

飞秒激光脉冲的高效率放大研究^{*}

魏志义, 张 杰, 夏江帆, 冯宝华, 张秀兰

(中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 北京 100080)

摘 要: 介绍了采用多通放大的飞秒脉冲掺钛蓝宝石激光放大系统, 分析讨论了提高放大效率及缩短脉冲宽度的技术方法。在仅用能量 290mJ 的倍频 Nd:YAG 激光泵浦下, 得到了输出峰值功率大于 1.4TW、脉宽 25fs、重复频率 10Hz 的超短超强激光脉冲。

关键词: 啁啾脉冲放大(CPA); 超强激光; 飞秒脉冲

中图分类号: TN 248.11

文献标识码: A

高强度超短激光脉冲的产生不仅是激光技术中的热点研究内容之一, 其器件也是 X 射线激光、实验室天体物理、惯性约束核聚变、激光粒子加速器、强场物理等前沿研究中最重要实验条件和手段^[1]。目前采用啁啾脉冲放大技术, 人们在普通实验室里所能产生的激光峰值功率已超过了 100TW^[2], 这种所占空间仅为“台面”尺寸的超短脉冲强激光系统不仅代表了激光技术研究中具有划时代意义的结果, 同时也促成了许多新学科的形成和发展。通常情况下, 借助缩短放大激光的脉冲宽度, 是提高峰值功率行之有效的技术手段, 然而由于增益介质的高阶色散及光谱窄化效应的限制, 放大脉宽短于 30fs 的研究仍是目前具有挑战性的课题。1996 年, Barty 等人借助再生放大方案控制光谱形状的技术, 首次报导了短于 20fs 的钛宝石激光放大结果^[3], 但这种方案由于再生腔中 F-P 等元件的引入, 不仅调节复杂, 增加了损耗, 而且经最后压缩后的脉冲光谱仍保留有凹陷结构, 特别是所用的再生方案具有材料色散大、稳定性差等缺点; 现有的多通放大方案虽然材料色散小, 但效率都比较低, 也没有解决光谱窄化效应的有效措施, 因此迄今采用多通结构放大压缩后的最好脉宽仍在 30fs 左右^[4]。本文将报导我们在通过特性化光谱形状、优化啁啾补偿、提高放大效率等途径解决上述问题的基础上, 采用国产元件为主研制成功的一台多通掺钛蓝宝石激光放大装置, 在 290mJ 的 532nm 激光泵浦下, 其可稳定地输出脉宽 25fs、峰值功率大于 1.4TW 的超强激光脉冲, 所占空间不足 3m²。

1 系统设计

图 1 为我们设计的实验装置图, 主要由自建的自锁模钛宝石激光振荡级、Offner 型无色差反射式脉冲展宽器、单脉冲选择器、共焦 8 通预放大器、5 通主放大器及脉冲再压缩器组成。其中振荡器的总腔长约 1.83m, 对应着 82MHz 的重复频率, 增益介质为 4mm 长的重掺杂掺钛蓝宝石晶体(上海光机所提供), 腔内啁啾由一对石英棱镜补偿, 在 5W 全固态 Millennia(S-P 公司)激光泵浦下, 其可输出脉宽 13fs、平均功率 550mW 的稳定锁模脉冲。该锁模激光经金属镜 M1、M2 反射后以 Littrow 角直接入射到刻线频率 1200/mm、衍射效率大于 90% 的全息光栅 G1 上, G1 及一对共心的镀金凹凸反射镜 M3 和 M4, 即所谓的 Offner 望远镜系统构成了无色差

^{*} 国家自然科学基金及国家 863 惯性约束聚变领域资助课题
1999 年 6 月 15 日收到原稿, 1999 年 9 月 10 日收到修改稿。第五届全国激光科学技术青年学术交流会优秀论文。
魏志义, 男, 1963 年 5 月出生, 博士, 副研究员

的脉冲展宽器,其中凹面镜 M3 的曲率半径为 1m,凸面镜 M4 的曲率半径为 0.5m。具体工作过程是:种子脉冲经光栅衍射后首先反射到凹面镜 M3 上,随后经凸面镜 M4 再反射回 M5 并返还到光栅 G1,从而形成一次展宽。为了复原光斑形状,一次展宽后的长条形光经 M5 反射后再次按原光路经光栅 G1 进入凹凸反射镜系统中,并在垂直方向错开一定位移,以便第四次经过光栅再经一次展宽并复原光斑形状后,能方便地通过 M5、M2 的边缘反射出展宽系统。

为了结合脉冲压缩器补偿系统的高阶色散,实验中我们在展宽器中另加入了一对布氏角切割的石英棱镜对(图中未画出)。展宽后的锁模序列脉冲经普克尔盒(P.C.)选单并保持与 10Hz 的倍频 Nd:YAG 泵浦激光同步,然后经 M6 反射注入到由两组共焦反射镜 M7、M8 组成的 8 通预放大系统中,其中 M7 的曲率半径为 1039mm,M8 的曲率半径为 931mm,由于这样的设计保证了光束的直径约以 1:1 的比例随放大次数逐程缩小,根据高斯光束聚焦的原理,因此晶体中的焦斑尺寸将逐程增大,从而有效地防止了传统方案中激光功率密度随放大次数增加而导致的饱和效应。此外每次放大后光斑在反射镜上的位置也自然分开,这样经 8 次往返后,预放大的光脉冲很容易由 M9 反射出预放大系统。为了避免主放大中可能引起的光破坏及饱和效应,离开预放系统的光脉冲先经过 M10、M11 反射扩束后进入主放大器进行 5 通放大,两级放大中所用钛宝石晶体的尺寸分别为 5mm×5mm×9mm 及 10mm×10mm×10mm,泵浦能量分别为 35mJ 和 255mJ。

最后放大输出的光进入同样刻线的光栅及其与矩形镜组成的脉冲压缩器中进行脉冲再压缩,经四次光栅衍射后,将给出光斑形状及脉宽基本复原的超强超短脉冲,脉冲宽度由自制的相关仪测量,光谱由美国 Ocean-Optics 公司的商用光纤光谱仪测量。

2 分析讨论

为了得到极短脉宽的放大结果,首先振荡器必须应有极窄的种子输出;其次放大系统的带宽必须足够宽,以保证放大后的光谱宽度足以支持压缩后所期望的脉宽;另外压缩器的啁啾设计要求能最大限度地补偿展宽器及放大光路中各元件引起的色散。为了获得高的放大效率,展宽器还应有足够高的展宽率,放大过程中的功率密度要保持在晶体的荧光饱和通量之下。针对这些要求,我们进行了以下几方面的理论分析及技术设计。

2.1 光谱形状的特性化设计

目前采用典型结构设计的自锁模钛宝石激光虽然可容易地获得约 10fs 的稳定锁模脉冲,但其准对称的形状经多次放大后,由于中间增益高于边缘,因此将不可避免的引起光谱窄化,从而限制了放大后所能得到的再压缩脉宽,为此我们通过特殊设计输出镜,在保持窄脉宽的同

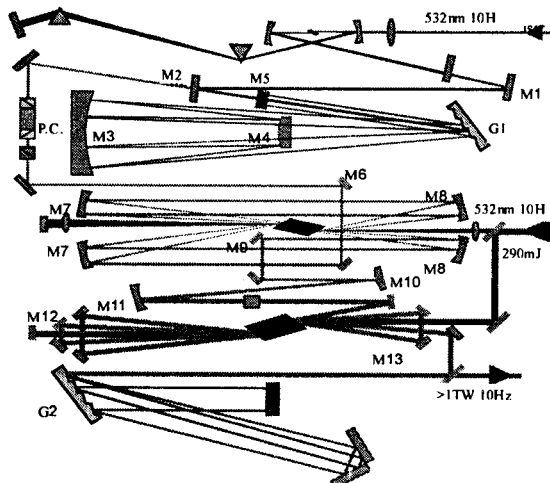


Fig. 1 Experimental setup of CPA Ti:Sapphire system
图 1 钛宝石激光放大系统实验装置图

时使其光谱具有马鞍形分布。图 2 为我们的典型结果,其半宽度约 120nm,自建的干涉相关仪测得的对应脉宽为 13fs。这样在放大过程中,靠近光谱中心的部分由于得到较大的增益,其能量增加的较快,而离中心较远的部分由于增益较小,能量的增强相对也较慢,最后经多次放大后,光谱形状逐渐演化成近高斯形状的正常分布,从而使光谱的窄化效应得到有效克服。

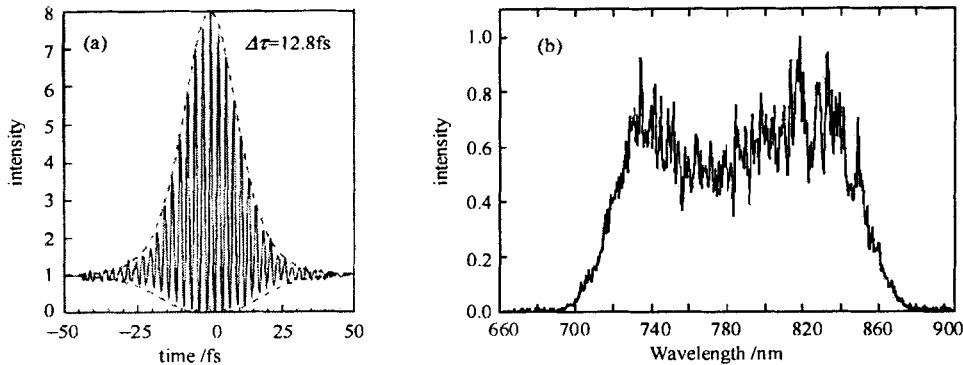


Fig. 2 The interferometric autocorrelation function of seeding pulses (a) and characteristic spectrum (b)

图 2 种子脉中干涉相关曲线(a)及特性化设计后的光谱曲线(b)

2.2 种子脉冲的有效展宽

为了使激光脉冲得到充分放大,其在放大介质中的功率密度必须维持在较低的状态,以免增益饱和引起的能量限制,常用的措施之一是展宽激光脉冲的宽度,二是增大光束的口径,对于脉宽为 τ_{in} 的无啁啾超短脉冲,其通过色散系统后的脉宽由下式表示^[5]

$$\tau_{out} = \tau_{in} \{1 + [7.68 \times (D_{\omega} / \tau_{in}^2)]\}^{1/2} \quad (1)$$

其中 D 为系统的二阶色散。由于光栅具有较大的色散,因此迄今为止基本上所有的脉冲展宽器及压缩器仍主要由光栅组成。尽管早在 60 年代 Treacy 就已获得了光栅压缩器色散的解析表达式^[6],但有关光栅展宽器色散的解析方程还未见报导,而对于产生短于 30fs 放大激光来说,展宽器色散的精确计算是非常重要的。采用光路追踪法,通过数学推导,我们得出宽带光脉冲经过光栅展宽器后的光程与波长的关系为^[7]

$$P(\lambda) = P_0 + \sqrt{4f^2 + (z - 2f)^2 \tan^2(\theta_{d_0} - \theta_d)} + \sqrt{4f^2 + (z - 6f)^2 \tan^2(\theta_{d_0} - \theta_d)} \\ + \frac{8f}{\cos(\theta_{d_0} - \theta_d)} + \frac{8f - 2z}{\cos\theta_d} [\sin(\theta_{d_0} - \theta_d) \sin\theta_i - \cos\theta_{d_0}] \quad (2)$$

其中 z 为光栅 G 到凹面镜的距离, f 为凸面镜的焦距, P_0 为与波长无关的常数, θ_{d_0} 为中心波长的衍射角,任意波长 λ 的衍射角 θ_d 与人射角 θ_i 的关系由衍射方程确定,对上式求二阶导数后,代入光栅常数 d 及中心波长,经优化参数后可得 $D_{\omega} = 4.4 \times 10^6 \text{ fs}^2$ 的色散量,代入(1)式并结合 13fs 的种子脉宽,得出展宽后的脉宽可达 930ps。

2.3 脉冲能量的高效放大

种子脉冲经过展宽和选单后,其单脉冲能量减小到了 0.5nJ 左右。由于预放大系统由两组曲率半径分别为 931mm 和 1039mm 的共焦反射镜组成,这样进入预放大后,聚焦在焦点的束腰直径约为 250 μm ,最后一次(第 8 次)放大后将增大到约 550 μm ,对应 mJ 量级的放大结果,其能量密度和峰值功率密度分别约为 0.4J/cm² 和 0.4GW/cm²,接近掺钛蓝宝石的饱和荧光通量(约 1J/cm²)但远低于产生非线性效应的阈值强度(约 5GW/cm²)。这种束腰尺寸随放大

次数增加的设计有效地减小了随能量逐次提高而可能引起的放大饱和效应及非线性效应，从而保证了能量的稳定增长。

考虑到实际光路中各次放大光束进入放大介质夹角的不同，泵浦光在晶体中的聚焦光斑应大于掺钛蓝宝石激光的聚焦光斑，由于元件选取的方便，实验中我们以 35mJ 的 532nm 激光用作前级泵浦，根据掺钛蓝宝石晶体约 $4\text{J}/\text{cm}^2$ 的经验破坏阈值，其聚焦后的光斑直径应大于 1mm，约为掺钛蓝宝石激光最大聚焦直径的 2 倍，在这种参数设计下经优化调节后得到了单脉冲能量大于 8mJ 的放大结果，对应着大于 10^7 的增益，这一结果远大于目前所见报导的再生及多通预放大结果^[2~4]。

同样考虑主放大中晶体的破坏阈值及荧光饱和问题，对于 255mJ 的泵浦能量，其光束直径应大于 3mm，对应此尺寸不超过荧光饱和通量的掺钛蓝宝石激光最大能量为 70mJ，由于经预放大后的光束直径减小到了 0.9mm 左右，为此我们在进入主放大之前先对光束进行扩束。经主放大系统 5 次放大后，光脉冲的能量达 62mJ。

2.4 啁啾色散的优化补偿

为了将两级放大后的光脉冲压缩恢复到接近种子脉冲的宽度，就必须精确设计调节光栅压缩器的人射角、光栅间的距离等参数，以尽可能充分地补偿展宽器及光路中包括掺钛蓝宝石晶体、普克尔盒等透射元件引起的啁啾及色散。结合我们获得的展宽器光程的解析式(2)和熟知的 Treacy^[6]公式以及材料色散的解析关系，采用光路追踪法计算了优化啁啾补偿所需要的各种参数，图 3 为在优化参数下得到的剩余相位延时与波长的关系，表明可理想地支持短于 20fs 的再压缩结果。

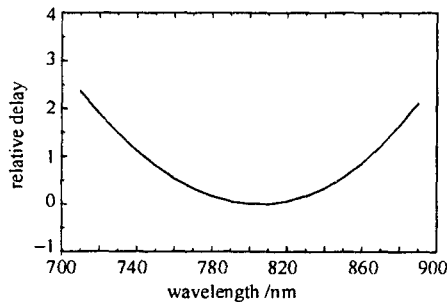


Fig. 3 Calculated phase delay with optimization compensation

图 3 系统剩余相位延时与波长的关系

采用与展宽器同样刻线频率的光栅组成的

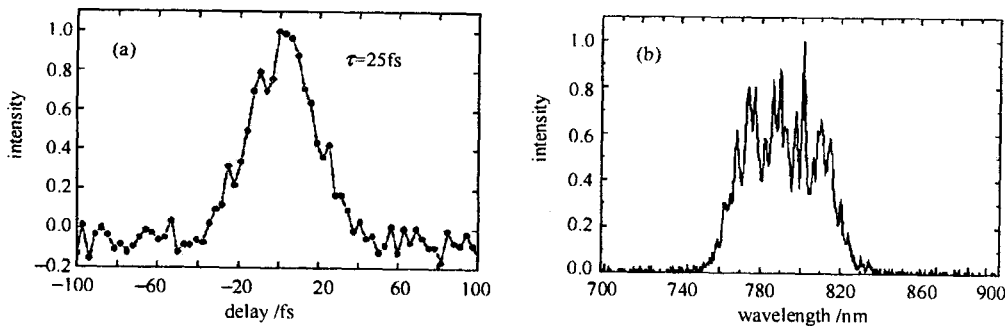


Fig. 4 The intensity autocorrelation function (a) and spectrum (b) after compression

图 4 压缩后的脉冲相关曲线(a)及光谱曲线(b)

单光栅压缩器，压缩之前先由一对反射式伽利略望远镜将光束扩束到 9mm。在最佳补偿参数设置下，经优化调节光栅的等效间隔、入射角及展宽器棱镜间距，测得了最短脉宽 25fs 的压缩结果，图 4 为相应的非共线相关曲线及光谱曲线，其约 50nm 的带宽说明克服增益窄化效应的

有效性。压缩后的单脉冲能量为 36mJ, 15min 内测量的稳定性约 $\pm 3\%$, 对应着 1.47TW 的峰值功率。

3 结 论

通过整形自锁模掺钛蓝宝石激光的光谱曲线, 严格推导脉冲展宽器的色散解析方程及色散计算, 优化放大效率等手段, 研制成功了一台全多通掺钛蓝宝石激光放大装置, 仅用 290mJ 的倍频 Nd:YAG 激光泵浦, 产生了峰值功率大于 1.4TW、脉宽 25fs、重复频率 10Hz 的超短超强激光脉冲, 目前的实验结果表明。进一步优化并取代一些元件后, 还可望获得单脉冲大于 40mJ、脉宽小于 20fs、峰值功率 2TW 的结果。

致谢 感谢本所杨国桢、张道中、聂玉昕的支持和上海光机所邓佩珍提供优质晶体及钱列加的有益讨论。杨鸿儒博士参与了部分工作。

参 考 文 献

- 1 Mourou G A, Barty C P J, Perry M D. *Physics Today*, 1998, **22**
- 2 Yamakawa K, et al. *Opt Lett*, 1998, **23**:1468
- 3 Barty C P J. *Opt Lett*, 1996, **21**:668
- 4 Antonetti A, et al. *Appl. Phys*, 1997, **B65**:197
- 5 Silvestri S De, et al. *Ultrafast Phenomena IV*. Berlin: Springer-Verlag, 1984
- 6 Treacy E B, et al. *IEEE of Quantum Electron*, 1969, **QE5**:454
- 7 Wei Z, et al. ILE-Symposium'99. Osaka University, Japan, 1999

EFFICIENT FEMTOSECOND Ti:SAPPHIRE SYSTEM WITH MULTIPASS AMPLIFICATION

WEI Zhi-yi, ZHANG Jie, XIA Jiang-fan, FENG Bao-hua, ZHANG Xiu-lan
Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences
P. O. Box 603-04, Beijing 100080

ABSTRACT: A femtosecond Ti:sapphire chirped pulse amplifier with multipass amplification was developed in this paper, new concepts on overcoming gain-narrowing and enhancing amplification efficiency are also introduced. Pulses of 25fs duration with 36mJ energy have been produced at repetition rates of 10Hz only under 290mJ doubled frequency Nd:YAG laser pump, which corresponds to 1.4TW peak power.

KEY WORDS: chirped-pulses amplifier; ultra-intensity laser; femtosecond laser pulse