

## 高效率 1.4 TW 25fs 掺钛蓝宝石激光装置(极光 I 号)\*

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** 采用多通放大方案研制成功一台超强超短掺钛蓝宝石激光装置,整体系统以国产元件为主,占用空间不足 3 m<sup>2</sup>,在能量仅 290 mJ 的倍频 Nd:YAG 激光泵浦下,得到了单脉冲能量 36 mJ 脉宽 25 fs 对应峰值功率大于 1.4 TW 的输出.

**关键词** 啁啾脉冲放大(CPA),太瓦(TW),超强激光,飞秒脉冲

## AMPLIFICATION OF A Ti: SAPPHIRE LASER WITH 1.4 TW 25fs PULSES

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, Beijing 100080)

**Abstract** A TW level femtosecond Ti: Sapphire laser facility with multi-pass amplification has been developed at the Institute of Physics, CAS. As much as 36 mJ energy with 25 fs pulse duration is obtained with 290 mJ of 532 nm pump energy, equivalent to a peak output power of 1.4 TW.

**Key words** chirped-pulses amplifier, terawatt, ultra-intensity laser, femtosecond

追求高功率、短脉冲的结果一直是激光科学最具挑战性的研究内容.自从 1985 年美国密执安大学的 Mourou 等人提出超短激光脉冲的啁啾放大技术(CPA)以来<sup>[1]</sup>,超短脉冲激光峰值功率的提高取得了突破性的进展,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<sup>[2]</sup>,结合大尺寸、高质量固体放大介质,短短数年内激光的峰值功率不仅提高了 5—6 个数量级,而且结果也变得更加实用、可靠,体积也仅有台面大小,这些结果的取得不仅促进了激光技术的发展,而且也为强场物理、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.

传统的激光放大通常采用的是直接行波放大方式,但对于超短激光脉冲来说,随着能量的提高,其峰值功率将很快增加,并出现各种非线性效应及增益饱和效应,从而限制了能量的进一步放大.但是,如果在维持光谱宽度不变的情况下通过色散元件先将脉冲展宽,即成为所谓的“啁啾脉冲”,这样则在放大过程中即使激光能量增加很快,其峰值功率也能维持在较低的水平,从而避免了可能出现的非线性效应及增益饱和效应,保证了激光能量的稳定增长,最后当能量达到饱和放大后,借助与脉冲展宽色散相反的元件将脉宽压缩到原来的宽度,即可使峰值功率大大提高,这便是啁啾脉冲放大的一般原理.近

年来,美、法、日等国通过采用这一技术及超高能量的泵浦源,相继建立了峰值功率几十到上百瓦(即 TW, 1 TW = 10<sup>12</sup> W)的台面掺钛蓝宝石激光系统<sup>[3]</sup>,但是,这种高能量的泵浦源是以高强度的资金投入为基础的,因此这样的工作只局限在专门的国家级实验室.另一方面,如果有效地缩短放大激光的脉宽,则在能量相对较低、投资较小的情况下同样可得到高的峰值功率,尽管这种方案是提高放大效率的有效途径,然而由于光谱窄化效应及色散的不完全补偿,目前全世界仅有少数几个小组能做到小于 30 fs 的放大结果,而且前级方案基本上还是具有较大材料色散的再生方式,光谱窄化效应的减小主要通过放大腔内插入 F-P 标准具而实现,不仅调节复杂,而且也增加了损耗.

针对上述问题及开展强场物理研究的需要,我们立足自有技术及尽可能多的国产元件,通过对飞秒脉冲振荡器、脉冲展宽器、预放大器及脉冲压缩器的全新独立设计,最近研制成功一台峰值功率 1.4 TW、脉宽小于 25 fs 的高效率掺钛蓝宝石激光放大系统.其中振荡器为典型的棱镜补偿自锁模掺钛

\* 国家自然科学基金资助项目,国家高技术 863 - 416 基金资助项目

1999 - 10 - 28 收到初稿,1999 - 12 - 16 修回

蓝宝石激光器,晶体增益长度为4mm,总体腔长约1.83m,对应着82MHz的重复频率,泵浦源为美国S-P公司的全固化Millennia激光.在5W的连续532nm激光泵浦下,其可稳定输出平均功率550mW,脉宽小于13fs的飞秒光脉冲.考虑到放大过程中可能出现的光谱窄化效应,我们通过输出镜的特殊设计及改变棱镜的插入量,整形锁模光谱使其呈图1所示的超宽马鞍形分布(谱宽约120nm).这样,在随后的放大过程中,由于光谱中心相对两边具有较高的增益,因此随着放大次数的增加,中间凹陷的部分将逐渐超过两边,最后演化成具有较宽带宽的近高斯分布<sup>[4]</sup>,从而有效地克服了光谱窄化效应.我们采用的展宽器为无色差的Offner望远镜结构,其主要结构由一对曲率半径分别为1m及0.5m的共心镀金凹凸反射镜及1200线的全息光栅(瑞典Spectron AB公司制造)组成.数学模拟计算表明,13fs的种子脉冲经四次通过光栅系统后,其脉宽可以展宽到930ps,这一展宽的结果为能量的高效率放大提供了可行的基础.展宽后的脉冲进一步经过普克尔盒(Medox公司制造)选单及与290mJ的10Hz倍频Nd:YAG激光(GCR-150,美国S-P公司制造)同步后,进入八通预放大器进行放大.

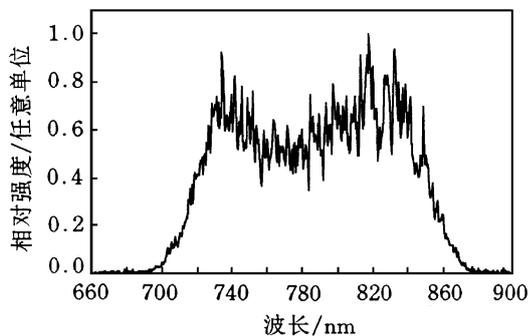


图1 整形后的种子脉冲光谱曲线

我们设计的八通预放为聚焦尺寸可变的共焦反射结构,其由两组曲率半径分别为1039mm和931mm,口径均为25mm的宽带全反射镜组成,这种设计不仅能有效地减小传统再生放大方案的材料色散,而且由于其聚焦光斑随放大次数而变大的特性,极大地克服了增益饱和和影响放大效率的问题,在35mJ的532nm激光泵浦下,获得的单脉冲放大能量达8mJ,这一结果明显高于目前所见报道的预放最好结果及效率<sup>[3]</sup>.随后经空间滤波并扩束后,进一步进入五通主放大系统.主放采用的掺钛蓝宝石晶体尺寸为 $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ ,并以布氏角切割,所用泵浦能量为255mJ,经优化调节后的最大放大结

果超过了80mJ,为避免对反射膜的破坏,通常情况下我们将其限制在65mJ左右.

脉冲最后的复原压缩采用典型的单光栅结构,结合色散计算及压缩参数优化调节,得到了脉宽小于25fs,单脉冲能量36mJ,对应峰值功率1.4TW的压缩结果.图2(a)为典型的相关曲线,对应的光谱如图2(b)所示,与种子光谱曲线相比,可以看出其不仅已演化为近高斯形状的正常分布,而且谱宽达50nm,比较理想地克服了光谱窄化的问题.

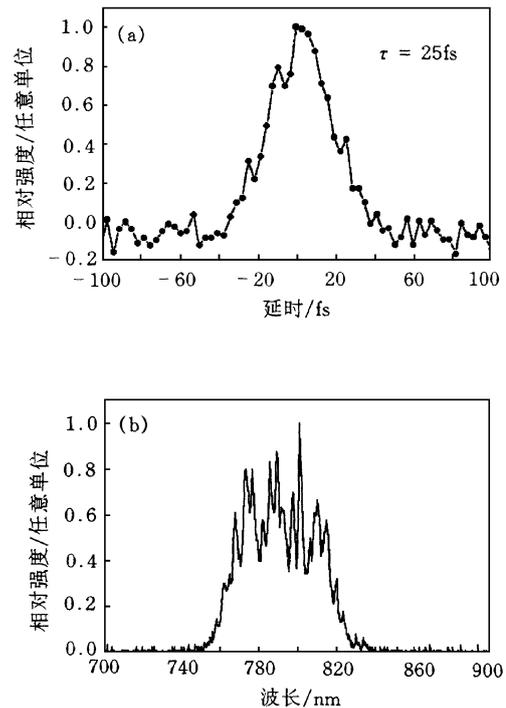


图2 放大脉冲压缩后的自相关曲线(a)及光谱曲线(b)

目前这台装置已开始运行工作,测试稳定性优于 $\pm 3\%$ .参考国内一些大型激光设备的名称,我们将其命名为极光I号,意喻这类系统极短的脉宽、极高的峰值功率、极紧凑的尺寸(台面)和可用于开展极端物理条件研究的特性.

致谢 感谢张道中、杨国桢、聂玉昕对本工作的支持及与钱列加博士进行的有益讨论,脉宽测量得到邱阳的大力协助,装置中的高质量掺钛蓝宝石晶体全部由上海光学精密机械研究所邓佩珍研究组提供.

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Strickland D, Mourou G, *Optics Comm.*, 1985, 56: 219—223
- [ 2 ] Spence D E *et al.* *Opt Lett.*, 1991, 16: 42—44
- [ 3 ] Yamakawa K *et al.* *Opt Lett.*, 1998, 23: 1468—1470
- [ 4 ] Wei Z, Zhang J, Xia J. Development on a 1 TW Ti: Sapphire Laser with sub-20fs Duration. In: CLEO' 99 Rim, Technical digest. Seoul, Korea. 1998, 294—295