

文章编号: 1001-3806(2003)01-0034-03

## 小型飞秒激光脉冲放大器

白晓东 周翔宇

(北京工业大学应用数理学院,北京,100022)

**摘要:** 在放大器谐振腔内插入一对棱镜,使飞秒脉冲信号边放大,边展宽。既防止了强光的自聚焦效应,又减小了整个放大器占用空间。输出光再经过另一对棱镜压缩,得到的脉宽小于 100fs,重复率 10kHz,平均功率达到 0.2W。

**关键词:** 飞秒再生放大器;棱镜展宽/压缩;自聚焦效应

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

### A compact femtosecond regenerative laser amplifier

Bai Xiaodong, Zhou Xiangyu

(Institute of Applied Science, Beijing Polytechnic University, Beijing, 100022)

**Abstract:** A compact all-solid-state Ti sapphire regenerative laser amplifier without pre-pulse stretching has been developed. Laser pulses are stretched two times every round trip by a pair of prisms inside the cavity. The re-compressed 100fs pulses at 10kHz repetition rates are generated. The average output power is more than 0.2W.

**Key words:** femtosecond regenerative amplifier; prism pair stretcher and compressor; self-focusing effect

### 引言

利用钛宝石(Ti sapphire)极宽的增益带宽特性获取飞秒激光脉冲已屡见报道<sup>[1]</sup>。但一般而言,该脉冲的能量较小(纳焦数量级)。若想得到较大的脉冲能量或峰值功率,需要将光脉冲放大。对超短脉冲放大的主要障碍是放大晶体在高能量超短脉冲的强光场中具有自聚焦效应,易使工作物质受到永久性损坏,从而失去放大作用。Strickland, Mourou 等人提出了超短脉冲放大技术(chirped pulse amplification)<sup>[2,3]</sup>。在超短脉冲种子光注入放大器之前,先利用光栅的群延迟色散效应(group-delay dispersion: GDD),将低能量的超短脉冲时域展宽,然后经过放大器得到高能量的激光宽脉冲,再通过光栅等器件对群延迟色散的补偿,将光脉冲重新压缩为窄脉冲。以此克服自聚焦损坏晶体的问题,使超短脉冲的放大成为可能。该方法现已得到广泛应用。

但光栅展宽器和压缩器有几个缺点:(1)光栅的衍射效率较低,使系统损耗增大;(2)光栅系统占用

空间较大(一般在米的数量级),不适合系统小型化;(3)光栅的调节较困难。为此,试用棱镜的 GDD 作为展宽器和压缩器,可以在一定条件下克服上述不足,设计出一种小型的、结构紧凑的飞秒放大器。

### 1 棱镜展宽器和压缩器

众所周知,时域高斯光脉冲通过非线性色散介质,其时域半峰值宽度(FWHM)  $t$  将发生变化。

$$t_{out} = t_{in} \sqrt{1 + (4 \ln 2 \phi / t_{in}^2)^2} \quad (1)$$

式中,  $t_{in}$  和  $t_{out}$  分别表示输入和输出的半峰值脉宽,  $\phi$  表示介质的二阶色散系数。

棱镜具有非线性色散机制。若两个棱镜对顶放置(如图 1),适当调节棱镜的间距和入射位置,既可以得到正的二阶色散,也可以

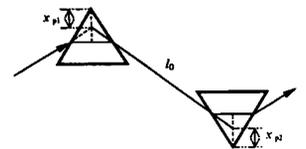


Fig. 1 The dispersion of prism

得到负的二阶色散<sup>[4,5]</sup>。棱镜顶角按最小色散且满足布儒斯特角设计,棱镜系统的二阶色散效应可以表示为:

$$\phi = \left. \frac{d^2 \phi_p}{d^2} \right|_0 = A_{11} l_0 + A_{12} x_p \quad (2)$$

式中,  $A_{11} = - \frac{4_0}{c^2} \left( \left. \frac{d^2}{d} \right|_0 \right)^2$ ,  $A_{12} = \frac{4_0}{c^2} \frac{1}{n_0^2 + 1} \times$

作者简介:白晓东,男,1947年4月出生。教授。现从事激光技术、近代高频技术、光通信方面的科研工作。

收稿日期:2002-01-15;收到修改稿日期:2002-03-28

$$\left\{ n_0 \cdot \left. \frac{d^2 n}{d^2} \right|_0 + \left[ n_0^2 + 1 - \frac{1}{n_0^2} \left( \left. \frac{dn}{d} \right|_0 \right)^2 \right] \right\}.$$

$x_p$  表示输入光到棱镜顶的插入量(见图 1)。 $l_0$  表示中心波长的光程长度。棱镜的  $A$  参数由材料决定。在实际光路中,光束的插入量为:  $x_p = x_{p1} + x_{p2}$ 。

由(2)式可以看出,调节  $l_0$  和  $x_p$  的长度就能控制棱镜系统的二阶色散(GDD)数值。如果光束在两个棱镜表面均以布儒斯特角入射,则可大大减少系统损耗。而且保证入射光和出射光相互平行。

棱镜的色散量一般比光栅小得多。但若将棱镜系统插入谐振腔内,光脉冲在腔内多次反射,总色散量可以累计达到要求。使用 SF6 棱镜作为展宽器,在中心波长为 780nm 时(fused silica SF6  $n = 1.78568$ ),计算棱镜的  $A$  参数见表 1。

Table 1 The parameter of prism SF6

	$A_{11}/(fs^2 \cdot cm^{-1})$	$A_{12}/(fs^2 \cdot mm^{-1})$
SF6	- 278.108	725.288

考虑到实验条件设定( $L_0 = 10mm$ ,  $x_p = 16mm$ ),以及放大腔中的其它光学元件的色散,计算出腔内单程二阶色散量,见表 2。

Table 2 The GDD of optics in cavity

	GDD/ $fs^2$
Ti sapphire	271.855
thin-film polarizer	482.269
Pockels cell	750.716
prism pair	8823.528
total (1trip)	10328.368

由此可得,为使种子光从 100fs 展宽到 6ps,以达到克服自聚焦效应的目的,需要让光脉冲在腔内往复 20 次左右(total (20trip)为 206567.36fs<sup>2</sup>)。

使用棱镜对也可以产生负的二阶色散,由于棱镜系统易于调节,可以比较容易得到适量色散值,完全补偿光脉冲在放大腔内的正二阶色散,从而恢复原脉冲宽度。实验中使用一对 SF59 晶体棱镜对脉冲进行压缩,补偿谐振腔内的二阶色散。在 780nm 条件下的  $A$  参数见表 3。

Table 3 The parameter of prism SF59

	$A_{11}/(fs^2 \cdot cm^{-1})$	$A_{12}/(fs^2 \cdot mm^{-1})$
SF59	- 559.374	1058.72

设定:  $L_0^p = 75cm$ ,  $x^p = 5mm$ 。可得出,脉冲通过棱镜压缩器单程产生的二阶色散约为 - 36659.45fs<sup>2</sup>。所以,为补偿谐振腔内的正的二阶色散,需要脉冲在棱镜对中震荡 6 次。为此,棱镜

SF59 压缩器两侧的反射镜在垂直方向上微微偏离平行态,使光脉冲经 3 次往返后偏离棱镜系统。

因为棱镜无法补偿谐振腔内的三阶色散,用棱镜压缩器代替光栅压缩器受到一定的局限。若光脉冲较窄,脉冲扩展时三阶色散不可忽略,采用棱镜压缩器不能完全奏效。因此,只有在不考虑三阶色散补偿的条件下,可以采用棱镜压缩器,发挥其损耗小、易调节、结构紧凑等优点。另外,由于棱镜系统单程的色散较小,难以迅速得到非常大的色散量。因此,棱镜系统的展宽器和压缩器只适用于百飞秒脉宽、泵浦功率几瓦的条件。如果脉冲更窄、泵浦功率更高,则仍应首选光栅系统实现展宽和压缩。

## 2 光路设计

飞秒放大器的光路如图 2 所示。放大器的泵浦源采用调 Q 倍频 YAG 准连续脉冲激光器,中心波长 532nm,脉宽 200ns,重复频率 10kHz,平均输出功率为 6W。输入种子光由锁模光纤激光器注入。脉宽约 100fs、重复频率 47.2MHz、平均功率 10mW。放大器前放置一块楔形透反镜,将短脉冲分为两束。一束作为种子光注入再生放大器,另一束由光电二极管采样检测。种子光两次通过法拉第旋光器后旋转为垂直偏振,由右侧偏振片(TFP)反射进入谐振腔。适当调制普克尔盒的电压,使种子光转换偏振方向,进入并保持在谐振腔内往返振荡。谐振腔中放置一对 SF6 棱镜,使光束以布儒斯特角入射。按照设计,适当调整棱镜的间距和插入量,使光脉冲在放大腔中边展宽边放大。再由普克尔盒控制选择,使光脉冲达到饱和,泄出谐振腔。输出光脉冲经过另一对 SF59 棱镜被压缩还原,最后得到高能量的飞秒脉冲(右侧输出)。

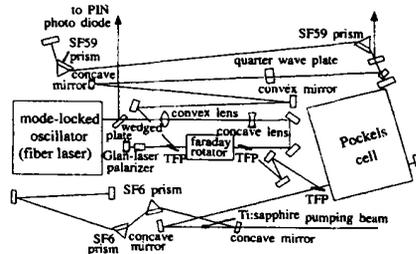


Fig. 2 Schematic of 10kHz Ti sapphire laser system

实验中还精心考虑了放大器的热透镜效应。将 Ti S 置于腔内透镜的焦平面之外。另外,泵浦光通过另一透镜的位置移动,可以调整泵浦脉冲入射时的光斑半径。若泵浦光在增益介质截面积适当减小,可使增益提高,光脉冲可以更快达到饱和,脉冲

在放大谐振腔中所需的往返次数也将减少。从而可以改变脉冲在展宽时的总色散量。

通过高速PIN管光电检测器可以监测光脉冲输入波形和输出波形。输入波形如图3所示,是典型的锁模脉冲列。

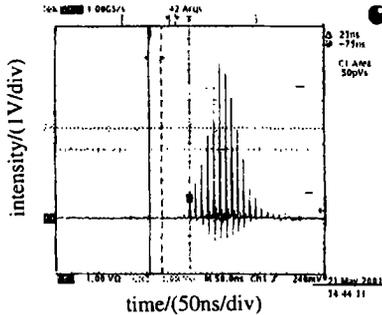


Fig. 3 The waveform of input pulse string

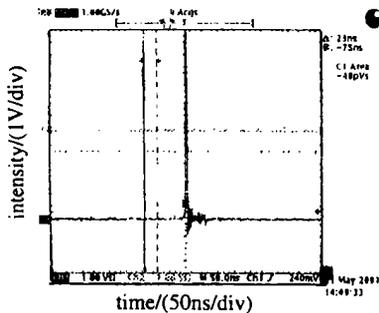


Fig. 4 The waveform of output single pulse

的放大时间大体是脉冲在谐振腔中往复20次的时间。基本达到增益饱和,脉冲能量最大。适时调整普克尔盒的电压,使最强的单脉冲被选出,输出谐振腔。图4所示为二极管光电检测器所观测到的从放大器中输出的单脉冲。

图5是通过二次谐波自相关法检测输出脉冲宽度。CCD检测器得到的放大器输出脉冲自相关倍频光实测曲线。由曲线的半峰值宽度可以得到光脉

冲宽度<sup>[6]</sup>。检测到的倍频光宽度为(80 × 19.6) μm。折合脉冲宽度为70fs。

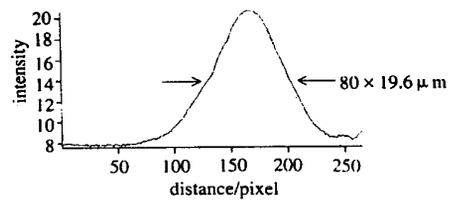


Fig. 5 The spatial of the second harmonic beam

本次实验设计了一套10kHz的无需腔外展宽的小型钛蓝宝石激光放大系统。此系统在6W的泵浦光激励下可以达到0.2W的输出功率,可用于放大光纤激光器所产生的100fs的短脉冲。由于全部使用棱镜组成展宽器和压缩器,整个系统结构紧凑、调节方便、光学损耗小。

上述实验是在渡部俊太郎教授的总体指导下,于东京大学物性研究所分光学部渡部实验室完成的。实验室提供了全部实验装置和经费。原渡部实验室的技官锅川康夫博士、富坚格博士在试验中也给予大量的技术指导和帮助。在此表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

[1] Spenc D E, Kean P N, Sibbett W. Opt Lett, 1991, 16:42 ~ 44.  
 [2] Zhou J, Huang C, Shi C *et al.* Opt Lett, 1994, 19:126 ~ 128.  
 [3] Strickland D, Mourou G. Opt Commun, 1985, 56:219 ~ 222.  
 [4] Gordon J P, Fork R L. Opt Lett, 1984, 9:153 ~ 155.  
 [5] Fork R L, Martinez O E, Gordon J P. Opt Lett, 1984, 9:150 ~ 152.  
 [6] Joo T, Jia Y, Fleming G R. Opt Lett, 1995, 20:389 ~ 391.

(上接第33页)

测量突破了传统对絮凝剂性能研究方法的局限,实现了对被测样品无扰的情况下,在纯水中自然状态下对絮凝剂颗粒分子量大小、颗粒形态结构和分布等参数的快速准确直接测定。通过将测得的絮凝剂特性参数与实际絮凝效果进行比较,并结合絮凝理论的分析表明:絮凝剂的粒度、分子量大小,及在水中的结构状态对絮凝剂的性能有决定性的影响。这些参数基本不随絮凝剂浓度的改变而发生变化。因此,絮凝剂浓度的改变在于改变絮凝剂沉降的核数,在确定了最佳投加量后其絮凝中心核数便也确定下来。调节水的PH值、改变搅拌方式等水力条件主要是促进与絮凝剂药品的充分反应。要提高絮凝剂的性能,减少因投加絮凝剂量而产生的对人体的二次危害,一个可行有效的途径是增加该絮凝剂的粒度和分子量。絮凝剂在水中的结构状态也是决定其

吸附架桥能力的重要参数,是否规整的结构较之无规结构更易产生吸附沉降有待进一步实验探讨。

### 参 考 文 献

[1] 郑淳之. 水处理剂和工业循环冷却水系统分析方法. 北京:化学工业出版社, 2000:288 ~ 365.  
 [2] 肖锦,周勤,孙伟 *et al.* 给水排水, 1999, 12(25):12 ~ 16.  
 [3] (美)德鲁化学公司. 工业水处理原则. 1984:105 ~ 266.  
 [4] Hiemenz P C. Principles of colloid and surface chemistry. USA: Marcel Dekkerinc, 1977:11 ~ 47.  
 [5] 彭进新编. 水质富营养化与防治. 北京:中国环境科学出版社, 1998:68 ~ 155.  
 [6] 汤鸿霄. 环境科学进展, 1993, 1(1):119 ~ 122.  
 [7] 邱中峙. 净水技术, 1991, 35(1):21 ~ 23.  
 [8] 何铁林. 水处理化学品手册. 北京:化学工业出版社, 2000:4 ~ 198.  
 [9] 陈积福,袁维颖. 工业水处理, 1995, 9(1):12 ~ 196.  
 [10] 黄耀熊. 生物物理学报, 1998, 13(4):172 ~ 178.  
 [11] 黄耀熊. 中国医学物理学杂志, 2000, 7(5):21 ~ 23.  
 [12] 黄耀熊. 物理化学学报, 1997, 13(2):8 ~ 17.