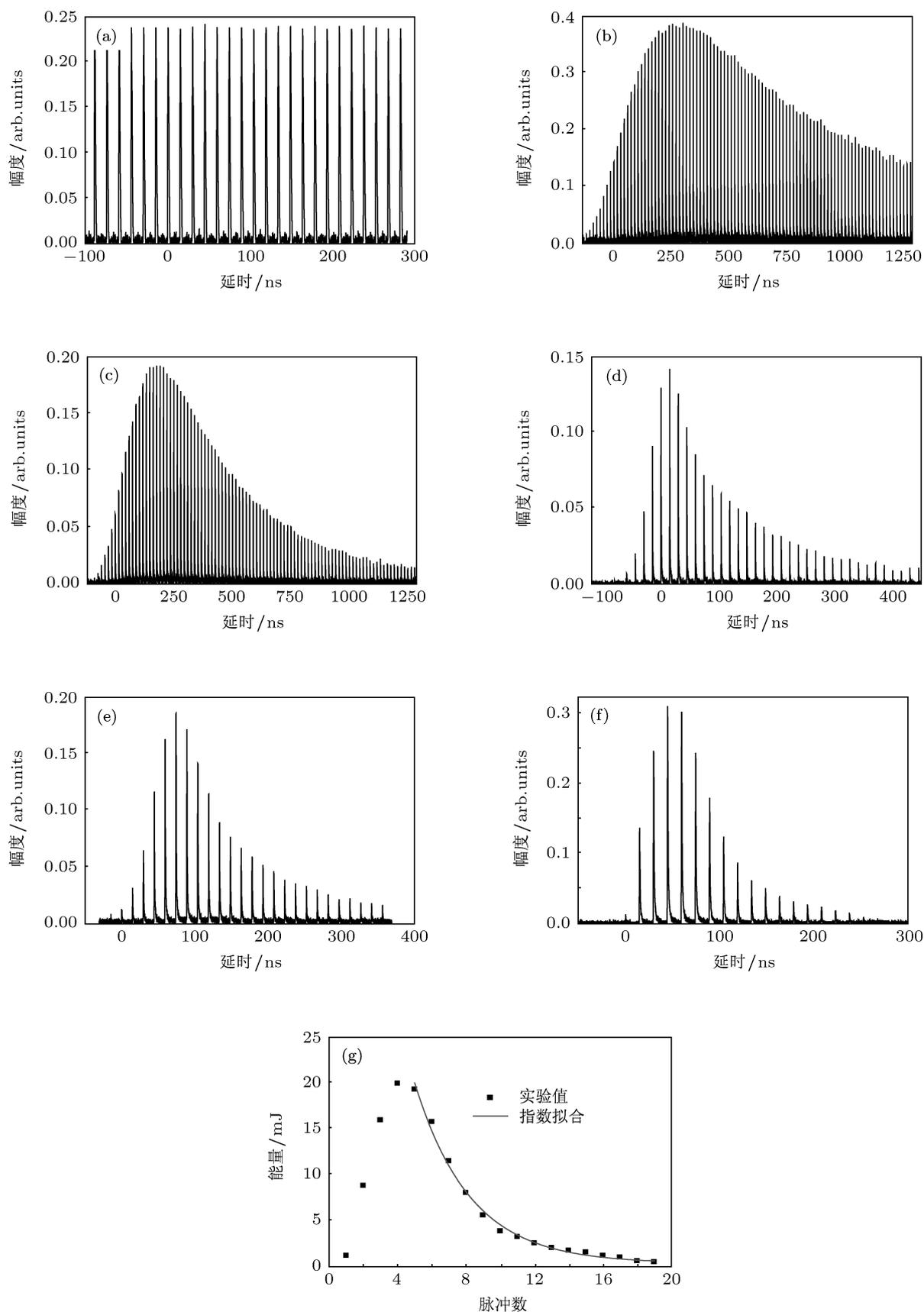


图2 脉冲序列演化过程 (a) 初始脉冲序列; (b) 2次放大后的脉冲序列; (c) 4次放大后的脉冲序列; (d) 9次放大后的脉冲序列; (e) 预放大后的脉冲序列; (f) 主放大后的脉冲序列; (g) 主放大后各脉冲能量分布

表 1 各阶段脉冲序列的特点

	脉冲数目	重复频率	总能量/功率	最大单脉冲能量	单脉冲宽度
振荡器	无穷	67.5 MHz	400 mW	6 nJ	10 fs
2 次放大	数百	1 kHz	170 mW	360 nJ	10 ps
4 次放大	~ 100	1 kHz	240 mW	20 $\mu$ J	10 ps
9 次放大	40	1 kHz	200 mW	18.6 $\mu$ J	10 ps
预放大	25	10 Hz	5 mJ	600 $\mu$ J	240 ps
主放大	19	10 Hz	122 mJ	20 mJ	60 fs

激光放大器可按 Frantz-Nodvik 公式模拟<sup>[14]</sup>, 式中  $F_{out}$ ,  $F_{in}$ , 和  $F_s$  分别为单位面积内的放大后能量、输入能量和晶体饱和能量, 钛宝石的  $F_s$  约为  $1 \text{ J/cm}^2$ ,  $G_0 = \exp(g_0 L)$ ,  $g_0$  是小信号增益系数,  $L$  为增益长度,  $g_0 L = F_{st}/F_s$ ,  $F_{st}$  是单位面积内的储能. 改变  $F_{in}/F_s$ , 脉冲序列通过晶体一次后的相对幅度示于图 3. 因为储能逐步减少, 所以处在前面的脉冲总是得到较大的增益. 造成上述结果的第二个原因是脉冲间隔较长. 例如 9 通放大器腔长为 55 cm, 两个脉冲相隔 14.8 ns, 前一个脉冲经过 8 次放大后下一个脉冲才开始通过晶体, 因为脉冲每通过晶体一次, 晶体的储能就减少一些, 所以前面的脉冲总是得到更多的增益. 第三个原因是晶体上能级的寿命, 室温条件下钛宝石晶体的寿命为 3.4  $\mu$ s, 在 ASE 较强时, 有效寿命更短. 晶体储能指数衰减, 所以位于后面的脉冲得到较小的增益.

从实验结果和分析中可知, 在多级放大器中, 一般只能得到一个幅度逐渐减少的脉冲序列. 采用较长的抽运脉冲、幅度逐渐增加的种子以及小的脉冲间隔这些手段, 可以使后续脉冲得到较大的增益, 从而产生更多脉冲数目的脉冲序列.

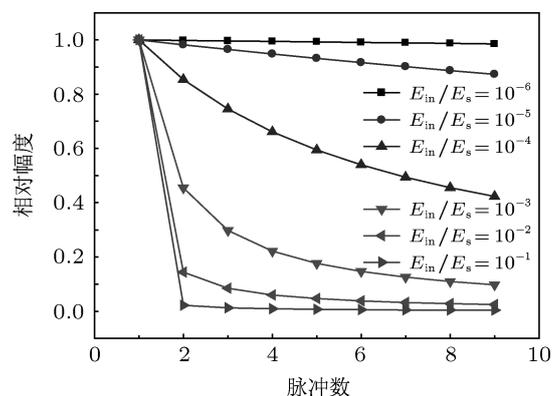


图 3 脉冲序列一次通过放大器后输出相对幅度

## 4 结论

在飞秒激光啁啾放大系统中, 可以实现高频率激光脉冲序列的放大. 在放大过程中, 调整种子脉冲序列的能量分布和抽运激光的延迟时间, 可以优化脉冲序列中脉冲的数量和能量. 最终产生的脉冲序列包含至少十几个脉宽约为 60 fs, 能量可达几毫焦耳的单脉冲. 此脉冲序列已在提高激光等离子体通道寿命的实验中得到应用.

- [1] Spence D E, Kean P N, Sibbett W 1991 *Opt. Lett.* **16** 42
- [2] Mourou G, Barty C P J, Perry M D 1998 *Phys. Today* **51** 22
- [3] Fermann M E, Galvanauskas A, Sucha G 2003 *Ultrafast Lasers—Technology and Applications* (New York: Dekker) p286
- [4] 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]
- [5] Liu Y Q, Tschuch S, Dürr M, Rudenko A, Moshhammer R, Ullrich J, Siegel M, Morgner U 2007 *Opt. Express* **15** 18103
- [6] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **56** 219
- [7] Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, Ma J, Inoue N, Ueda H, Kiriya H 2003 *Opt. Lett.* **28** 1594
- [8] Esser D, Rezaei S, Li J Z, Peter R, Herman, Gottmann J 2011 *Opt. Express* **19** 25632
- [9] Ji Z G, Zhu J B, Wang Z X, Ge X C, Wang W Y, Liu J S, Li R X 2010 *Plasma Sci. Technol.* **12** 295
- [10] Liu X L, Lu X, Ma J L, Feng L B, Ge X L, Zheng Y, Li Y T, Chen L M, Dong Q L, Wang W M, Wang Z H, Teng H, Wei Z Y, Zhang J 2012 *Opt. Express* **20** 5968
- [11] Ackermann R, Mechain G, Mejean G, Bourayou R, Rodriguez M,

Stelmaszczyk K, Kasparian J, Yu J, Salmon E, Tzortzakis S, Andre Y B, Bourrillon J F, Tamin L, Cascelli J P, Campo C, Davoise C, Mysyrowicz A, Sauerbrey R, Woste L, Wolf J P 2006 *Appl. Phys.* B **82** 561

[12] Chen X, Jiang H B, Gong Q H 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1482

[13] Teng H, Ma J L, Wang Z H, Zheng Y, Ge X L, Zhang W, Wei Z Y, Li Y T, Zhang J 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 014209

[14] Frantz L M, Nodvik J S 1963 *J. Appl. Phys.* **34** 2346

## Chirped pulse amplification of femtosecond pulse sequences in a Ti: sapphire laser\*

Ge Xu-Lei<sup>1)2)</sup> Ma Jing-Long<sup>2)†</sup> Zheng Yi<sup>2)</sup> Lu Xin<sup>2)</sup> Jiang Gang<sup>1)</sup>  
Li Yu-Tong<sup>2)</sup> Wei Zhi-Yi<sup>2)</sup> Zhang Jie<sup>2)3)</sup>

1) (*Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

2) (*Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

3) (*Key Laboratory for Laser Plasmas of Ministry of Education, Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

(Received 29 March 2012; revised manuscript received 16 May 2012)

### Abstract

An amplified femtosecond pulse sequence is generated in a multi-TW Ti: sapphire chirped pulse amplification system (JG-II facility). The pulse interval of the pulse sequence is 14.8 ns, corresponding to a frequency of 67.5 MHz. The compressed pulse sequence can reach 122 mJ in 19 independent pulses with a pulse width of about 60 fs. The energy of the pulses declines from 20 mJ to 0.5 mJ, corresponding to a peak power from  $10^{11}$  W to  $10^{10}$  W. The pulse sequence has important applications in lengthening the lifetime of the laser produced plasma channel in air and in microfabrication.

**Keywords:** pulse sequence, chirped pulse amplification, pockels cell

**PACS:** 42.55.-f, 42.60.-v, 42.65.Re

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10974250, 60978031).

† E-mail: majinglong@iphy.ac.cn