

交叉偏振滤波技术提高飞秒 超强激光信噪比的研究*

刘 成¹⁾ 王兆华¹⁾ 李伟昌²⁾ 刘 峰¹⁾ 魏志义^{1)†}

1)(中国科学院物理研究所光物理重点实验室,北京 100190)

2)(国防科技大学应用物理系,长沙 410073)

(2010 年 4 月 22 日收到;2010 年 5 月 10 日收到修改稿)

对交叉偏振滤波技术理论分析的基础上,在“极光-III”装置中采用该技术进行了钛宝石飞秒放大激光脉冲对比度提高的实验研究,不仅显著的抑制了纳秒范围内再生放大器产生的预脉冲,而且也将皮秒范围内的信噪比由 10^{-5} 提高到了 10^{-7} ,实验测得基波到交叉偏振波的转化效率大于 10%. 研究表明,该技术可以有效地提高飞秒超强激光的信噪比.

关键词: 啁啾脉冲放大, 激光脉冲信噪比, 交叉偏振波

PACC: 4260B, 4260F

1. 引 言

近年来,随着超快超强激光研究的快速发展,人们采用啁啾脉冲放大技术(chirped-pulse amplification, 简记为 CPA)所能得到的激光峰值功率已经超过了拍瓦($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$)^[1, 2],基于钛宝石激光增益介质的 CPA 放大装置的峰值功率也已接近拍瓦^[3-5]. 在这类激光装置中,由于选单元件消光比的限制以及放大过程中的自发辐射效应(amplified spontaneous emission, 简记为 ASE)^[6]等因素,不可避免的存在着背景噪声,而且随着为提高峰值功率而采用的放大级数的不断增多,这种背景噪声也将相应的增大,从而导致激光脉冲信噪比的下降. 所谓脉冲信噪比,是指主脉冲与预脉冲以及各种背景噪声之间强度的比值. 目前聚焦近拍瓦峰值功率的钛宝石激光后人们所能得到的激光已经接近 10^{23} W/cm^2 量级^[7],在如此高的峰值功率密度下,激光脉冲的信噪比对于强场物理实验而言就成为一个非常重要的参数. 虽然预脉冲和 ASE 的强度通常比主脉冲要小几个数量级,但经过多级放大之后,其聚焦功率密度也可能达到 $10^{14} - 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 量级,这样强度的背景激光足以影响主激光脉冲与

物质的相互作用过程,从而破坏物理实验的条件,阻碍了实际研究工作的开展.

为了得到高信噪比的激光脉冲,近年来国际上先后提出了许多技术方法,如高能量种子注入技术^[8]、光参量啁啾脉冲放大技术(OPCPA)^[9, 10]、可饱和吸收体^[11]、非线性偏振旋转技术^[12, 13]、等离子体镜技术^[14]、交叉偏振波(cross-polarized wave, XPW)技术等^[15]. 在这些技术中,XPW 结构相对简单,转化效率较高,提高信噪比明显,因此我们对这种技术进行了系统研究,并将其应用于“极光-III”激光装置中,用于提升飞秒放大激光的信噪比. 利用快响应二极管和高速示波器测量纳秒预脉冲,以及三阶互相关仪测量 XPW 滤波前后系统的皮秒级脉冲信噪比,结果表明 XPW 技术有效地抑制了纳秒预脉冲,并且将皮秒范围内的信噪比提高了两个数量级,达到 10^{-7} .

2. XPW 技术的原理

当激光功率密度达到一定强度时,线偏振激光的波矢沿着特定方向经过非线性晶体后,其偏振方向会发生一定角度的旋转,由此而产生的与原来偏振方向垂直的波称之为交叉偏振波. 由于对强度

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2007CB815104)、国家自然科学基金(批准号:10804128)和国家高技术研究发展计划资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zywei@aphy.iphy.ac.cn

的依赖效应,产生 XPW 所要求的功率密度一般应大于 10^{12} W/cm^2 ,这样才能保证有较高的转化效率.如果在光路中放置一对正交的偏振片,主脉冲通过偏振片以后,由于功率密度相对较高,经过 BaF_2 晶体之后偏振方向发生旋转,其正交偏振分量就会透过正交的偏振片,而脉冲中的预脉冲和 ASE 成分由于峰值功率密度达不到产生 XPW 的阈值,不能发生此三阶非线性过程,偏振方向不发生偏转,因此不能透过正交的偏振片,从而被过滤掉.基于这样一种原理,XPW 技术可以有效地提高超强激光脉冲的信噪比.

在 XPW 滤波技术中通常选用 BaF_2 晶体,因为 BaF_2 晶体的三阶非线性系数较高,与其他晶体相比可以得到更高的转化效率,并且没有明显的自相位调制效应.除此之外,从紫外到红外波段该晶体都有很高的透过率,并且其禁带能量很高(9.07 eV),可以忽略多光子吸收效应,从可见到近红外波段范围内的三阶非线性系数不发生变化.

在 XPW 过程中,采用小信号近似,并且忽略交叉偏振波的自相位调制效应,则由于两波的互相位调制^[16],基波和交叉偏振波电场振幅的演化方程可表示为

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

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

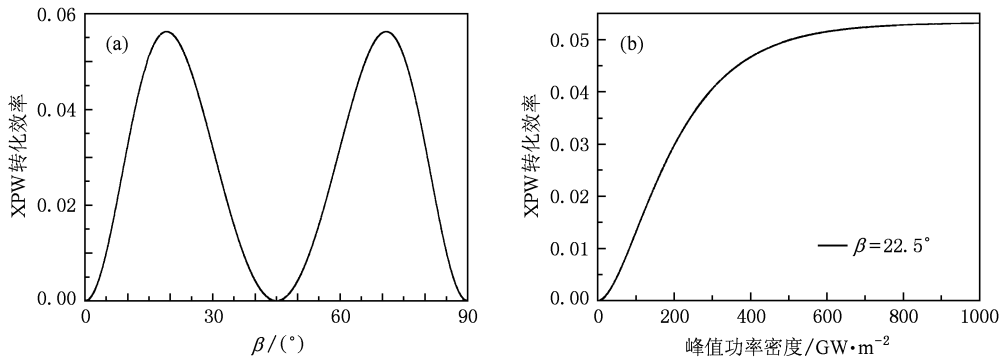


图1 XPW 转化效率随着角度 β 以及入射激光脉冲功率密度的变化 (a) XPW 转化效率随着角度 β 的变化, (b) XPW 转化效率随着入射激光脉冲功率密度的变化

3. 实验装置

实验在“极光 III”装置上进行,该前级放大系统为自制的 1 kHz 重复频率的再生钛宝石激光放大

方程中各个参数可表示为

$$\gamma_1 = \gamma_0 \left[1 - \frac{\sigma}{2} \sin^2(2\beta) \right],$$

$$\gamma_2 = -\gamma_0 \frac{\sigma}{4} \sin(4\beta),$$

$$\gamma_3 = \gamma_0 \left[\frac{\sigma}{2} \sin^2(2\beta) + \frac{1-\sigma}{3} \right]. \quad (2)$$

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

$$\sigma = [\chi_{xxxx} - 2\chi_{xyyx} - \chi_{xyxy}] / \chi_{xxxx}. \quad (3)$$

(1)式中 A, B 分别是基波和垂直偏振波的电场振幅, β 是入射光偏振方向与晶体 $[100]$ 轴之间的夹角, n 为 BaF_2 晶体折射率, λ 为入射激光中心波长, $\chi_{xxxx}, \chi_{xyyx}, \chi_{xyxy}$ 分别为晶体的三阶非线性系数的各阶分量.在 XPW 过程中,对于长度为 L 的 BaF_2 晶体,基波转化为交叉偏振波的效率为

$$\eta = \frac{|B(L)|^2}{|A(0)|^2}. \quad (4)$$

对于 BaF_2 晶体, $\chi_{xxxx} = 1.59 \times 10^{-22} \text{ m}^2/\text{V}^2$, $\sigma = -1.2$, $\lambda = 800 \text{ nm}$, $n = 1.47$, $L = 1.5 \text{ mm}$, 按此参数,求解常微分方程组(1),得到模拟结果如图1所示,图1(a)为 XPW 转化效率随着角度 β 的变化,图1(b)为输入功率密度的变化,可以看出 XPW 的转化效率随着 β 角周期性的变化,当 $\beta = 22.5^\circ$ 的奇数倍时转化效率最高,为此实验中选取 $\beta = 22.5^\circ$. XPW 转化效率在功率密度较小时呈指数增长,随着功率密度的增加,最终趋向饱和.

器.为了对比度的测量,我们在下一级放大前先设计压缩机对脉宽进行压缩,压缩后测得单脉冲能量为 $200 \mu\text{J}$,脉冲宽度为 50 fs ,中心波长为 790 nm ,光谱的半高全宽为 27 nm ,皮秒量程范围内的对比度为 1×10^{-5} .图2所示为 XPW 的实验装置图,放大

压缩后的飞秒激光首先以水平偏振经过一块 Glan 棱镜 P1 进入系统中,由石英透镜 F1 聚焦到两块 BaF₂ 晶体上,产生的 XPW 脉冲经另一块透镜 F2 准直后,通过第二块偏振正交的 Glan 棱镜 P2 由系统输出.系统中所用的 Glan 棱镜消光比小于 10^{-6} ,聚

焦透镜 F1 的焦距为 800 mm,准直透镜 F2 的焦距为 200 mm,两块 BaF₂ 晶体的直径为 12.7 mm,厚度为 1.5 mm.滤波得到的 XPW 脉冲经第二个展宽器展宽后,进入第二套 CPA 系统中进行放大和再压缩.整体装置构成了双啁啾脉冲放大(DCPA).

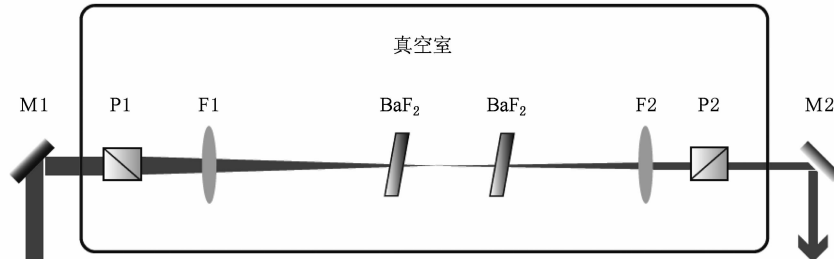


图2 XPW 滤波实验光路图,其中 M_1, M_2 是 45° 宽带全反射镜, $P1, P2$ 是一对正交放置的 Glan 棱镜, $F1, F2$ 分别是焦距为 800 和 200 mm 的正透镜

4. 实验与结果讨论

实验中 XPW 滤波系统所用的 BaF₂ 晶体沿其 [001] 轴切割,基波波矢沿 [001] 方向,激光偏振为水平偏振.为了保证 BaF₂ 晶体内较高的功率密度,整个光路构成了一个共焦缩束系统.在系统中设置一对偏振正交的偏振片,XPW 技术对信噪比的提高主要取决于偏振元件的消光比,在本实验中我们选用消光比为 10^{-6} 的 α -BBO Glan 棱镜作为起偏及检偏元件.

随着入射激光功率密度的增加,XPW 输出能量最终达到饱和,为了抑制这种饱和效应,本实验中采用了两块 BaF₂ 晶体的设计,其间距为 100 mm,关于焦点对称放置.为保证晶体不会被打坏,晶体上的光斑直径控制为 $300\mu\text{m}$,对应的峰值功率密度约为 $5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$.沿着光轴旋转 BaF₂ 晶体,使得 XPW 产生的效率最高.光束经过透镜 F2 缩束准直后,正交的偏振片将干净的主脉冲和预脉冲以及 ASE 分开,干净的脉冲进入下一级 CPA 系统中进行放大.

为了保证放大系统有更窄的脉宽,利用 Ocean Optics 公司生产的型号为 HR4000CG-UV-NIR 的光纤光谱仪分别测量了 XPW 滤波前后的光谱,结果如图 4(a) 所示.利用 XPW 技术进行滤波之前,测得再生放大器输出光谱的半高全宽(FWHM)为 27 nm,比较 XPW 滤波之后 30 nm 的 FWHM 光谱宽度,光谱略微有些展宽,这是因为聚焦激光在 BaF₂

晶体内形成的自相位调制等非线性效应所致,这种展宽的光谱有利于最后的脉冲压缩.在 XPW 滤波装置中,输入光的能量为 $200\mu\text{J}$,优化压缩器的光栅对距离,并且沿晶体 [001] 轴旋转 BaF₂ 晶体,以最佳转化效率.最后测到优化后通过 XPW 的激光能量为 $25\mu\text{J}$,转化效率大于 10%.如果对 BaF₂ 晶体的两面镀以 700—900 nm 范围内高损伤阈值的宽带高透膜,将可望进一步提高转化效率.

为了测量 XPW 技术对纳秒预脉冲的抑制,分别用 Electro-Optics Technology 生产的型号为 ET-4000,上升时间和下降时间小于 175 ps 的 GaAs PIN 超快光电二极管和 Tektronix 公司型号为 DP070804,带宽为 8GHz 的高速示波器观察测量纳秒时域内的预脉冲,用一台 Amplitude Technologies 公司生产的三阶互相关仪测量皮秒范围内的信噪比,并且将测量结果分别与采用 XPW 技术之前的结果作比较.

由于再生放大腔内 Pockel 盒以及偏振元件有限的消光比,激光脉冲在放大过程中每经过腔内偏振片一次,就会有一部分激光沿着再生腔的输出光路泄露到腔外,这样在主脉冲前后就会有如图 3(a) 所示的预脉冲,预脉冲的间隔对应再生放大腔的腔长.这些预脉冲的幅度通常比主脉冲的幅度低 3—4 个数量级,其峰值功率密度达不到 XPW 要求的阈值,则偏振特性不发生任何改变,如图 3(b) 所示.而主脉冲由于高于 XPW 要求阈值的强度,偏振会发生改变,因此其前后的多个脉冲经过 XPW 作用之后,得到了有效抑制.从图 3(b) 的结果也可以看出,

即使在光电管深度饱和的情况下,主脉冲之前也没有预脉冲的存在.在再生放大器中种子光能量由纳焦放大到毫焦量级,信号增益达到 10^6 ,在如此高的增益之下,也伴随着自发辐射的积累和放大,ASE在整个脉冲中所占的比例也会大大提高.对于这样量级的能量放大来说,在皮秒范围内的信噪比一般

为 10^{-5} 量级,如图 4(b) 中的细实线所示.采用 XPW 技术之后,脉冲中的 ASE 成分得到了有效地过滤,过滤后的脉冲经过后续的展宽、放大以及压缩之后,我们测得在 30 ps 的时间量程内,放大激光的信噪比由原来的 1×10^{-5} 提高到了 1.6×10^{-7} ,提高了两个多量级.

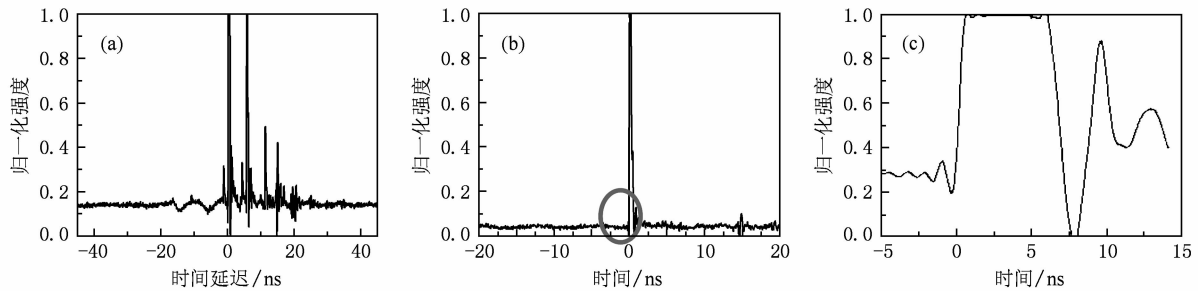


图 3 采用 XPW 滤波前后纳秒范围内的预脉冲对比 (a) 为使用 XPW 滤波之前再生放大器输出的纳秒脉冲时间序列, (b) 为 XPW 滤波之后纳秒以及百皮秒量程内的脉冲波形, (c) 为 (b) 局部放大

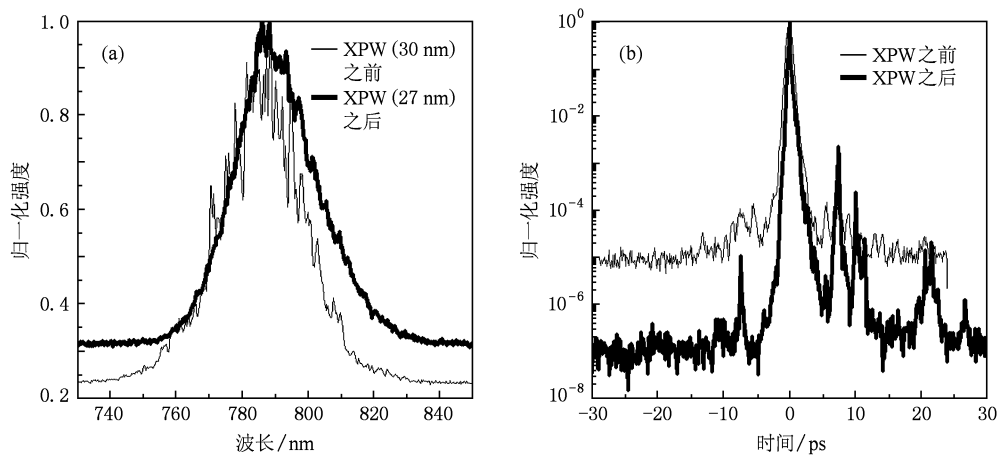


图 4 XPW 滤波前后的光谱及皮秒量程内的信噪比较 (a), (b) 分别为中细、实线为 XPW 滤波之前的光谱, 粗实线为 XPW 滤波之后的光谱, (b) 中细实线为 XPW 之前的皮秒信噪比, 粗实线为 XPW 之后的皮秒信噪比

5. 结 论

在对 XPW 原理理论分析的基础上,进行了 XPW 滤波提高飞秒放大激光对比度的实验研究,有效地抑制了“极光-III”装置中前级再生放大系统输出激光脉冲的预脉冲以及 ASE,结果显示在皮秒级

的范围内,放大激光的信噪比从 10^{-5} 提高到了 10^{-7} . 这为进一步在更高峰值功率的飞秒激光放大中获得高信噪比的结果提供了基础,在激光与物质相互作用的等离子体物理实验中具有重要的意义.

感谢张杰院士及滕浩副研究员、李玉同研究员的有益讨论.

[1] Perry M D, Pennington D, Stuart B C, Tietbohl G, Britten J A, Brown C, Herman S, Golick B, Kartz M, Miller J, Powell H T, Vergino M, Yanovsky V 1999 *Opt. Lett.* **24** 160

[2] Erhard W G, Mikael M, Joel B, Axel J, Martin I, Doug H, Ted B, Ramiro E, Skylar D, Watson H, Gilliss D, Alvin E, Rick C, John C, Christopher E, Todd D 2010 *Appl. Opt.* **49** 1676

- [3] Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, Ma J, Inoue N, Ueda H, Kiriya H 2003 *Opt. Lett.* **28** 1594
- [4] Liang X Y, Leng Y X, Wang C, Li C, Lin L, Zhao B, Jiang Y, Lu X, Hu M, Zhang C, Lu H H, Yin D J, Jiang Y L, Lu W H, Zhu J Q, Li R X, Xu Z Z 2007 *Opt. Express* **15** 15335
- [5] Wei Z Y, Wang Z H, Wang P, Ling W J, Zhu J F, Han H N, Zhang J 2008 *J. Phys. Conf. Ser.* **112** 032003
- [6] Ivanov V V, Maksimchuk A, Mourou G 2003 *Appl. Opt.* **42** 7231
- [7] Yanovsky V, Chvykov V, Kalinchenko G, Rousseau P, Planchon T, Matsuoka T, Maksimchuk A, Nees J, Cheriaux G, Mourou G, Krushelnick K 2008 *Opt. Express* **16** 2109
- [8] Itatani J, Faure J, Nantel M, Mourou G, Watanabe S 1998 *Opt. Commun.* **148** 70
- [9] Herrmann D, Veisz L, Tautz R, Tavella F, Schmid K, Pervak V, Krausz F 2009 *Opt. Lett.* **34** 2459
- [10] Liu H J, Chen G F, Zhao W, Wang Y S, Zhao S H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1717 (in Chinese) [刘红军、陈国夫、赵卫、王屹山、赵高弘 2004 物理学报 **53** 1717]
- [11] Wojtkiewicz E, Durfee C G 2004 *Opt. Express* **12** 1383
- [12] Jullien A, Augé-Rochereau F, Chériaux G, Chambaret J 2004 *Opt. Lett.* **21** 84
- [13] Nishizawa N, Murayama A 2007 *Opt. Lett.* **32** 3516
- [14] Thauray C, Quééré F, Geindre J P, Levy A, Ceccotti T, Monot P, Bougeard M, Réau F, D'oliveira P, Audebert P, Marjoribanks R, Martin P H 2007 *Nat. Phys.* **31** 424
- [15] Jullien A, Albert O, Burgy F, Hamoniaux G, Rousseau J, Chambaret J, Augé-Rochereau F, Chériaux G, Etchepare J, Minkovski N, Saltiel S M 2005 *Opt. Lett.* **30** 920
- [16] Minkovski N, Petrov G I, Saltiel S M 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 1659

Enhancement of contrast ratio in chirped pulse amplified laser system by cross-polarized wave generation*

Liu Cheng¹⁾ Wang Zhao-Hua¹⁾ Li Wei-Chang²⁾ Liu Feng¹⁾ Wei Zhi-Yi^{1)†}

1) (Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

2) (Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 22 April 2010; revised manuscript received 10 May 2010)

Abstract

This paper reports our experimental research on the laser contrast ratio enhancement in the XL-III (eXtreme Light III) facility with the technology of cross-polarized wave (XPW) generation. Based on the theoretical analysis of the relevant principles, we introduced an XPW filter in the facility, which was upgraded with a double chirped pulse amplification (DCPA) scheme. Under optimized system design and alignment, we measured the conversion efficiency from fundamental wave to cross-polarized wave to be higher than 10%. The pre-pulses in nanosecond scale were deeply suppressed and the contrast ratio in picosecond scale was enhanced from 10^{-5} to 10^{-7} . Our results show the XPW generation provides an effective technique to improve the contrast ratio of a Chirped-pulse amplification laser system, which is a key issue in ultrahigh intensity laser-matter researches.

Keywords: chirped-pulse amplification, contrast ratio, cross-polarized wave

PACC: 4260B, 4260F

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB815104), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10804128) and the National High Technology Research Program.

† Corresponding author. E-mail: zywei@aphy.iphy.ac.cn