

高效率太瓦级飞秒掺钛蓝宝石激光装置*

魏志义 张杰 夏江帆 冯宝华 张秀兰 邱阳

摘要 以国产元件为主自行研制建立的一台超强超短掺钛蓝宝石激光装置。通过飞秒脉冲振荡器、脉冲展宽器、预放大器等单元系统中的系列新设计,有效地减小了光谱窄化效应、种子脉冲展宽不足、材料色散等问题,在 290 mJ 的泵浦能量下,得到单脉冲能量 36 mJ、压缩脉宽 25 fs、峰值功率大于 1.4 TW、能量稳定度优于 $\pm 3\%$ 的高强度激光脉冲。系统的主放大效率大于 32%,占用尺寸不到 3 m²。

关键词 TW (太瓦) 飞秒激光脉冲 啁啾脉冲放大 掺钛蓝宝石

超短激光脉冲放大技术的研究一直是最令人感兴趣的内容之一。自从 1985 年 Mourou 等人提出啁啾脉冲放大 (CPA) 的概念以来^[1],超短脉冲激光的峰值功率得到迅速提高,特别是 1990 年 Spence 等人在掺钛蓝宝石激光中发现自锁模现象后^[2],结合大尺寸、高质量固体放大介质,超短激光脉冲的峰值功率不仅提高了 6~7 个数量级,而且变得更加实用、可靠,其体积也仅占台面尺寸。这些重大结果的取得为强场物理、超快光谱等新型学科的形成和发展提供了前所未有的机遇和条件,成为目前人们认识自然的重要手段。

以 CPA 技术为核心的台面飞秒(fs, 10⁻¹⁵s)钛宝石激光系统主要有两种类型,一种是高重复率(kHz)系统,主要用于探索、获取物质超快信息的研究,这类系统通常易于得到较好的稳定性及较短的脉宽,但峰值功率比较低^[3];另一种则是以追求高峰值功率为目标的低重复率(典型 10Hz)系统,主要用于 X 射线激光、团簇物理、激光粒子加速器、高次谐波等强场物理内容的研究,由于这类放大系统所提供的高强度激光能产生一些相关的极端物理现象,因此是更具挑战性的研究内容^[4],近几年来美国、日本、法国等国家通过采用超高能量的抽运源及压缩放大激光的脉宽,相继建成了峰值功率几十太瓦(TW, 10¹²W)的台面掺钛蓝宝石激光系统^[5-7],新近的世界纪录又达到了 100TW/19fs 的结果^[8]。但是,对于展宽器的像差、放大中的光谱窄化效应等问题,迄今仍缺少十分理想的解决方案,目前短于 30fs 的放大研究中预放大多为再生结构,不仅光谱窄化效应严重,而且材料色散大,不利于种子脉冲的有效恢复。

针对上述问题,本文通过飞秒脉冲振荡器、脉冲展宽器、预放大器等单元系统中的系列新设计,在有效解决光谱窄化效应、种子脉冲展宽不足等问题的基础上,以国产元件为主研制成功一台重复率 10Hz 的全多通台面啁啾脉冲放大激光装置,在 290mJ 的全抽运能量下,得到了大于 80mJ 的放大输出,对应的主放大效率达 32%。经脉冲压缩后进一步得到了脉宽 25fs,峰值功率 1.4TW 的结果,整体系统所占台面不到 3m²。

1 飞秒激光振荡器

我们设计的飞秒振荡器为典型的棱镜色散补偿自锁模掺钛蓝宝石激光器,结构如图 1 所示,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(中国科学院上海光学精密机械研究所提供),腔内啁啾由一对间隔为 54cm 的石英棱镜补偿,抽运源采用美国光谱物理(S-P)公

司的全固态 Millennia 激光，在 5W 的 532nm 激光抽运下，可稳定地产生脉宽 13fs，平均功率大于 550mW 的锁模脉冲。图 2(a)和(b)分别为采用非共线强度相关法测量的脉宽曲线和对应的光谱曲线，相应的脉宽和带宽分别为 13fs 和 80nm。

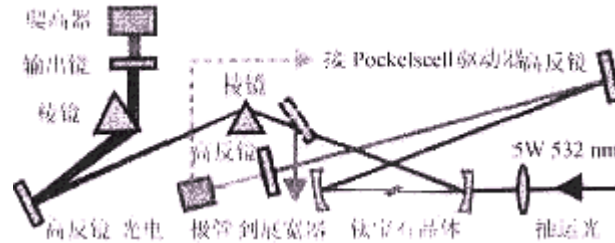


图 1 掺钛蓝宝石自锁模激光器结构图

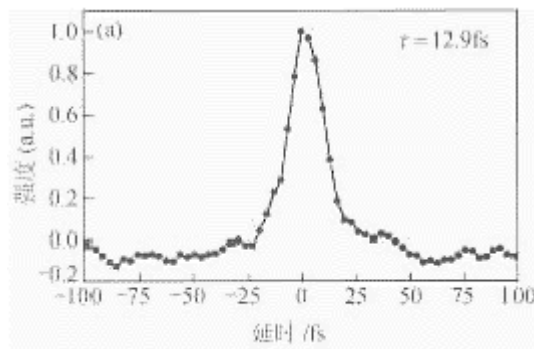


图 2 锁模光脉冲的相关(a)及对应的光谱(b)曲线

针对放大过程中普遍存在的光谱窄化效应，我们进一步通过选用特殊设计的输出镜及调整棱镜插入量，可将锁模光谱整形为中心具有凹陷分布（如图 3 所示，带宽已大于 120nm）的特殊曲线，这样在随后的放大过程中，靠近光谱中心的部分由于增益较大，其能量增加得较快，而离中心较远的部分由于增益较小，能量的增强相对较慢，最后经多次放大后，光谱形状逐渐演化成具有较宽带宽的 Gauss 分布，这种设计与 Barty^[6]等人通过在再生放大腔中加入 F-P 结构而整形光谱的方案相比，由于光谱整形直接从振荡器开始，因此不仅调节简单，无附加放大损耗等问题，而且补偿效果好，并能用于多通放大结构中（详细内容另文介绍）。

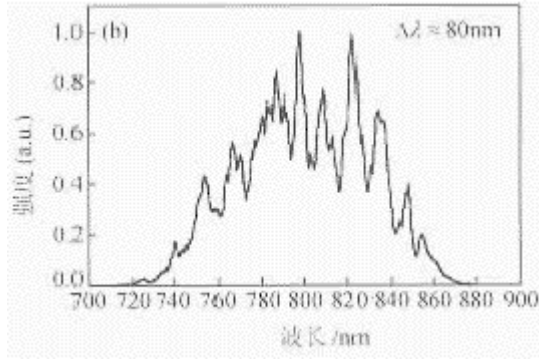


图 3 整形后的锁模光谱曲线

2 脉冲展宽器

为了消除像差并尽可能减小材料色散，实验中我们设计采用了以 f fner 望远镜为基础的无色像差脉冲展宽器^[9]，由一对共心的镀金凹凸反射镜和高效率的全息衍射光栅组成，如图 4 所示，其中凹面镜的曲率半径为 1m，凸面镜的曲率半径为 0.5m（中国科学院长春光学精密机械研究所加工），光栅常数为 1200 线（瑞典 SpectronAB 公司），其衍射效率大于 90%。为了补偿放大后的四阶色散，展宽器中我们同时加入了一对石英棱镜。具体的展宽过程是：种子脉冲经过反射准直后以 Littrow 角入射到衍射光栅上，衍射后的光束经凹面镜反射到凸面镜后再反射回凹面镜，然后以同样角度反射回光栅形成一次展宽。为了复原光斑形状，一次展宽后的长条形色散光经平面镜反射后再次按原光路经光栅进入凹凸反射镜系统中，并在垂直方向错开一定位移，这样经第 2 次展宽后，色散光束不仅复原为圆形光斑，而且能方便地由镀金反射镜反射出展宽系统。

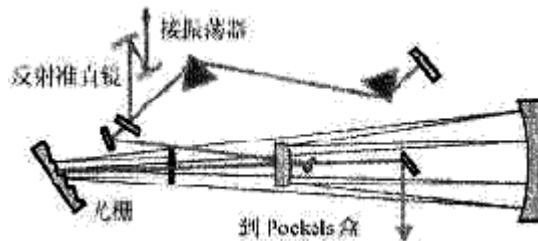


图 4 脉冲展宽器结构图

为了获得脉宽极短的放大结果，就必须精确平衡补偿展宽器、压缩器及光学透射材料之间的色散。采用光路追踪法，结合几何光学及光栅方程，可以得出宽带光脉冲经过展宽器的光程与波长具有如下的关系：

$$L(\lambda) = L_0 + \sqrt{4f^2 + (z - 2f)^2 \tan^2(\theta_{d0} - \theta_d)} + \sqrt{4f^2 + (z - 6f)^2 \tan^2(\theta_{d0} - \theta_d)} \\ + \frac{8f}{\cos(\theta_{d0} - \theta_d)} + \frac{8f - 2z}{\cos\theta_d} [\sin(\theta_{d0} - \theta_d) \sin\theta_i - \cos\theta_{d0}] ,$$

其中 z 为光栅 G 到凹面镜的距离, f 为凸面镜的焦距, L_0 为与波长无关的常数, d_0 为中心波长的衍射角, 任意波长 λ 的衍射角 θ_d 与入射角 θ_i 的关系由衍射方程确定, 考虑到高效率展宽的需要, 对上式进行二阶求导并经参数优化后, 可得 $\tau^{(2)} = 4.4 \times 10^6 \text{fs}^2$ 的二阶色散量, 取种子脉宽 $\tau_{in} = 13 \text{fs}$, 由^[10]

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

算得展宽后的脉宽 $\tau_{out} = 930 \text{ps}$ (由于没有相应的测量手段, 暂未作中间结果测量), 远大于常见的 200ps 左右的结果^[5,7].

3 脉冲放大器

3.1 预放大器

展宽后的锁模脉冲经 Pockels 盒 (P.C.) 选单并与 10 Hz 的倍频 Nd:YAG 抽运激光同步后, 先进入预放大器进行增益放大. 实验所设计的预放大器由两组曲率半径分别为 1039mm 和 931mm 的共焦全反射组成 (如图 5), 这种结构使得放大光束在晶体中的焦斑尺寸逐程增大, 从而能有效地防止常见方案中激光功率密度随放大次数增加而导致的饱和效应, 而且每次放大后, 光斑在反射镜上的位置自然分开, 这样经 8 次往返后, 放大的光脉冲很容易由另一平面全反镜反射出预放大系统. 实验中所用掺钛蓝宝石晶体的尺寸为 $5 \text{mm} \times 5 \text{mm} \times 9 \text{mm}$, 经展宽器及选单后进入放大器之前的单脉冲能量约 0.5 nJ , 4 个曲面镜的直径均为 25mm .

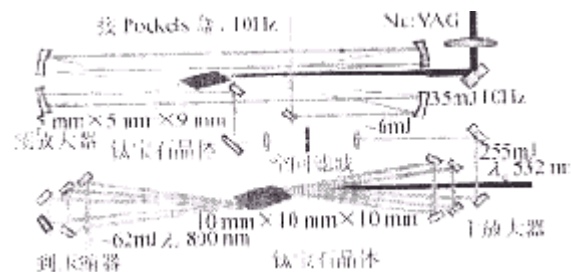


图 5 多通放大结构图

采用 35 mJ 的 532 nm 抽运能量, 经优化调节后, 所得的最大输出能量达 8 mJ , 对应的能量增益为 1.6×10^7 , 放大效率约 23% , 这一结果不仅明显高于常见的多通预放大结果^[4], 而且也接近再生放大的最好报道^[11], 这同时说明我们设计的高倍率脉冲展宽器及高效率预放大器是成功有效的.

3.2 主放大器

为了避免可能引起的光损伤及增益饱和效应并排除 ASE, 我们在主放大前首先采用一对石英透镜对光束进行准直并在焦点处插入针孔进行空间滤波. 主放大器为平面全反镜组成的五通结构, 滤波后的光脉冲在垂直方向以小角度反射进入晶体并由各全反镜多次反射进行放大, 所用掺钛蓝宝石晶体尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, Brewster 角切割, 抽运能量为剩余的 255 mJ , 在最优化调节

的情况下，五通放大后的最高能量达 82mJ，对应于 32%的效率。

4 脉冲压缩器

压缩器为单光栅及矩形全反镜结构，光栅常数同样为 1200 线/mm，为了将放大脉冲的能量降低到光栅的损伤阈值以下，压缩之前我们先用一对反射共焦望远镜将光斑直径扩束到 9mm，压缩后的光束由石英基片反射一部分后，进入相关仪进行脉宽测量，为了避免反射镜的光损伤，我们在控制放大能量 62mJ 的情况下，综合材料色散、展宽器色散并优化调节光栅等效距离及光束入射角后，得到了能量 36mJ，最短脉宽 25fs 的压缩结果，其所对应的光谱宽度为 50nm，峰值功率为 1.4TW，总的能量放大效率大于 12%，这一由于国产膜片破坏阈值所限未尽潜力的结果已与目前同类结构中所见报道的最好效率相当^[12]。图 6 为测得的自相关曲线及光谱曲线，其较宽而近对称的分布佐证了本文提出的通过整形种子脉冲克服光谱窄化效应的技术是一种行之有效的新方案。

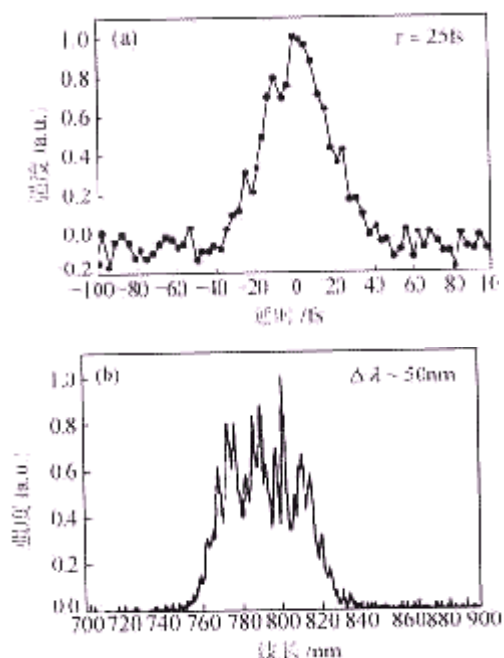


图 6 压缩后的脉冲相关(a)及光谱(b)曲线图

预热 0.5h 后的稳定性测量表明：15min 内能量稳定性约 $\pm 3\%$ ，在进一步的长时间运行内能量无明显起伏和下降。光束分布为均匀的近 TEM₀₀ 模，其远场发散角约 0.6mrad。

5 结论

我们通过整形自锁模掺钛蓝宝石激光的种子光谱曲线、采用高倍率无色像差脉冲展宽器、优化放大效率及高价色散补偿等技术手段，设计并研制成功一台太瓦级峰值功率的飞秒掺钛蓝宝石激光装置，在 290mJ 倍频 Nd YAG 激光抽运下，

该装置可高效稳定地产生能量大于 36mJ,脉宽 25fs,峰值功率 1.4TW,重复频率 10Hz 的超短超强激光脉冲.

致谢 杨国桢、张道中、聂玉昕研究员对本项研究给予了极大的支持和关心,杨鸿儒博士参与了部分工作,中国科学院上海光学精密机械研究所邓佩珍研究员提供了高质量的掺钛蓝宝石激光晶体,作者就有关问题与钱列加博士进行了有益的讨论,在此一并致以衷心的感谢.

国家自然科学基金(批准号: 19854001)及国家高技术委员会 863-416 主题资助项目

魏志义(中国科学院物理研究所光物理开放实验室,北京 100080)

张杰(中国科学院物理研究所光物理开放实验室,北京 100080)

夏江帆(中国科学院物理研究所光物理开放实验室,北京 100080)

冯宝华(中国科学院物理研究所光物理开放实验室,北京 100080)

张秀兰(中国科学院物理研究所光物理开放实验室,北京 100080)

邱阳(中国科学院物理研究所光物理开放实验室,北京 100080)

参 考 文 献

1, Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses. *Opt Comm*, 1985, 56: 219 ~ 222

2, Spence D E, Kean P N, Sibbett W. 60 fs pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt Lett*, 1991, 16(1): 42 ~ 44

3, 赵尚弘, 王屹山, 陈国夫, 等. 钛宝石飞秒激光脉冲的产生和高重复率放大及压缩实验研究. *中国科学, A 辑*, 1997, 27(12): 1 136 ~ 1 141

4, Mourou G, Barty C P J, Perry M D. Ultrahigh-intensity lasers: physics of the extreme on a tabletop. *Physics Today*, 1998, (1): 22 ~ 28

5, Antonetti A, Blasco F, Salin F, et al. A laser system producing 5×10^{19} W/cm² at 10 Hz. *Appl Phys B*, 1997, 65: 197 ~ 204

6, Barty C P J, Gordon III C L, Lemoff B E. Multiterawatt 30 fs Ti:sapphire laser system. *Opt Lett*, 1994, 19(18): 1 442 ~ 1 444

7, Itatani J, Nabekawa Y, Watanabe S, et al. Generation of 13 TW, 26 fs pulses in a Ti:sapphire laser. *Opt Comm*, 1997, 134: 134 ~ 138

8, Yamakawa K, Aoyama M, Matsuoka S, et al. 100 TW sub-20 fs Ti:sapphire laser system operating at a 10 Hz repetition rate. *Opt Lett*, 1998, 23(18): 1 468 ~ 1 470

9, Cheriaux G, Rousseau P, Salin F, et al. Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification. *Opt Lett*, 1996, 21(6): 414 ~ 416

10, Silvestri S De. Effects of cavity dispersion on femtosecond mode-locked dye lasers. In: Austin D H, ed. *Ultrafast Phenomena IV*; Berlin: Springer-Verlag, 1984. 23 ~ 24

11, Takeuchi S, Kobayashi T. Highly efficient Ti:sapphire regenerative amplifier. *Opt Comm*, 1994, 109: 518 ~ 526

12, Cha Y H, Kang Y, Nam C H. Generation of a broad amplified spectrum in a femtosecond terawatt Ti:sapphire laser by a long-wavelength

injection method. J Opt Soc Am B, 1999,16(8): 1 220~1 223