

文章编号: 0253-2239(2009)04-0980-06

抽运光中 ASE 噪声对 OPCPA 信噪比的影响

王艳海^{1,2} 潘雪¹ 王江峰¹ 王利¹ 李学春¹ 林尊琪¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

²河北科技大学理学院, 河北 石家庄 050018

摘要 惯性约束核聚变快点火实验, 要求拍瓦终端输出再压缩的高信噪比超短激光脉冲。在拍瓦前端光参变啁啾脉冲放大(OPCPA)阶段, 抽运激光脉冲中由放大的自发辐射(ASE)噪声调制导致的电场强度振幅和相位的随机扰动, 将会被传递到信号光的光谱上, 使再压缩后主激光脉冲前后出现底座, 降低了信号光的信噪比。数值模拟了抽运激光脉冲中 ASE 噪声对信噪比以及对时间底座的宽度的影响, 并探讨了有利于提高超短激光脉冲信噪比的途径。

关键词 快点火; 信噪比; 参变啁啾脉冲放大; 放大的自发辐射

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092904.0980

Restrictions of Signal-to-Noise Ratio by Amplified Spontaneous Emission Noise of Pump Pulse in Optical Parametric Chirped Pulse Amplification System

Wang Yanhai^{1,2} Pan Xue¹ Wang Jiangfeng¹ Wang Li¹ Li Xuechun¹ Lin Zunqi¹

¹Joint Laboratory for High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²College of Sciences, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China

Abstract The fast ignitor scheme in inertial confined fusion requires ultrashort laser pulse with high signal-to-noise ratio (SNR). The amplified spontaneous emission (ASE) noise modulations in pump pulse are transferred onto the signal spectrum and these modulations of signal spectrum generate the time-pedestal before and after this main pulse, which degrades the signal-to-noise ratio. The restrictions of the SNR by the random ASE noise and the duration of its pedestal are numerically modeled. A number of ways that can reduce the noise level and increase the signal-to-noise ratio are discussed.

Key words fast ignitor; signal-to-noise ratio; optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA); amplified spontaneous emission (ASE)

1 引言

在能量激光驱动惯性约束核聚变实验中, 快点火方案将靶丸内爆压缩与点火分成两个阶段^[1], 压缩激光只对微靶进行适度压缩, 然后高功率超短脉冲激光束入射到被压缩的靶燃料边缘, 产生超热电子或质子去点燃热核材料。该方案有利于缓解或转移技术困难和降低装置造价。日本 ILE 实验室利用 Gekko-XII 装置内爆压缩含氘聚乙烯靶丸, 拍瓦亚皮秒脉冲通过镶在靶丸上的空心金锥加热预压

缩的靶物质, 中子产额比无加热脉冲时提高了 3 个数量级^[2,3]。由于在超短超强激光脉冲打靶实验中, 预脉冲或主脉冲底座在强度达到 $10^8 \sim 10^{11}$ W/cm² 时就会使靶物质气化或产生预等离子体, 在主激光脉冲到来之前会改变靶物质的状态, 从而影响作用过程或改变作用机制。信号光的信噪比是指激光主脉冲峰值强度和预脉冲强度或主脉冲时间底座强度的比值。实际装置中, 激光脉冲在放大时, 放大器中放大的自发辐射(ASE)、开光消光比等限制因素, 脉冲信

收稿日期: 2008-02-28; 收到修改稿日期: 2008-10-17

作者简介: 王艳海(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事 OPCPA 稳定性和信噪比的研究。E-mail: wangyh@siom.ac.cn

导师简介: 林尊琪(1942-), 男, 院士, 研究员, 主要从事激光惯性约束核聚变、高功率激光驱动器和 X 光激光等方面的研究。E-mail: zqlin@mail.shnc.ac.cn

噪比一般在 $10^5 \sim 10^{6[4]}$, 靶面激光强度多在 $10^{18} \sim 10^{21}$ W/cm², 信噪比成了制约快点火实验的瓶颈, 因此必须采取相应措施提高超短激光脉冲的信噪比。

超短超强激光脉冲的信噪比, 主要受制于种子激光脉冲的预脉冲和放大过程中 ASE 噪声、时间相位畸变, 以及参变作用(OPA)中的参变荧光噪声的影响。在采用 CPA 技术进行激光脉冲放大的系统中, 预脉冲会随着主脉冲一起放大。同时, 在前端高增益再生放大器中会引入较强的 ASE 噪声, 在后续放大器中 ASE 不断得到放大, 而且在时间上不能被压缩, 大大降低了超短脉冲的信噪比。采用 OPCPA 技术进行激光脉冲放大, 可以利用前端光参变放大过程中抽运光的窗口效应, 降低预脉冲的增益, 或利用级联 OPA 技术彻底消除预脉冲^[5]。相对于啁啾脉冲放大(CPA)技术而言, 光参变啁啾脉冲放大(OPCPA)技术在消除预脉冲和提高信噪比方面更具有优势^[6], 拍瓦激光装置前端采用 OPCPA 技术是比较好的方案。

在 OPCPA 过程中, 抽运光中的 ASE 噪声导致的主激光脉冲振幅时间和相位随机起伏将会通过参变作用传递到信号光上, 对信号光的时间波形, 也是信号光的光谱, 产生调制, 从而影响压缩后信号光的信噪比^[7]。本文主要研究参变作用过程中抽运光 ASE 噪声对 OPCPA 信噪比的影响, 探索拍瓦前端 OPCPA 高信噪比的设计途径。

2 数值理论模型

种子激光脉冲经过展宽器色散后, 在谱域内引入了相移 φ , 被线性展宽, 送到晶体中进行参变放大, 再经过压缩器引入相移 $-\varphi$ 进行压缩, 最后得到再压缩放大的激光脉冲, 如图 1 所示。不考虑展宽器和压缩器引入的高阶色散, 数值模拟由于抽运光 ASE 噪声对信号光光谱调制引起的信噪比下降。

种子激光脉冲在光栅展宽器中展宽, 相当于在谱域内对种子激光引入了相移 $\varphi(\omega)$ ^[8], 进行傅里叶逆变换即可得到时域内展宽的信号光:

$$\varphi(\omega) = \varphi(\omega_0) + \varphi^{(1)}(\omega_0)(\omega - \omega_0) + 1/2\varphi^{(2)}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 + \dots, \quad (1)$$

其中 $\varphi^{(1)}(\omega_0)$, $\varphi^{(2)}(\omega_0)$ 分别是中心频率处的群延时

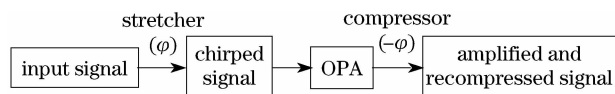


图 1 OPCPA 系统如图

Fig. 1 Schematic of an OPCPA system

(GD)和群速色散(GVD), 不考虑高阶色散, 该过程应用离散快速傅里叶(FFT)变换。光栅压缩过程与展宽过程相反, 相当于在谱域内对种子激光脉冲引入了相反的相移 $-\varphi(\omega)$ 。

参变作用过程采用四阶龙格-库塔算法数值求解耦合波方程。由于啁啾脉冲展宽倍数很大(约 10^4), 参变作用过程中晶体较短, 参变过程引入的色散很小。采用局域近似比严格的傅里叶算法可以缩减大量的计算时间, 而又不失计算精度, 是一种很好的近似。耦合波方程如下^[9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_s}{\partial z} &= -i \frac{\omega_s d_{\text{eff}}}{n_s c} E_i^* E_p e^{-i\Delta k z}, \\ \frac{\partial E_i}{\partial z} &= -i \frac{\omega_i d_{\text{eff}}}{n_i c} E_s^* E_p e^{-i\Delta k z}, \\ \frac{\partial E_p}{\partial z} &= -i \frac{\omega_p d_{\text{eff}}}{n_p c} E_s E_i e^{+i\Delta k z}. \end{aligned} \quad (2)$$

在 OPCPA 放大过程中, 抽运光中的 ASE 噪声导致的电场强度振幅和相位时间随机起伏将会通过参变作用传递到信号光上, 对信号光的时间波形(也是信号光的光谱), 产生调制, 导致了信号光光谱畸变, 从而恶化了压缩后信号光的信噪比。

3 抽运激光中的 ASE 噪声

抽运光中的 ASE 噪声, 时间相干性很差, 与抽运光电场非相干叠加, 使抽运光的电场振幅和相位产生随机起伏。抽运光 ASE 噪声的频谱宽度与抽运光增益介质的增益线宽一致(如果不加入光谱滤波装置), ASE 噪声集中在抽运光时间窗口内。ASE 电场强度随时间分布可由对 ASE 的电场强度频谱分布进行傅里叶逆变换得到:

$$E_{\text{ASE}}(t) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega) \exp[i\Phi(\omega)] \cdot \exp(i\omega t) d\omega, \quad (3)$$

上式中 ASE 电场强度的光谱相位分布是随机分布在 $[-\pi, \pi]$ 内的, 由公式(3)可知 $E_{\text{ASE}}(t)$ 随时间分布随机起伏包络宽度是由 ASE 的光谱宽度决定的, 光谱越宽, 包络宽度越窄, 随机起伏越快。

抽运激光脉冲电场强度可由公式 $E(t) = E_{\text{pump}}^0(t) + E_{\text{ASE}}(t)$ 描述, 其中 $E_{\text{pump}}^0(t)$ 为主激光脉冲电场强度, 强度分布为

$$I(t) = (1/2)c n \epsilon_0 |E(t)|^2 = I_{\text{pump}}^0 + I_{\text{ASE}} + (1/2)c n \epsilon_0 [E_{\text{pump}}^0(t) E_{\text{ASE}}^*(t) + E_{\text{pump}}^{0*}(t) E_{\text{ASE}}(t)], \quad (4)$$

式中等式右边后两项就是抽运激光脉冲中 ASE 导致的电场强度振幅和相位的时间随机起伏调制。定义抽运光中的信噪比: $S_p = I_{\text{pump}}^0 / I_{\text{ASE}}$, I_{pump}^0 是抽运光强度, I_{ASE} 是 ASE 噪声强度, 抽运光 RMS 振幅调制深度正比于 $S_p^{-1/2}$ [10]。

4 数值结果

模拟 OPCPA 过程中抽运光的 ASE 噪声对信噪比的影响。基本数据如下: 种子激光脉冲(信号光)中心波长 $\lambda_0 = 1053$ nm, 脉宽 $\tau_{\text{FWHM}} = 220$ fs, 能量 $W_s = 600$ pJ, 时间、空间均呈现高斯分布, 种子激光脉冲被展宽到 $t_{\text{FWHM}} = 2$ ns。抽运光波长 527 nm, 脉宽 $t_{\text{FWHM}} = 2$ ns, 能量 $W_p = 125$ mJ, 强度 1 GW/cm^2 , 抽运光时间、空间强度均呈现 10 阶超高斯分布。抽运光和信号光光斑直径均为 $d_{\text{FWHM}} = 2.5$ mm。ASE 光谱中心频率和主激光脉冲相同,

光谱分布接近高斯形状。

抽运光信噪比和参变作用过程饱和程度不变, 改变抽运光中 ASE 的光谱宽度, 观察信号光信噪比的变化。

抽运激光信噪比 4×10^5 , 振幅调制深度 0.16%, 参变晶体长度 59.5 mm, 工作在饱和状态。图 2(a) 表示 ASE 噪声对抽运光产生的强度调制, 对应 ASE 的光谱宽度(FWHM)为 3.7 nm, 光谱越宽, 抽运光噪声调制时间包络宽度越小 [11]; 图 2(b) 表示参变作用后抽运光和信号光的时间-强度波形, 参变作用在饱和状态; 图 2(c) 表示 OPCPA 输出再压缩后的放大信号光时间-强度波形; 图 2(d) 表示参变作用前后信号光光谱形状的变化, 高斯形的为参变作用前信号光的光谱, 超高斯形状的为参变作用后的光谱。由于抽运光的时间窗口作用, 信号光光谱被部分剪切掉了。

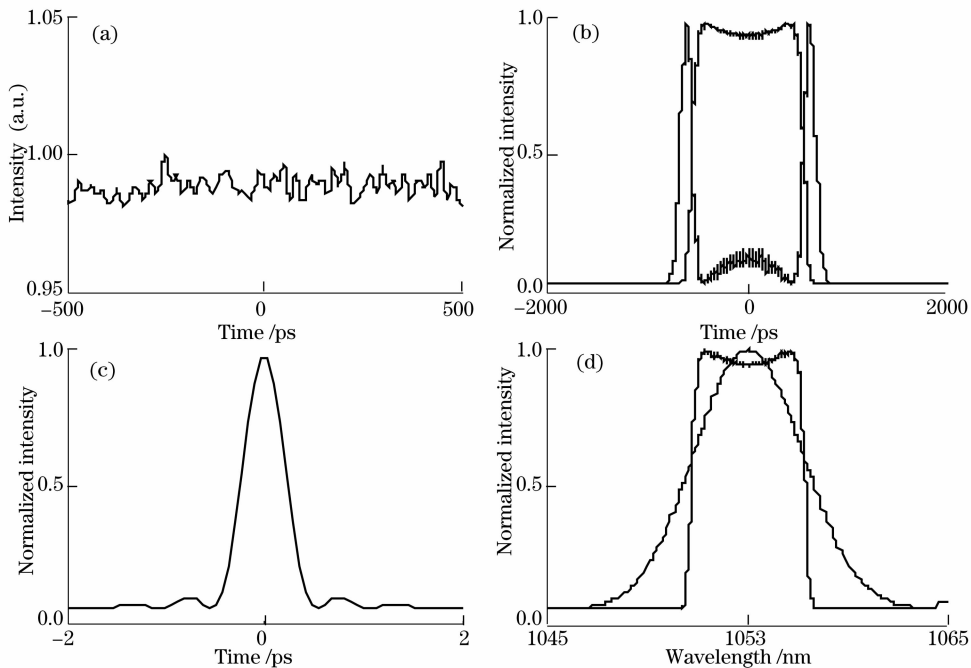


图 2 激光中的自发辐射噪声强度起伏和光参变放大前后信号光和抽运光强度分布。(a) 抽运激光中的放大的自发辐射噪声强度, (b) 光参变放大后信号光和抽运光时间强度分布, (c) 再压缩后的信号光时间强度分布, (d) 参变放大前后信号光光谱波形, 分别为高斯分布和超高斯分布

Fig. 2 ASE noise intensity fluctuation and pump and signal laser intensity distribution before and after OPA process. (a) ASE noise intensity fluctuation in pump laser, (b) signal and pump intensity distribution in time domain after OPA process, (c) recompressed signal intensity distribution and (d) signal intensity distribution in spectral domain before (Gaussian) and after (super-Gaussian) OPA process.

图 3(a), (b), (c), (d) 分别表示前端 OPCPA 输出信号光强度归一化的对数坐标, 对应抽运光 ASE 噪声光谱宽度(FWHM)为 3.7 nm、1.8 nm、0.5 nm、0.12 nm。图(a)中信号光的信噪比约为 1×10^9 , 时间底座宽度约为 1000 ps。图(b)中信号

光的信噪比约为 7×10^8 , 时间底座宽度约为 500 ps。图(c)信号光信噪比约为 1.0×10^8 , 时间底座宽度约为 110 ps。图(d)信号光信噪比约为 4×10^7 , 时间底座宽度约为 30 ps。

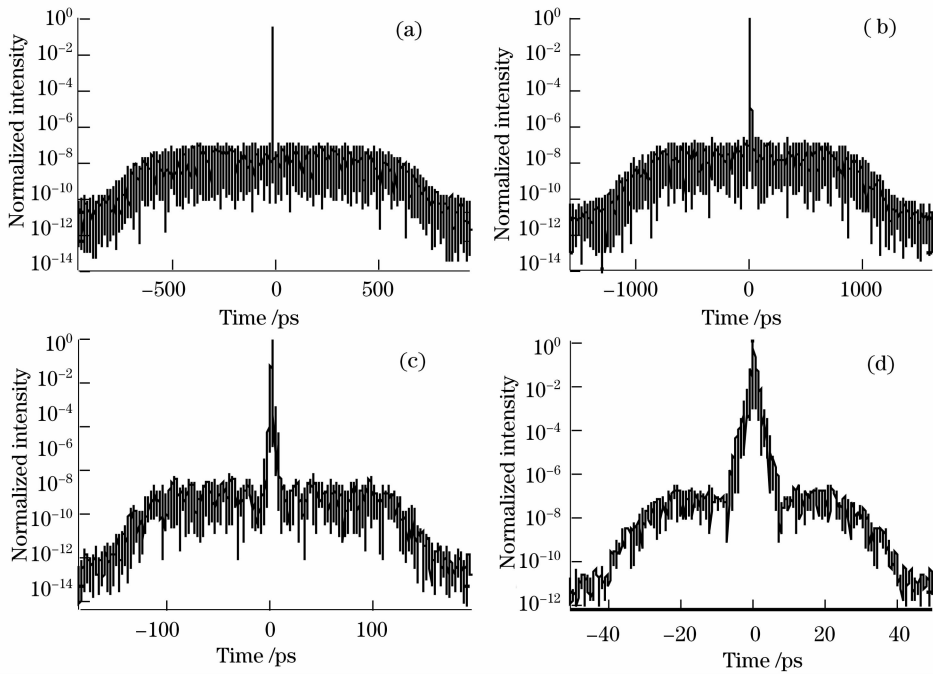


图 3 再压缩后信号光强度分布,抽运光中 ASE rms 振幅调制深度为 0.16%,LBO 参变晶体长度为 59.5mm。ASE 光谱半峰全宽为:(a) 3.7 nm, (b)1.8 nm, (c) 0.5 nm, (d)0.12 nm

Fig.3 Intensity of recompressed signal with ASE rms amplitude modulation depth 0.16% in pump laser and LBO parametric crystal length 59.5mm. The FWHM of the ASE spectrum is equal to (a) 3.7 nm, (b) 1.8 nm, (c) 0.5 nm, (d) 0.12 nm

减小抽运光 ASE 光谱宽度(相当于增大 ASE 噪声时间调制包络宽度),可以增大信号光光谱调制宽度,显著减小了压缩后信号光的时间底座宽度。但是随着 ASE 光谱宽度的减小,压缩后信号光信噪比有所下降,原因是计算过程中 ASE 的噪声功率没有相应减小,再压缩后噪声调制能量分布在更窄的时间内,噪声强度有所提高。实际情况是,如果抽运激光器加载有光谱滤波装置,抽运光中 ASE 噪声功率将会变小,信号光信噪比将不会随着 ASE 的光谱宽度发生显著变化,而时间底座宽度将会减小。

抽运光中 ASE 的光谱宽度和参变作用过程饱和程度不变,改变抽运光振幅调制深度,观察信号光信噪比的变化

由图 4(a),图 4(b)所示,抽运光振幅调制深度分别为 1%、0.1%,ASE 光谱宽度均为 0.12 nm,再压缩后信号光信噪比分别为 1×10^6 , 1×10^8 。与图 3(d)(振幅调制深度为 0.16%,再压缩后信号光信噪比为 4.2×10^7)相比较可以看出,随着抽运光振幅调制深度 $S_p^{-1/2}$ 减小,抽运光中 ASE 噪声功率减小,压缩后信号光信噪比增大,主脉冲时间底座宽度不变,约为 30 ps。

抽运光中 ASE 的光谱宽度和抽运光振幅调制深度不变,改变参变作用过程饱和程度,观察信号光

信噪比的变化。

改变抽运光强度,或者改变参变作用晶体长度,可以改变参变放大过程抽运光的抽运程度,从而改变由抽运光中 ASE 噪声调制传递到信号光光谱上的调制噪声水平。图 5 中抽运激光信噪比 4×10^5 ,振幅调制深度 0.16%,ASE 光谱宽度 0.12 nm,高斯分布图。5(a)中光参变作用过程未饱和,抽运光中的噪声调制基本上都传递到了信号光,图 5(b)为 5(a)中的信号光再压缩后的信噪比约为 1×10^6 。图 5(c)参变作用过程过饱和,信号光能量部分反转到抽运光,随着过饱和程度的增加,信号光噪声调制水平逐渐增加,图 5(d)为图 5(c)中信号光再压缩后的信噪比, 5×10^6 。与工作在更接近参变最大转换效率处的状态——如图 3(d)中信号光信噪比 4.2×10^7 ——相比,工作在过饱和或者未饱和状态时的信号光信噪比下降得更厉害。因此,参变作用过程中,能量转换效率不同,由抽运激光转移的噪声调制功率水平与信号光功率的比例不同,在最大转换效率处,转移噪声功率和信号光功率之比最小,压缩后信号光信噪比最高。噪声转移比例最小处与光参变作用中的稳定区非常接近,有利于同时实现 OPA 高稳定和高信噪比。

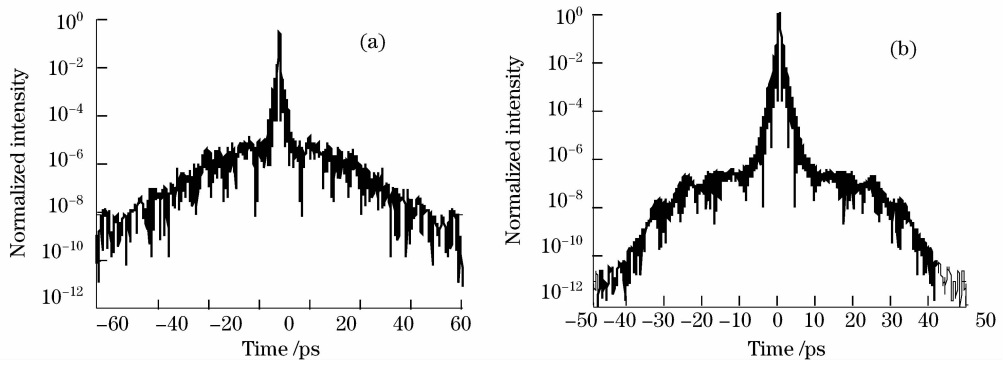


图 4 再压缩后信号光强度分布,抽运光中 ASE 光谱呈高斯分布,光谱半峰全宽为 0.12 nm.

(a) 振幅调制深度为 1%, (b) 振幅调制深度为 0.1%

Fig. 4 Intensity of recompressed signal for ASE FWHM Gaussian spectrum in pump laser.

(a) amplitude modulation depth 10^{-2} , (b) amplitude modulation depth 10^{-3}

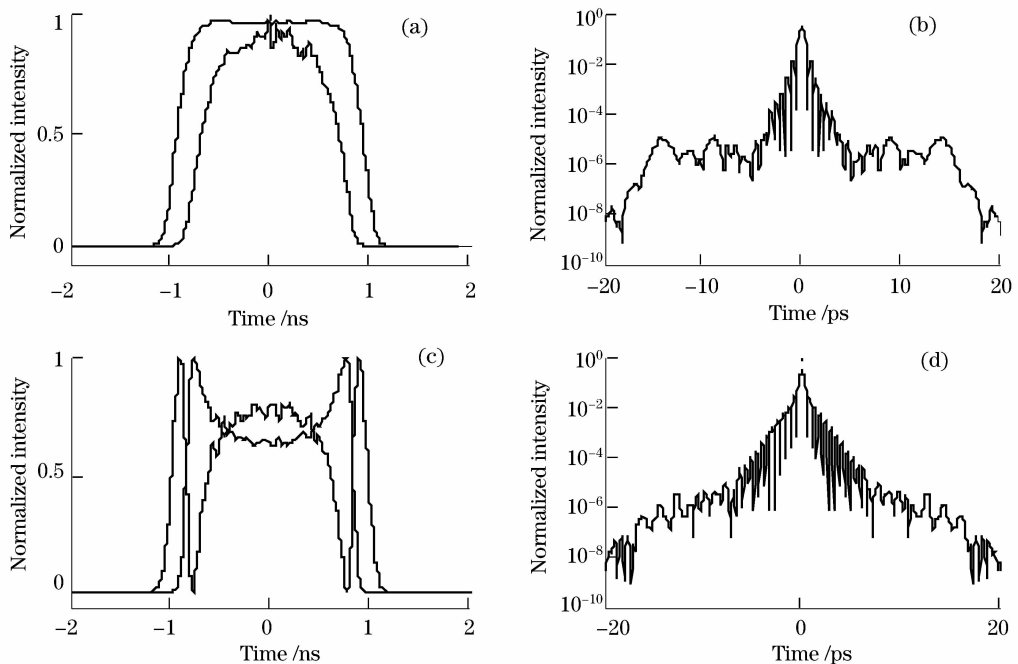


图 5 OPA 放大后信号光压缩前后的强度分布和抽运光的强度分布,工作在未饱和状态, (a), (b);

工作在未饱和状态 (c), (d), 抽运脉冲中 ASE 光谱呈高斯分布, 谱宽、0.12 nm.

Fig. 5 Intensity of uncompressed and recompressed signal laser pulses and pump laser pulse after

OPA process, in the unsaturated regime (a) and (b); supersaturated regime (c) and (d),

with ASE of a 0.12 nm FWHM Gaussian spectrum in pump pulse

5 结 论

OPCPA 系统中,抽运光中 ASE 随机噪声对主激光脉冲振幅和相位的扰动,在参变作用过程中将会传递到信号光上,使信号光的光谱波形产生畸变,从而使再压缩后主激光脉冲叠加了底座脉冲,降低了信号光的信噪比。数值计算表明,主脉冲的时间底座的强度正比于抽运光中 ASE 噪声功率和光参变过程中的饱和程度,时间宽度正比于抽运光的光

谱宽度。因此必须采取相应的措施,降低抽运光中 ASE 的功率水平,减小 ASE 的光谱宽度,从而提高信号光脉冲的信噪比。

根据以上讨论,则提高 OPCPA 激光脉冲信噪比的途径有:

1) 在抽运激光进入参变晶体之前的光路中,加空间滤波器减小噪声源和 OPA 之间的立体角。这些措施可以提高压缩后信号光信噪比,但不能改变

信号光时间底座宽度;

2) 使 OPA 工作在饱和状态, 有利于减小信号光中噪声功率和信号光功率比值, 提高信号光信噪比, 但不能改变信号光底座时间宽度;

3) 在抽运激光脉冲放大过程中加光谱滤波装置^[12], 使主激光脉冲光谱通过, 滤掉 ASE 边谱, 减小 ASE 光谱宽度, 同时也降低了 ASE 噪声功率, 既可以减小压缩后信号光的时间底座宽度, 又可以提高压缩后信号光的信噪比。一般抽运光主激光脉冲光谱很窄, 光谱滤波装置应不会对主激光脉冲强度和时间波形产生显著影响;

4) 由数值结果可以看出, 在抽运光中加光谱滤波装置, 可以增大抽运光中的 ASE 噪声随机调制时间宽度到数十皮秒。如果信号光和抽运光的时间延迟和 ASE 调制时间宽度可以相比拟时, ASE 将不会对信号光的信噪比产生影响。但这时对抽运光和信号光的同步精度要求非常高, 一般需要再加一级参变放大, 提高信号光的功率密度。

参 考 文 献

1 Peng Han-sheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 865~872
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 865~872

2 Kodama, R. Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition[J]. *Nature*, 2001, **412**(6849): 798~802
3 Kodama, R. Nuclear fusion-fast heating scalable to laser fusion ignition[J]. *Nature*, 2002, **418**(6901): 933~934
4 Peng Han-sheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 721~729
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 721~729
5 Jovanovic, I. Optical switching and contrast enhancement in intense laser systems by cascaded optical parametric amplification [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(6): 787~789
6 Kitagawa, Y. Prepulse-free petawatt laser for a fast ignitor[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(3): 281~293
7 Nicolas Forget, A. C. Erik Brambrink, Patrick Audebert *et al.*. Pump-noise transfer in optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**: 21
8 Tian Jing-rong, Sun Jing-hua, Wei Zhi-yi *et al.*. Theoretical and experimental studies on large-ratio stretching of femtosecond pulse with Öffner triplet stretcher[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(3): 1200~1207
田金荣, 孙敬华, 魏志义 等. Öffner 展宽器高倍率展宽脉冲的理论及实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(3): 1200~1207
9 Richard A. Baumgartner, Robert k. Byer. Optical parametric amplification[J]. *J. Quant. Electron.*, 1979
10 Nantel, M. Temporal contrast in Ti: Sapphire lasers: Characterization and control[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 1998, **4**(2): 449~458
11 L. N. Ross a, G. H. C. N. b., P. K. Bates. Contrast limitation due to pump noise in an optical parametric chirped pulse amplification system [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **273**(2007): 510~514
12 Okishev, A. V. Spectral filtering in a diode-pumped Nd: YLF regenerative amplifier using a volume Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(13): 8197~8202