

飞秒超强激光多通预放大过程中的脉冲信噪比研究*

李伟昌¹⁾²⁾ 王兆华¹⁾ 刘成¹⁾ 滕浩¹⁾ 魏志义^{1)†}

1) (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)

2) (国防科学技术大学应用物理系, 长沙 410073)

(2010年7月9日收到; 2011年8月24日收到修改稿)

从啁啾脉冲放大的基本理论出发, 详细计算了啁啾脉冲在多通预放大中各个时间点的增益情况, 并设计了一个十通预放大器进行了实验研究. 结果显示, 在抽运通量为 1.6 J/cm^2 的非饱和放大情况下, 种子脉冲经过十通预放大之后信噪比由 10^{-5} 提高到 10^{-7} . 这表明在非饱和抽运通量下, 多通预放大器可以有效提高激光脉冲的信噪比.

关键词: 多通预放大, 信噪比, 飞秒钛宝石激光器

PACS: 42.65.Re

1. 引言

基于飞秒钛宝石激光啁啾脉冲放大(CPA)技术的不断发展, 迄今人们已经能在普通的实验室里产生峰值功率接近PW量级的飞秒超强激光^[1,2]. 相对于大型的高能量激光装置而言, 这种激光系统具有体积小、成本低、脉冲宽度窄、峰值功率高等优点, 因此是开展激光与物质相互作用研究的理想光源^[3,4]. 近年来, 这一领域的研究工作已经促成了包括强场物理、实验室天体物理、台面粒子加速物理等许多新学科的出现并取得了突破性的进展, 成为开创物理研究新领域的一个重要手段^[5-7]. 另外值得指出的是, 在峰值功率提高的同时, 针对应用物理研究对激光脉冲信噪比的要求, 人们也相继提出了许多新的技术方案, 如高信噪比的种子脉冲^[8]注入、环形腔再生放大^[9]、光参量CPA^[10]、双CPA^[11]、交叉偏振滤波^[12]等. 由于这些技术的成功应用, 国际上已实现信噪比达 10^{-10} 量级的亚毫焦激光放大能量输出^[13], 成为国际上最近飞秒超强激光研究的重要进展.

在采用CPA技术的常规飞秒激光放大器中, 脉冲的前沿和后沿会存在很强的放大自发辐射(ASE), 并能持续ns量级的时间长度. 虽然与主激

光脉冲相比 ASE 在强度上小五六个数量级, 但在超短超强激光脉冲与物质的相互作用中, 即使对于聚焦强度为 10^{15} W/cm^2 量级的主激光脉冲, 相应的 ASE 聚焦强度也可以达到 10^{10} W/cm^2 量级以上. 这样的激光强度足以产生预等离子体, 从而改变主脉冲与物质相互作用时所产生的等离子体的初始状态, 影响实验结果的准确性. 随着激光峰值功率的不断提高, 这一问题将会变得更加严重, 特别是对于PW级的激光脉冲, 高信噪比将是不能忽视的重要指标之一.

如何有效地提高超强激光系统的信噪比特性, 减小它对极端物理实验的不利影响, 是目前飞秒超强激光技术发展中的一个重要研究方向. 在CPA激光系统中, 噪声主要来自于预放大过程, 设计高信噪比的预放大器是提升整个激光系统信噪比的关键所在. 通常预放大器分为再生预放大和多通预放大, 再生预放大器输出激光的信噪比只有 10^{-5} , 而对于多通预放大, 在非饱和放大的情况下可以有效减少放大过程中的 ASE, 从而提高输出激光的信噪比. 为此本文模拟分析了多通预放大器在饱和放大和非饱和放大两种情况下, 种子脉冲在放大过程中信噪比的变化情况, 并搭建了一个工作在非饱和放大状态下的十通预放大系统, 实验测量了其输出激光脉冲的信噪比. 结果显示, 在非饱和放大的情

* 国家自然科学基金(批准号:10804128)、国家高技术研究发展计划(批准号:2009AA8044031)和国家重点基础研究发展计划(批准号:2007CB815104)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zywei@iphy.ac.cn

况下激光脉冲的信噪比提高了约两个数量级.

2. 多通预放大的理论模拟

多通放大过程是光场与受激发物质之间的相互作用过程,该过程可通过下列材料极化方程、麦克斯韦电场方程和粒子数反转方程来进行描述^[14]:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial z^2} + \frac{2}{T_2} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + \omega_a^2 \mathbf{P} = -KNE, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} - \mu_0 \alpha \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{N - N_e}{T_1} = \frac{2}{\hbar \omega_a} \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{E} 为放大光的电场分量, \mathbf{P} 为介质的共振跃迁极化矢量, α 为介质的损耗系数, n 为介质的折射率, $\hbar \omega_a$ 为跃迁能级的光子能量, N_e 为初始热平衡下反转粒子数, T_1 为纵向弛豫时间, T_2 为横向弛豫时间, ω_a 为受激发射的中心频率. 简化后放大光的传输方程为^[15]

$$\left(\frac{1}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} \right) I(z, t) = [\sigma N(z, t) - \gamma] I(z, t), \quad (4)$$

$$\frac{\partial N(z, t)}{\partial t} = -\frac{2\sigma}{\hbar \omega_a} N(z, t) I(z, t), \quad (5)$$

式中 γ 为介质内部线性损耗系数, σ 为跃迁发射截面. 热平衡时的系统粒子数变化方程为

$$\frac{\partial N_1(z, t)}{\partial t} = -\frac{n\sigma}{\hbar \omega_a} I(z, t), \quad (6)$$

$$\frac{\partial N_2(z, t)}{\partial t} = \frac{n\sigma}{\hbar \omega_a} I(z, t) + \frac{N_2}{\tau_R}, \quad (7)$$

式中 τ_R 为下能级态的衰变时间. 当 $\gamma = 0$ 时放大光通量方程为

$$J(z) = J_s \ln \{ (G(z) \exp[J(0)/J_s] - 1) \}, \quad (8)$$

式中 $G(z)$ 是小信号增益,

$$G(z) = \exp\left(\sigma \int_0^z n(\xi, 0) d\xi\right);$$

$J(z)$ 是光放大的光通量; J_s 是饱和通量, 它由增益介质特性决定. 另外还要引入增益恢复系数 P , 以弥补下能级弛豫时间对增益的影响. 介质各段上在放大前后的增益迭代关系为

$$g_{k+1} = g_k - P \Delta J_k / J_s, \quad (9)$$

$$G(z) = \exp(g(z)), \quad (10)$$

$$\Delta J_k = J_{k+1} T^{-1} - J_k, \quad (11)$$

式中 k 为放大次数. 在我们的放大装置中, 相邻放

大的时间间隔远小于下能级的弛豫时间, 可认为是完全未恢复, $P = 1$. 另外, 这里的 T 为单程损耗系数. 可得到迭代关系式

$$J_{k+1} = T J_s \ln \{ G_k [\exp(J_k / J_s) - 1] \}. \quad (12)$$

在模拟过程中, 理论公式(12)中 J_s , $J(z)$, $J(0)$ 的单位是 J/cm^2 , 因此为了模拟脉冲不同时间点的增益情况, 要知道各取值点的通量密度. 我们首先假设展宽后脉冲功率为高斯分布, 即

$$f(x) = a \exp(-x^2/c^2). \quad (13)$$

在每个取值点 0.1 ps 的范围内积分求得的能量再除以光斑面积就近似认为是该点的通量密度. 取种子脉冲能量为 2.5 nJ, 展宽后的脉冲宽度为 200 ps, 抽运光中心波长为 532 nm, 其在晶体上的光斑直径为 2 mm, 抽运通量为 $1.6 \text{ J}/\text{cm}^2$, 由此得到非饱和放大下的模拟结果如图 1(a) 所示. 结果表明, 种子光在放大过程中不同时间点的增益不同, 功率密度越高的点增益越大, 脉冲中心在放大过程中获得的增益要比边缘大两个量级. 例如, 在 -300 ps 处, 脉

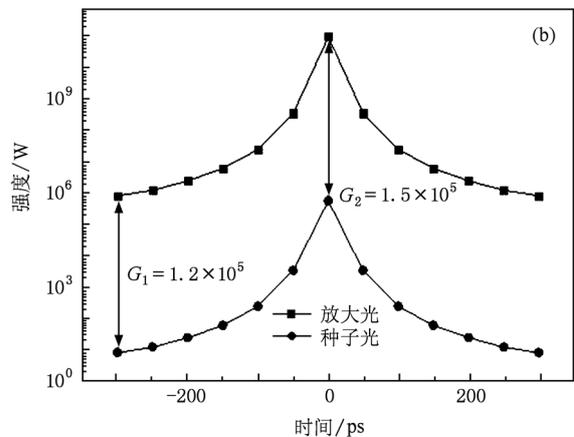
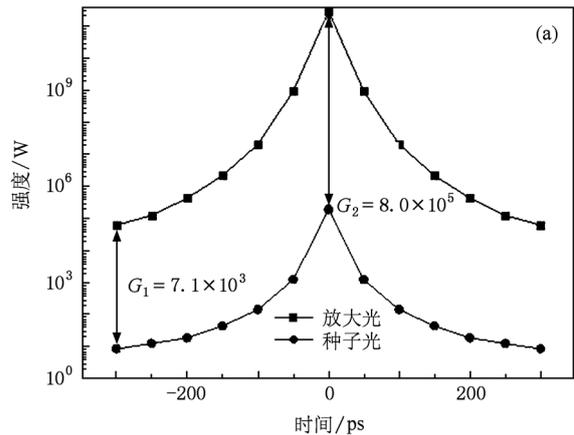


图 1 非饱和放大及饱和放大时不同时间点的脉冲增益 (a)非饱和放大,(b)饱和放大

冲增益系数为 7.1×10^3 , 而在峰值处, 增益系数为 8.0×10^5 . 因此, 最后经压缩器压缩之后脉冲的信噪比会相应提高两个量级. 另外, 在抽运通量为 2.0 J/cm^2 的饱和放大情况下, 模拟结果如图 1(b) 所示. 结果表明, 脉冲各个时间点的增益幅度基本一致. 例如, 在 -300 ps 处, 脉冲增益系数为 1.2×10^5 , 而在峰值处, 增益系数为 1.5×10^5 . 因此, 饱和放大对种子光的信噪比没有太大影响.

3. 十通预放大实验及数据分析

根据模拟条件我们搭建了一套十通的多通预放大系统进行实验. 该实验中使用的振荡器是一台自建的棱镜对补偿色散飞秒钛宝石激光器^[16], 其输出激光的重复频率为 80 MHz , 光斑直径为 2 mm , 单脉冲能量为 2.5 nJ , 输出脉冲的信噪比约为 10^{-5} . 振荡器输出的种子光注入一个 Martinez 展宽器, 展

宽器由一块 1200 刻线的光栅、一块大尺寸平面反射镜及一块凹面反射镜组成, 经过两次展宽后种子光脉冲被展宽至 200 ps , 然后种子脉冲进入十通的多通预放大器^[14]. 在多通放大器中, 采用四个曲率半径 $R = -500 \text{ mm}$ 的凹面镜作为反射镜, 每个反射镜都镀有 $700\text{--}900 \text{ nm}$ 的全反射膜, 使用的钛宝石晶体尺寸为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 并以布儒斯特角切割. 十通预放大的抽运源是一台闪光灯抽运的腔外倍频 532 nm 绿光激光器, 该激光器的重复频率为 10 Hz , 调节其输出能量, 分别将钛宝石晶体上的抽运通量控制在 $1.6, 2.0 \text{ J/cm}^2$ 进行非饱和放大和饱和放大实验. 实验光路如图 2 所示, 调节十通预放大的四个反射镜的姿态使得多次反射的种子光及抽运光汇聚在晶体同一点上, 此时有最佳的放大效果, 测得这时候的抽运脉冲能量为 50 mJ , 输出单脉冲能量为 1.5 mJ .

经多通预放大器放大的脉冲再经过一次常规

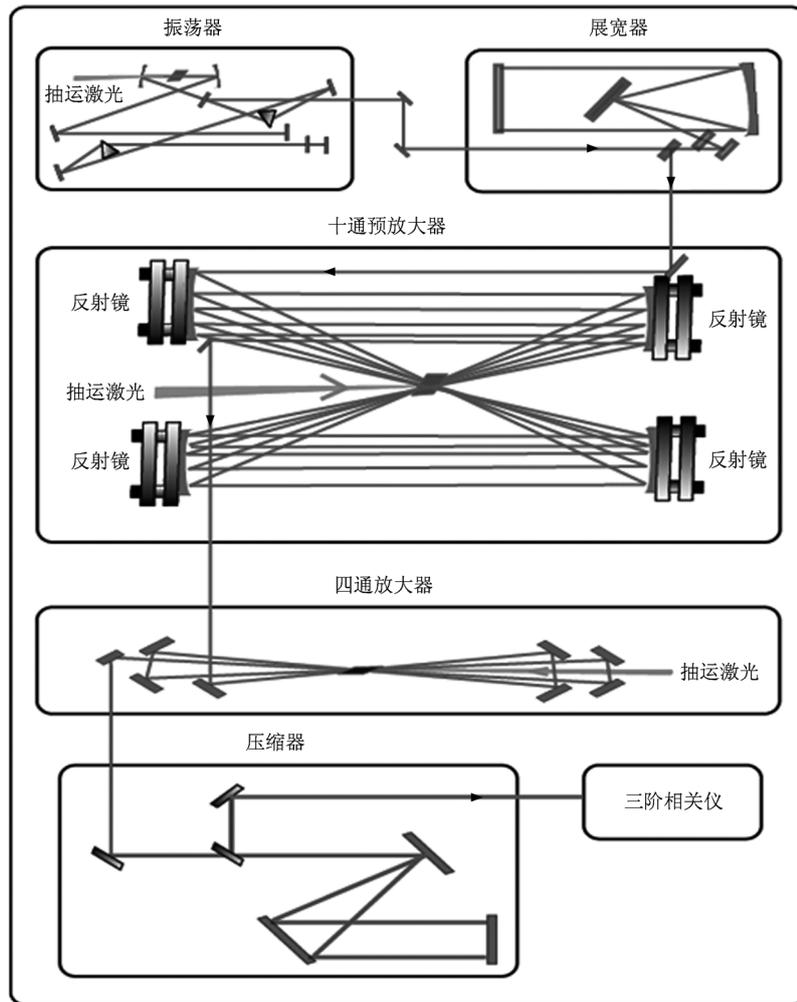


图 2 采用十通预放大的实验系统光路图

多通放大,使单脉冲能量提高到 10 mJ,再利用光栅对压缩器压缩后,用三阶相关仪测得非饱和放大(抽运通量为 1.6 J/cm^2)和饱和放大(抽运通量为 2.0 J/cm^2)情况下激光脉冲的信噪比,结果如图 3 所示.从图 3 可以看出:在非饱和放大情况下,脉冲信噪比由 10^{-5} 提高到 10^{-7} ,提高了两个数量级;而在饱和放大的情况下,种子光经放大之后信噪比仍为 10^{-5} ,没有明显变化.这与本文的模拟结果一致.

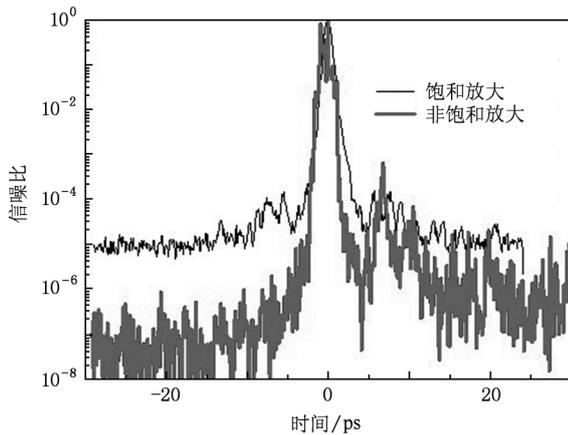


图 3 非饱和放大和饱和放大下的信噪比

4. 结 论

利用飞秒钛宝石振荡器输出的单脉冲能量为 2.5 nJ、中心波长为 800 nm、信噪比为 10^{-5} 的种子光,分别模拟了 CPA 中在非饱和放大和饱和放大两种情况下种子光在多通预放大过程中不同时间点的增益情况.模拟结果显示:在抽运通量为 1.6 J/cm^2 非饱和放大情况下,种子脉冲功率密度越高的位置增益越大,脉冲峰值处增益要比脉冲边缘大两个数量级.而在抽运通量为 2.0 J/cm^2 饱和放大情况下,种子脉冲在不同位置处的增益没有明显差异,放大过程对种子光的信噪比没有明显改善.相关实验结果表明,在非饱和放大情况下放大后的激光脉冲信噪比由 10^{-5} 提高到 10^{-7} ,而在饱和放大情况下放大后的激光脉冲信噪比仍为 10^{-5} .这说明在非饱和放大情况下,多通预放大器可以使飞秒激光脉冲的信噪比提高两个数量级.

感谢马燕云副教授、李玉同研究员和张杰院士对本文工作提出有益建议.

- [1] Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, Ma J, Inoue N, Ueda H, Kiriya H 2003 *Opt. Lett.* **28** 1594
- [2] Wei Z Y, Wang Z H, Wang P, Ling W J, Zhu J F, Han H N, Zhang J 2008 *J. Phys.* **112** 032003
- [3] Zhu B, Gu Y Q, Wang Y X, Liu H J, Wu Y C, Wang L, Wang J, Wen X L, Jiao C Y, Teng J, He Y L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1100 (in Chinese) [朱斌、谷渝秋、王玉晓、刘红杰、吴玉迟、王磊、王剑、温贤伦、焦春晔、滕建、何颖玲 2009 物理学报 **58** 1100]
- [4] Yan C Y, Zhang Q J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 322 (in Chinese) [闫春燕、张秋菊 2010 物理学报 **59** 322]
- [5] Mourou G A, Barty C P J, Perry M D 1998 *Phys. Today* **51** 22
- [6] Nomura Y, Horlein R, Tzallas P, Dromey B, Rykovanov S, Major Z, Osterhoff J, Karsch S, Veisz L, Zepf M 2009 *Nat. Phys.* **5** 124
- [7] Drake P R 2009 *Nat. Phys.* **5** 786
- [8] Itatani J, Faure J, Nantel M, Mourou G, Watanabe S 1998 *Opt. Commun.* **148** 70
- [9] Yanovsky V, Felix C, Mourou G 2001 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **7** 539
- [10] Herrmann D, Veisz L, Tautz R, Tavella F, Schmid K, Pervak V, Krausz F 2009 *Opt. Lett.* **34** 2459
- [11] Kalashnikov M P, Risse E, Schönnage H, Sandner W 2005 *Opt. Lett.* **30** 923
- [12] Chvykov V, Rousseau P, Reed S, Kalinchenko G, Yanovsky V 2006 *Opt. Lett.* **31** 1456
- [13] Jullien A, Albert O, Burgy F, Hamoniaux G, Rousseau J, Chambaret J, Augé-Rochereau F, Chériaux G, Etchepare J, Minkovski N, Sautel S M 2005 *Opt. Lett.* **30** 920
- [14] Zhang S K, Wen G Q, Zhou P Z, Wang X D, Man Y Z, Peng H S 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 908 (in Chinese) [张树葵、文国庆、周丕璋、王晓东、满永在、彭翰生 1997 物理学报 **46** 908]
- [15] Ling W J, Wang Z H, Wang P, Jia Y L, Tian J R, Wei Z Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1028 (in Chinese) [令维军、王兆华、王鹏、贾玉磊、田金荣、魏志义 2005 物理学报 **54** 1028]
- [16] Wei Z Y, Zhang J, Xia J F, Feng B H, Zhang X L, Qiu Y 2000 *Sci. China A* **30** 1046 (in Chinese) [魏志义、张杰、夏江帆、冯宝华、张秀兰、邱阳 2000 中国科学 A **30** 1046]

Contrast ratio of femtosecond ultraintense Ti:sapphire laser with multi-pass amplifier*

Li Wei-Chang¹⁾²⁾ Wang Zhao-Hua¹⁾ Liu Cheng¹⁾ Teng Hao¹⁾ Wei Zhi-Yi^{1)†}

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

2) (Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 9 July 2010; revised manuscript received 24 August 2011)

Abstract

According to the theory of chirped pulse amplification (CPA), we analyze numerically the gain characteristic of laser pulses in multi-pass amplifier. A CPA Ti:sapphire laser with 10-pass scheme is designed and built. The experimental result shows that the contrast ratio of the femtosecond pulse is obviously enhanced by two orders from 10^{-5} to 10^{-7} under a pump flux of 1.6 J/cm^2 . This work demonstrates that the contrast ratio of the amplified femtosecond laser pulse could be effectively improved by multi-pass preamplifier.

Keywords: multi-pass preamplifier, contrast ratio, femtosecond Ti:sapphire laser

PACS: 42.65.Re

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10804128), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA8044031), and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2007CB815104).

† Corresponding author. E-mail: zywei@iphy.ac.cn