

# 基于交叉偏振波产生的脉冲净化技术研究与应用\*

王建州 黄延穗 许毅 李妍妍 陆效明 冷雨欣<sup>†</sup>

(中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

(2011年6月17日收到; 2011年8月28日收到修改稿)

本文利用交叉偏振波产生技术 (XPW) 对 800 nm 波段钛宝石飞秒激光器输出的激光脉冲进行时域净化, 提高脉冲时域对比度, 并测量验证了  $10^{11}$  对比度的脉冲, 达到测量仪器的动态范围极限, 比初始脉冲时域对比度有三个量级的提高, XPW 的效率为 22%. 同时发现净化后脉冲光谱宽度也得到一定展宽, 进一步利用啁啾镜对和补偿片对净化后的脉冲进行色散补偿, 得到 25 fs 脉宽的脉冲. 利用该净化后的激光脉冲作为种子注入已有的太瓦级钛宝石啁啾脉冲放大系统中, 在输出脉冲能量 250 mJ, 宽度 50 fs, 对应峰值功率 5 TW 的情况下, 在主脉冲前 100 ps 以外的范围内测量验证了  $10^{11}$  的脉冲对比度.

**关键词:** 脉冲净化, 交叉偏振波产生, 啁啾脉冲放大, 脉冲对比度

**PACS:** 42.65.Re, 42.60.By

## 1 引言

基于啁啾脉冲放大 (chirped-pulse amplification, CPA) 技术的小型化台式化超短超强激光系统的发展, 使得激光脉冲峰值功率从太瓦 (TW,  $10^{12}$  W) 向拍瓦 [<sup>1</sup> (PW,  $10^{15}$  W)] 推进, 聚焦峰值功率密度也达到  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>, 使得极端强场条件下的超快物理研究成为可能. 目前, 超短超强激光系统面临的主要难题之一就是如何提升超短超强激光脉冲的时域对比度. 脉冲的时域对比度通常定义为主脉冲峰值强度与预脉冲峰值强度的比值. 在激光与物质相互作用的过程中, 若预脉冲的聚焦强度达到  $10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> 时, 会在主脉冲到达靶面之前形成预电离 [<sup>2</sup>], 从而改变激光与物质相互作用的物理机理. 因此当主脉冲的聚焦强度达到  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 时, 为了防止预电离的形成, 要求脉冲时域对比度要大于  $10^{10}$ , 有些实验甚至要求更高的对比度 [<sup>3</sup>]. 但由于自发辐射放大 (amplified spontaneous emission, ASE) 等原因, 目前典型的超短超强激光系统的脉冲对比度 [<sup>4</sup>] 一般只能达到  $10^7$ , 难以满足相对论条件乃至更高量级激光强度下, 部分超短超强激光与物质相互作用实验对激光脉冲时域对比度的要求.

传统的钛宝石 CPA 激光系统以钛宝石飞秒振荡源做种子, 该种子脉冲能量低而且对比度也低, 不能抑制在放大过程中产生的自发辐射放大噪声, 难以满足发展高强度、高对比度钛宝石激光系统的需求. 目前, 很多产生高能量、高对比度种子脉冲的技术被用于 CPA 激光系统前端, 实现放大后脉冲时域对比度的提升, 包括可饱和吸收体 [<sup>5</sup>]、光学参量放大 [<sup>6,7</sup>] (optical parametric amplification, OPA) 和交叉偏振波 (cross-polarized wave, XPW) 产生等. 其中以交叉偏振波产生技术研究较多, Julien 小组 [<sup>8-10</sup>] 和 Chvykov 小组 [<sup>11</sup>] 的工作对 XPW 技术的发展做出了卓越的贡献. 在他们的努力下, XPW 技术由单块晶体低转换效率发展到两块晶体较高转换效率, 直到大量应用于高峰值功率超短超强 CPA 激光系统前端. 但在国内, XPW 脉冲净化技术及其在超短超强激光系统中应用的研究尚处于起步阶段 [<sup>12</sup>].

本文描述了我们搭建的一个基于 XPW 技术的脉冲净化装置. 输入  $10^8$  对比度的飞秒激光脉冲, 经净化后测得脉冲对比度为  $10^{11}$  (达到三阶自相关仪的动态范围极限), 脉冲对比度实现了三个量级的提升. 利用啁啾镜对和石英片对脉冲净化装置

\* 中国科学院, 国家自然科学基金 (批准号: 10734080, 60921004, 60908008, 61078037), 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB808101), 国际科技合作计划 (批准号: 2011DFA11300) 和上海科委科技基金 (批准号: 09QA1406500) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: lengyuxin@mail.siom.ac.cn

输出的脉冲进行压缩, 压缩后的脉冲宽度接近傅里叶变换极限. 将净化后的高能量高对比度脉冲引入 TW 级钛宝石 CPA 系统进行放大, 压缩后脉冲能量为 250 mJ, 脉冲宽度约为 50 fs, 对应的峰值功率约为 5 TW, 并在主脉冲前沿 100 ps 以外范围内实现了  $10^{11}$  的对比度.

## 2 XPW 脉冲净化的理论分析

自从 XPW 这一三阶非线性效应被发现<sup>[13]</sup>后, 它就引起了研究人员的广泛关注. 基于 XPW 的脉冲净化技术是利用晶体产生交叉偏振波的三阶非线性效应与输入光的峰值功率密度三次方成正比, 来实现对比度的提高, 其中常用的晶体是 BaF<sub>2</sub> 晶体. 脉冲经过 BaF<sub>2</sub> 晶体时, 只有峰值功率密度高的主脉冲发生非线性相互作用, 产生同波长的正交偏振光通过检偏器, 而未发生非线性效应的 ASE 平台光则不能通过检偏器. 这样就达到了时域滤波的效果, 从而实现脉冲对比度的提高.

XPW 这一三阶非线性过程, 可以分成两个连续的二阶非线性过程. 当输入光为寻常光 (o 光) 时, 有两种可能的连续的二阶非线性过程得到同波长正交偏振波: 1)  $o_1o_1 \rightarrow e_2$  (负单轴 I 类匹配),  $e_2o_1 \rightarrow e_1$  (负单轴 II 类匹配); 2)  $o_1o_1 \rightarrow o_2$  (准相位匹配),  $o_2o_1 \rightarrow e_1$  (正单轴 II 类匹配); 二者都等价于三阶非线性过程  $o_1o_1o_1 \rightarrow e_1$ . 而这两种组合中相位匹配又有三种情况: 1) 两个连续的二阶非线性过程只有一个满足相位匹配; 2) 两个连续的二阶非线性过程同时满足相位匹配; 3) 只有等价的三阶相互作用过程满足相位匹配. 实验中就是利用的第三种相位匹配过程.

XPW 过程中, 设基波振幅为  $A$ , 通过自相位调制产生正交偏振波振幅为  $B$ , 忽略过程中  $B$  的自相位调制和两光波的交叉相位调制, 且  $|B| \ll |A|$ , 则入射波和正交偏振波的振幅演化方程<sup>[14]</sup>如下:

$$\frac{dA}{dz} = i\gamma_1 |A|^2 A, \quad (1a)$$

$$\frac{dB}{dz} = -i\gamma_2 |A|^2 A, \quad (1b)$$

其中

$$\gamma_1 = \gamma_0 [1 - (\sigma/2) \sin^2(2\beta)],$$

$$\gamma_2 = -(\sigma/4)\gamma_0 \sin(4\beta),$$

$$\gamma_0 = (6\pi/8n\lambda)\chi_{xxxx},$$

$$\sigma = (\chi_{xxxx} - 2\chi_{xyyx} - \chi_{xyyy})/\chi_{xxxx},$$

$\beta$  为入射波偏振方向与晶体 [100] 方向的夹角,  $n$  为晶体折射率,  $\lambda$  为入射光中心波长,  $\chi_{xxxx}$ ,  $\chi_{xyyx}$ ,  $\chi_{xyyy}$  为晶体三阶极化率张量的对应元素.

根据方程 (1) 和初始条件  $A(0) = A_0$  (令为  $A_0$  实数),  $B(0) = 0$  可解得

$$A(z) = A_0 \exp(-i\gamma_1 |A|^2 z),$$

$$B(z) = (\gamma_2/\gamma_1) A_0 [\exp(-i\gamma_1 |A|^2 z) - 1].$$

基波转化为正交偏振波的效率为 ( $L$  为晶体长度)

$$\eta = \frac{|B(L)|^2}{|A(0)|^2} = \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)^2 [-\exp(i\gamma_1 |A|^2 L) - 1]^2.$$

由此可见, 若选用 [001] 方向切割的 BaF<sub>2</sub> 晶体, 以及入射激光中心波长 800 nm, 转换效率主要与晶体厚度  $L$ , 入射波偏振方向与晶体 [100] 方向的夹角  $\beta$  有关. 因此实验中应选择合适的晶体长度及旋转晶体的角度, 使正交偏振波转换效率最大. 针对本实验中激光参数, 脉宽 50 fs, 选取厚度为 2 mm 的两块 BaF<sub>2</sub> 晶体作为 XPW 的非线性工作介质.

## 3 基于 XPW 的脉冲净化实验

此脉冲净化实验在一台商品化的钛宝石飞秒激光器 spitfire(spectra physics) 上进行. 此激光系统提供中心波长 800 nm, 最窄脉冲宽度 ~35 fs, 重复频率 1 kHz, 最高输出能量 4 mJ 的激光脉冲. 水平偏振态的光脉冲经衰减后聚焦, 透镜焦距  $f = 1700$  mm, 后面用一凹面反射镜准直, 厚度为 2 mm 的两块 BaF<sub>2</sub> 晶体置于焦后, 为防止焦点附近成丝, 让焦点落在真空管内. 偏振方向正交的两块偏振格兰棱镜 (棱镜消光比好于  $10^{-5}$ ) 置于晶体前后, 正交偏振棱镜对的消光比直接决定未发生正交偏振波产生的背景光的抑制效率, 从而决定了整个脉冲净化器对比度提高的上限. 实验装置如图 1 所示. 实验中采用两块 BaF<sub>2</sub> 晶体, 是由于光经过晶体时不仅有正交偏振波这一种非线性效应发生, 基波还会发生非线性偏振旋转效应, 使  $\beta$  偏离最大转换效率时的角度  $\beta_{opt}$ . 使用两块晶体就可以通过旋转第二块晶体使旋转后的基波偏振方向与第二块晶体的 [100] 方向夹角为  $\beta_{opt}$ , 从而实现更效率的正交偏振波输出. 净化后的脉冲经啁啾镜对和熔融石英片压缩后通过单发二阶自相关仪测量二阶自相关曲线来得到脉冲宽度<sup>[15]</sup>, 并用三阶自相关仪测三阶自相关曲线来分析脉冲的时域对比度<sup>[16]</sup>.



XPW 过程对入射脉冲的光谱具有展宽效应, 也不会引入明显的光谱畸变, 引入的二阶色散可以通过简单的色散补偿手段抵消, 因此可以得到比入射脉冲更短脉冲宽度. 当输入脉冲光谱宽度足够时, 如将 XPW 技术用于已有的周期量级激光脉冲系统中<sup>[17]</sup>, 可以支持 10 fs,  $10^{11}$  对比度的超短脉冲输出. 文献[18]采用 XPW 技术得到亚 10 fs 净化脉冲.

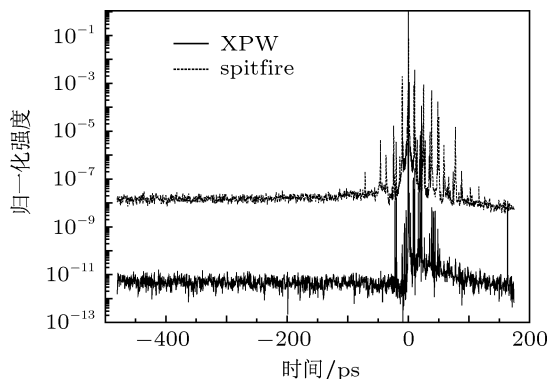


图3 净化前后脉冲对比度比较 (图中虚线是 spitfire 输出脉冲的三阶自相关曲线, 实线是净化后脉冲的三阶自相关曲线)

用三阶自相关仪测得 spitfire 激光器输出脉冲 (图 3 中虚线) 和经过脉冲净化装置后输出脉冲 (图 3 中实线) 的三阶自相关曲线, 并对初始脉冲

和净化后的脉冲对比度进行比较. 从图中曲线可以看出, spitfire 激光器输出脉冲前沿对比度在百皮秒外小于  $10^8$ , 净化后脉冲前沿对比度在百皮秒外测量达到了  $10^{11}$ , 这已经达到三阶自相关仪的动态范围极限. 净化前后脉冲对比度有三个量级的提升. 与传统的飞秒振荡器相比, 基于 XPW 技术的脉冲净化装置输出的脉冲具有高能量 (100  $\mu$ J) 和高对比度 ( $10^{11}$ ) 的特性, 更适合作为高强度、高对比度钛宝石啁啾脉冲放大激光系统的种子源.

#### 4 净化后的脉冲放大

文献[4]报道了 CPA 系统中注入种子脉冲的能量与放大后脉冲对比度的关系. 文中指出, 随着注入种子脉冲能量的增大, 放大后脉冲 ASE 平台处对比度会逐步从  $10^6$  提高至  $10^8$ . 但该文献中所用的是钛宝石自锁模飞秒振荡器输出脉冲作为种子光, 种子光本身的低能量和低对比度直接影响了对比度的进一步提高. 现将经过净化后的高能量高对比度脉冲作为种子引入 TW 级钛宝石 CPA 放大系统进行放大并研究放大后的脉冲对比度, 光路结构框图如图 4.

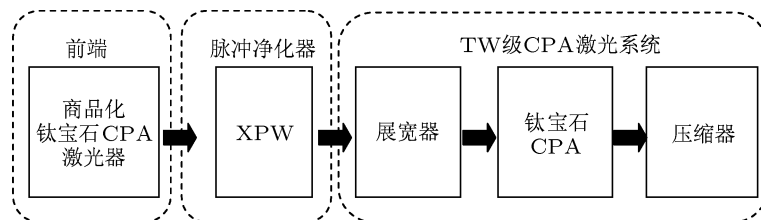


图4 净化后脉冲放大光路结构框图

将 XPW 净化得到 60  $\mu$ J 脉冲, 输入 TW 级 CPA 系统放大. 放大时先经 Offner 展宽器展宽至数百皮秒, 然后注入再生腔进行再生放大, 再经两级多通放大后输出 500 mJ, 10 Hz 的脉冲, 最后经光栅压缩器压缩. 输出脉冲能量 250 mJ 脉冲宽度为 50 fs, 脉冲峰值功率达 5 TW. 其中作为种子的净化后脉冲能量只有 60  $\mu$ J 而不是最佳交叉偏振波产生效率时的 100  $\mu$ J, 是因为 XPW 脉冲净化器工作在最大效率时, 输出脉冲能量稳定性不太好, 而工作在 60  $\mu$ J 输出时, 输出脉冲能量的稳定性有很大的改善, 不会对后续放大的稳定性造成影响.

净化后脉冲作为种子经 TW 级 CPA 激光系统

放大后脉冲的三阶自相关曲线 (图 5 中实线) 与飞秒振荡源输出脉冲作为种子经 TW 级 CPA 激光系统放大后脉冲的三阶自相关曲线 (图 5 中虚线) 相比, 在主脉冲前沿 100 ps 之外净化后的种子脉冲在放大后的对比度仍保持在  $10^{11}$ , 这说明经 XPW 净化后的高能量高对比度的种子脉冲能有效地抑制 CPA 放大过程中产生的自发辐射放大噪声, 从而维持自身的高对比度. 而主脉冲前沿 100 ps 范围内的对比度的下降则可能是由展宽压缩过程中的剩余高阶色散和放大过程中产生的位相畸变造成的<sup>[19]</sup>.

相对于可饱和吸收体, 利用交叉偏振波产生技

术对超短激光脉冲进行净化,可以在较大范围明显提高脉冲对比度的同时不引入明显的脉冲光谱畸变.而相对基于 OPA 技术的脉冲净化方式,XPW 脉冲净化器结构简单,调节方便,转换效率(达 22%)也比多级 OPA 脉冲净化器效率高,且 XPW 技术对入射脉冲光谱的展宽使其可以得到比输入脉冲更短的脉冲宽度.因此基于 XPW 技术的脉冲净化装置可作为优质前端用于发展高强度高对比度的钛宝石超短超强激光系统.

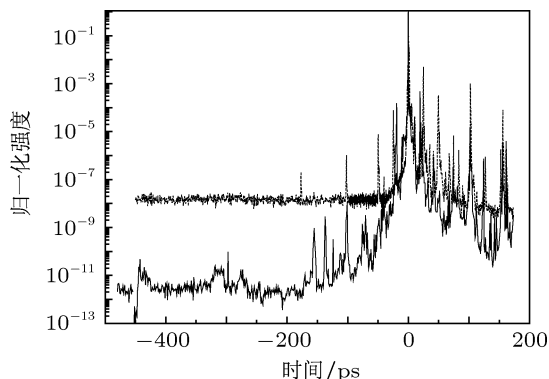


图 5 净化后脉冲作为种子(实线)和飞秒振荡源输出脉冲作为种子(虚线)经 TW 级 CPA 激光系统放大后的三阶自相关曲线比较

## 5 结论

通过实验研究了基于交叉偏振波产生的脉冲净化技术,净化后脉冲在主峰前沿 50 ps 以外的对比度在都优于  $10^{11}$ ,达到三阶自相关仪的动态范围极限,比初始脉冲对比度有三个量级的提高. XPW 脉冲净化技术基于三阶非线性过程,理论上可以将脉冲时域对比度提高到基波时域对比度的三次方,即对于  $10^8$  对比度可以提高到  $10^{24}$ . 在本文中,由于受到测量仪器动态范围的限制,同时受到起偏检偏棱镜消光比的限制,只测到  $10^{11}$  对比度,实际基于 XPW 技术有可能可以实现更高对比度脉冲输出.

净化后 60  $\mu\text{J}$  脉冲作为种子注入 TW 级钛宝石 CPA 系统,放大后的脉冲在主峰前沿 100 ps 外的对比度为  $10^{11}$ ,能量为 250 mJ,脉冲宽度为 50 fs,对应的峰值功率为 5 TW. 实验证明,XPW 脉冲净化技术是一种简单、可靠、高效的脉冲净化技术. XPW 技术可作为优质前端,进一步应用于 PW 乃至更高量级超强超短激光系统脉冲时域对比度的提升,以满足一些极端超强超短激光与物质相互作用实验对高峰值功率高时域对比度的要求.

- [1] Liang X Y, Leng Y X, Wang C, Li C, Lin L H, Zhao B Z, Jiang Y H, Lu X M, Hu M Y, Zhang C M, Lu H H, Yin D J, Jiang Y L, Lu X Q, Wei H, Zhu J, QLi R X, Xu Z Z 2007 *Opt. Express* **15** 15335
- [2] Umstadter D 2001 *Phys. Plasmas* **8** 1774
- [3] Ji L L, Shen B F, Li D X, Wang D, Leng Y X, Zhang X M, Wen M, Wang W P, Xu J C, Yu Y H 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 025001
- [4] Xu Y, Leng Y X, Lin L H, Wang W Y, Huang Y S, Li R X, Xu Z Z 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 123
- [5] Hong K H, Hou B, Nees J A, Power E, Mourou G A 2005 *Appl. Phys. B* **81** 447
- [6] Liu C, Wang Z H, Li W C, Zhang Q, Han H N, Teng H, Wei Z Y 2010 *Opt. Lett.* **35** 3096
- [7] Huang Y S, Zhang C M, Xu Y, Li D X, Leng Y X, Li R X, Xu Z Z 2011 *Opt. Lett.* **36** 781
- [8] Jullien A, Albert O, Burgy F, Hamoniaux G, Rousseau J P, Chambaret J P, Augé-Rochereau F, Chériaux G, Etchepare J, Minkovski N, Saltiel S M 2005 *Opt. Lett.* **30** 920
- [9] Antonucci L, Rousseau J P, Jullien A, Mercier B, Laude V, Chériaux G 2009 *Opt. Commun.* **282** 1374
- [10] Cotel A, Jullien A, Forget N, Albert O, Chériaux G, Le Blanc C 2006 *Appl. Phys. B* **83** 7
- [11] Chykov V, Rousseau P, Reed S, Kalinchenko G, Yanovsky V 2006 *Opt. Lett.* **31** 1456
- [12] Liu C, Wang Z H, Li W C, Liu F, Wei Z Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7036 (in Chinese) [刘成, 王兆华, 李伟昌, 刘峰, 魏志义 2010 物理学报 **59** 7036]
- [13] Petrov G I, Albert O, Etchepare J, Saltiel S M 2001 *Opt. Lett.* **26** 355
- [14] Minkovski N, Petrov G I, Saltiel S M, Albert O, Etchepare J 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 1659
- [15] Wang X T, Yin D J, Shuai B, Li R X, Xu Z Z 2004 *Chinese J. Lasers* **31** 1018 (in Chinese) [王兴涛, 印定军, 帅斌, 李儒新, 徐至展 2004 中国激光 **31** 1018]
- [16] Zhang F L, Ouyang X P, Xie X L, Yang Q W, Guo A L, Sun M Z, Lin Z Q, 2009 *Chinese J. Lasers* **36** 1171 (in Chinese) [张福领, 欧阳小平, 谢兴龙, 杨庆伟, 郭爱林, 孙美智, 林尊琪 2009 中国激光 **36** 1171]
- [17] Chen X W, Li X F, Liu J, Wei P F, Ge X C, Li R X, Xu Z Z 2007 *Opt. Lett.* **32** 2402
- [18] Jullien A, Durfee C G, Trisorio A, Canova L, Rousseau J P, Mercier B, Antonucci L, Chériaux G, Albert O, Lopez-Martens R, 2009 *Appl. Phys. B* **96** 293
- [19] Oleg Konoplev 2000 *Ph.D. Dissertation* (New York: University of Rochester)

# Experimental research and application of pulse clean technique based on cross polarized wave generation\*

Wang Jian-Zhou Huang Yan-Sui Xu Yi Li Yan-Yan Lu Xiao-Ming Leng Yu-Xin<sup>†</sup>

(State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,  
Shanghai 201800, China)

(Received 17 June 2011; revised manuscript received 28 August 2011)

## Abstract

Cross polarized wave (XPW) generation technique is used to improve the contrast of the output pulses from a 800 nm Ti: sapphire femtosecond (fs) laser. The measured temporal contrast of the cleaned pulse is  $10^{11}$  (limited by the dynamic range of the third-order auto-correlator), which is 3 orders of magnitude higher than the temporal contrast ratio of the initial pulse. The efficiency of XPW is 22%. And the bandwidth of the cleaned pulse is broadened after the XPW nonlinear process. Through the dispersion compensation using double chirped mirrors and fused silica plate, the 25 fs pulse duration is achieved. With the cleaned pulse used as the seed of a TW-level Ti: sapphire chirped-pulse amplification laser system, the 250 mJ/50 fs pulses corresponding to 5 TW peak power are obtained. And the  $10^{11}$  temporal contrast is demonstrated on the time scale of hundreds of picoseconds before the main femtosecond pulse.

**Keywords:** pulse clean, cross-polarized wave generation, chirped-pulse amplification, pulse contrast

**PACS:** 42.65.Re, 42.60.By

---

\* Project supported by the Chinese Academy of Sciences, the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant Nos. 10734080, 60921004, 60908008, 61078037), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB808101), International S&T Cooperation Program of China (Grant No. 2011DFA11300), and Shanghai Commission of Science and the Technology (Grant No. 09QA1406500).

<sup>†</sup> E-mail: lengyuxin@mail.siom.ac.cn