

用于拍瓦级激光系统的三维光参量啁啾脉冲放大的数值模拟

王艳海¹ 刘国才¹ 杨庆伟² 任世伟¹

¹河北科技大学理学院, 河北 石家庄 050018

²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

摘要 建立了光参量啁啾脉冲传输放大(OPCPA)的物理模型,采用分步傅里叶算法编写了三维OPA+CPA数值模拟程序,利用该程序可以研究OPCPA系统中的能量放大、增益窄化、自相位调制、空间自聚焦以及脉冲的时间信噪比等问题,对OPCPA系统进行优化设计。利用该程序对神光II第九路拍瓦升级系统(SG-II-U-PW)进行了数值模拟研究,计算结果表明,第九路光路无需作太大改动即可满足拍瓦升级指标,并提出了第九路主放大链的两种运行方案。三维OPA+CPA模拟程序经过简单修改后也可以对飞秒(fs)OPCPA系统、以及未来峰值功率为exawatt级(10^{18} W)的激光系统进行优化设计。

关键词 激光光学; 光参量啁啾脉冲放大; 拍瓦激光器; 增益窄化; 宽带放大; 时间信噪比; B积分

中图分类号 TN241; TN242; O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.071404

Three Dimensional OPCPA Numerical Simulations for a Petawatt Class Laser System

Wang Yanhai¹ Liu Guocai¹ Yang Qingwei² Ren Shiwei¹

¹School of Science, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050017, China

²National Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China

Abstract An optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA) physical model is presented, and a split-step Fourier technique is used to develop a three-dimensional OPA+CPA numerical code (3D OPA+CPA code), which can be used to model the broadband amplification, gaining narrowing, self-phase modulation, spatial self-focusing and the temporal signal-to-noise ratio (SNR) of OPCPA laser facility, and to optimize the design of OPCPA system. The SG-II-U-PW laser facility is studied numerically using this 3D OPCPA code, and the calculated results show that the ninth beam line is suitable to be modified for meeting the design goal of the SG-II-U-PW project. The 3D OPA+CPA code can be modified with ease to model and optimize the designs of femtosecond OPCPA system, and especially the future laser facility with exawatt (10^{18} W) peak intensity.

Key words laser optics; optical parametric chirped pulse amplification; petawatt laser; gaining narrowing; broadband amplification; temporal signal-to-noise-ratio; B-integral

OCIS codes 140.3280; 140.3530; 140.7090

1 引言

得益于啁啾脉冲放大技术(CPA)、光参量放大技术(OPA)、先进激光增益介质和在激光惯性约束核聚变研究的牵引下发展起来的高功率激光技术的成功结合,以钕玻璃(Nd:glass)为功率放大介质的皮秒拍瓦激光技术得到了迅速发展,该技术主要用于快点火和作等离子体背光照相源研究,以及高能量密度物理实验研究等^[1]。典型的准备建造或正在建造的皮秒拍瓦激光器有:美国劳伦斯·利弗莫尔实验室(LLNL)的ARC(Advanced Radiographic Capability)^[2],输出能量 10 kJ、脉宽 10 ps;美国罗彻斯特大学激光力能学实

收稿日期: 2014-03-03; 收到修改稿日期: 2014-04-01; 网络出版日期: 2014-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(11247011)、河北科技大学博士科研启动基金

作者简介: 王艳海(1979—),男,博士,讲师,主要从事拍瓦超短脉冲激光技术方面的研究。

E-mail: wangyanhai@hotmail.com

验室(LLE)的两条超短脉冲光束线 OMEGA EP³, 输出脉宽 1~100 ps, 每束输出 2.6 kJ, 功率 2~3 pW; 日本建造的 FIREX-1 的 10 kJ 拍瓦激光器以及计划中的用于 FIREX-II 的 100 kJ 激光器^[4-5]; 法国为 LMJ 装置建造的 3.6 kJ、500 fs 拍瓦激光器^[6]。我国皮秒超短脉冲技术研究起步较晚, 中国科学院上海光学精密机械研究所(简称上海光机所)高功率激光物理联合实验室正在升级神光 II 第九路为能量 1 kJ、脉宽 1~10 ps 的拍瓦激光器(SG-II-U-PW)^[7]。这些系统通常由前端主振荡器、脉冲展宽器、光参量放大器、多级钽玻璃放大器和脉冲压缩器等构成, 主振荡器输出的百飞秒的超短激光脉冲被展宽器展宽到约 10⁴ 倍, 引入频率啁啾, 经过放大后再压缩回接近傅里叶极限的高能超短脉冲。由于千焦耳 Nd:glass 皮秒拍瓦系统的复杂性, 在确保其安全稳定运行的条件下, 为了实现预期建设指标, 并优化其输出能力, 得到没有严重空间和时间扭曲的最大能量的激光脉冲, 对激光脉冲的传输放大过程进行数值模拟研究极为重要, 引起了人们的极大关注。Guardalben 等^[8]对光参量放大进行了数值模拟研究; 本文作者采用分布傅里叶算法结合四阶龙格-库塔算法对 OPA 过程的光束质量和信噪比进行了详细的数值模拟研究^[9-10]; Chuang 等^[11]运用麦克斯韦方程组和粒子数方程对宽带脉冲的传输放大做了详细研究; Planchon 等^[12]建立了麦克斯韦方程和 Frantz-Nodvik 模型来研究啁啾脉冲的传输放大; 卢兴强等^[13]将 Chuang 等提出的方程组进行了扩展, 使之能够更广泛地应用于宽带脉冲的传输放大。上述研究主要集中于宽带激光脉冲传输放大的某一方面, 基于拍瓦激光器系统的激光脉冲传输放大的全面数值模拟研究还比较缺乏, 本文的研究工作就是根据这一背景开展起来的。

本文建立了 OPA+CPA 的传输放大的物理模型, 编写了相应的三维 OPA+CPA 程序, 来研究拍瓦激光系统中脉冲的传输放大。利用该程序可以计算光栅展宽器和压缩器的设计参数, OPA 的光束质量和时间信噪比, CPA 过程中的增益窄化、增益饱和与自相位调制, 以及 OPA+CPA 脉冲的光束质量和时间信噪比。我们利用该程序对 SG-II-U-PW 系统进行了数值模拟研究, 模拟计算结果可以为 SG-II-U-PW 的设计和运行方案提供理论依据。

2 三维 OPA+CPA 传输放大模型

模型建立以主振荡器输出超短激光脉冲为起点, 依次经过光栅展宽器展宽、OPA、CPA 和光栅压缩器压缩, 贯穿整个 OPCPA 拍瓦激光系统。

2.1 脉冲展宽和压缩

采用光线追迹法和等效光栅对原理来计算展宽器的各级色散和带宽^[14-16]。种子激光脉冲经过展宽器色散后, 相当于在频域内引入了相移 $\varphi(\omega)$, 被线性啁啾展宽。压缩器的作用等效于在频域内引入相反的相移 $-\varphi(\omega)$, 将线性啁啾脉冲再压缩回超短脉冲。超短激光脉冲的展宽过程计算, 如下从时域出发, 将激光脉冲复振幅进行傅里叶变换, 得到激光脉冲频域的复振幅分布, 引入相移 $\varphi(\omega)$, 再进行傅里叶逆变换即可得到时域内展宽后的激光脉冲的复振幅分布^[17]。啁啾脉冲压缩过程与展宽过程类似, 只不过在频域内引入了与展宽过程相反的相移。

将频域相移 $\varphi(\omega)$ 在中心频率 ω_0 处进行泰勒展开可得

$$\varphi(\omega) = \varphi(\omega_0) + \varphi^{(1)}(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\varphi^{(2)}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{3!}\varphi^{(3)}(\omega_0)(\omega - \omega_0)^3 + \dots, \quad (1)$$

式中 $\varphi^{(1)}(\omega_0)$, $\varphi^{(2)}(\omega_0)$, $\varphi^{(3)}(\omega_0)$ 分别对应中心频率处 ω_0 的群延时(GD)、群速度色散(GVD)和三阶色散(TOD)。

2.2 光参量放大

种子激光脉冲经过展宽器展宽后, 被导入到 OPA 放大装置中进行非线性放大。为了把放大的信号光从抽运光和闲置光中分离出来, 须采用非共线光参量放大, 当信号光脉冲被展宽到纳秒量级时, 色散效应可忽略, 并忽略掉晶体自身的损耗, 考虑到走离和衍射效应, 经过行波坐标变换, 得到非线性耦合波方程^[18]

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_s}{\partial z} + \tan \rho_s \frac{\partial E_s}{\partial y} - \frac{1}{2jn_s k_s \cos \rho_s} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_s &= -j \frac{\omega_s d_{\text{eff}}}{cn_s \cos \rho_s} E_i^* E_p \exp(-j\Delta kz) \\ \frac{\partial E_i}{\partial z} + \tan \rho_i(t) \frac{\partial E_i}{\partial y} - \frac{1}{2jn_i k_i \cos \rho_i} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_i &= -j \frac{\omega_i d_{\text{eff}}}{cn_i \cos \rho_i} E_s^* E_p \exp(-j\Delta kz), \\ \frac{\partial E_p}{\partial z} + \tan \rho_p \frac{\partial E_p}{\partial y} - \frac{1}{2jn_p k_p} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_p &= -j \frac{\omega_p d_{\text{eff}}}{cn_p} E_s E_i \exp(j\Delta kz) \end{aligned} \quad (2)$$

(2)式中,下标 s, i, p 分别表示信号光、闲置光和抽运光。 n 表示激光在晶体内的折射率, k 为激光在真空中的波矢量, $\rho_s, \rho_i(t)$ 分别为信号光、闲置光波矢量与抽运光波矢量的夹角, ρ_p 为抽运光在晶体内的走角。 d_{eff} 为非线性耦合系数, Δk 表示三波相位失配。光参量作用过程耦合波方程(2)可以采用分步傅里叶算法进行数值求解^[19]。

2.3 啁啾脉冲传输放大

经过 OPA 放大后的激光脉冲被注入到多级或多程放大器中进行放大,会经受增益窄化、增益饱和、自相位调制和空间非线性自聚焦等物理过程,尤其是自相位调制和空间非线性自聚焦效应会导致光束产生时间和空间畸变,不仅影响光束质量,限制激光输出功率,而且对激光介质和光学元件可能产生灾难性破坏。本文选择非线性薛定谔方程结合速率方程作为计算 CPA 过程的物理模型,根据 CPA 系统中线性啁啾脉冲的特性,频率间隔与时间间隔的线性对应关系,将模型中的增益系数表达式进行修正,不同频率有不同的增益系数。计算过程中忽略传输色散,则非线性薛定谔方程可以修改为^[20-21]

$$\frac{\partial E(x, y, z, t)}{\partial z} = \left[\frac{i}{2\beta_0} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \frac{i\omega_0 n_2}{c} |E|^2 + \frac{g - \alpha}{2} \right] E(x, y, z, t), \quad (3)$$

式中 β_0 为线性传输常数, ω_0 为中心频率, n_2 是非线性折射率系数, g 是增益系数, α 是损耗系数。考虑到增益窄化和增益饱和对增益系数的影响,引入速率方程^[11]

$$\frac{\partial N(x, y, z, t)}{\partial t} = -\frac{2^*}{\hbar\omega} \sigma(\omega) N(x, y, z, t) I(x, y, z, t), \quad (4)$$

式中 2^* 是介于 1 和 2 之间的饱和因子,对于四能级结构增益介质 $2^*=1$, $N(z, t)$ 是反转粒子数密度, \hbar 是约化普朗克常数, $\sigma(\omega)$ 是受激发射截面系数, I 是脉冲强度。可将(3)式中的增益系数 g 写为

$$g = \sigma(\omega) N(x, y, z, t) = \sigma_0 f_g(\omega) N(x, y, z, t), \quad (5)$$

式中 σ_0 是中心波长处的受激发射截面系数, f_g 是受激发射截面的线型函数,可为高斯型、洛仑兹型、泊松型等增益线型,也可以采用实测的材料的荧光谱线线型。对于线性啁啾展宽脉冲来说,其频率是时间的函数

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega_0 + 2bt \\ b &= \frac{\Delta\omega}{2\Delta t_{\text{ei}}} = \frac{\pi c \Delta\lambda}{\Delta t_{\text{ei}} \lambda_0^2} \end{aligned}, \quad (6)$$

式中 b 为线性啁啾, $\Delta\omega, \Delta\lambda, \Delta t_{\text{ei}}$ 分别是激光脉冲频率、光谱和时间的半峰全宽。对于大展宽比的激光脉冲,展宽时间宽度与频域二阶相位项有下列关系^[12]

$$\Delta t_{\text{ei}} = \left[\frac{4 \ln 2}{\Delta t_0} \left| \varphi^{(2)}(\omega_0) \right| \right], \quad (7)$$

式中 Δt_0 是激光脉冲展宽前的傅里叶变换限半峰全宽。

在高功率激光系统中通常采用 B 积分值来衡量非线性效应的严重程度, B 积分描述了介质的非线性折射率所引起的附加相位变化,可表示为^[22]

$$B(r, t) = \frac{2\pi n_{21}}{\lambda} \int_0^L I(r, t) dz, \quad (8)$$

式中 n_{21} 为与光强有关的非线性折射率系数 (cm^2/W), 与(3)式中的 n_2 的关系为 $n_{21} = 2n_2 / (\epsilon_0 c n)$ 。啁啾脉冲在放大介质中传输时,如果脉冲的光强较高,将会产生 B 积分,在多级放大过程中, B 积分将明显累加,不但导致光束质量严重下降,使得再压缩后的超短脉冲产生畸变,而且还将增加光学元器件损伤的风险。

对于大展宽比啁啾脉冲来说,其频率与时间呈线性对应关系,其传输放大的计算可以在时域内进行,把脉冲宽度分成小的时间切片,把增益介质分段。(3)~(5)式采用分步傅里叶算法和四阶龙格-库塔算法求解,计算过程中忽略传输色散,研究增益窄化、增益饱和以及自相位调制和空间衍射对脉冲传输放大特性的影响。

2.4 三维 OPA+CPA 模拟程序

根据上述激光脉冲传输模型,编写了三维模拟程序,主要分为三大模块:激光脉冲的展宽与压缩模块, OPA 模块和 CPA 模块,各部分的功能如表 1 所示。

表1 三维 OPA+CPA 程序模块

Table 1 Program module of three-dimensional OPA+CPA code

Modules of stretcher and compressor	OPA	CPA
Dispersion coefficient	Conversion efficiency and stability	Gain narrowing and saturation
Bandwidth	Spatial and temporal distribution of laser pulse	Output energy and energy flux
Temporal phase noise	Spectral shape	Spatial and temporal distribution of laser pulse
Spectral cutting	Phase transfer in OPA	B integral and self-focusing effect
Signal to noise ratio	Signal to noise ratio	Spectral shape and temporal gain narrowing of laser pulse

3 SG-II-U-PW 系统的数值模拟

徐光等^[23]讨论了 SG-II-U-PW 系统的设计方案,参考文中给出的参数,应用三维 OPA+CPA 程序对 SG-II-U-PW 进行了数值模拟。模拟过程包括种子激光脉冲进行光栅展宽、OPA 放大、Nd:glass 放大链中的 CPA 传输放大和光栅压缩器压缩。

3.1 光栅展宽器和压缩器啁啾率和带宽

SG-II-U-PW 激光系统采用 Öffner 八通展宽系统,光栅刻线密度为 1740 mm,设计啁啾率为 3.2 ns/6.5nm,光栅压缩器采用根据文献[24-25]中的设计参数,展宽器与压缩器的二阶色散系数为 $2.54 \times 10^8 \text{ fs}^2$,光栅展宽器带宽 19.5 nm,压缩器带宽 7 nm,展宽器和压缩器的光谱透射率如图 1 所示。

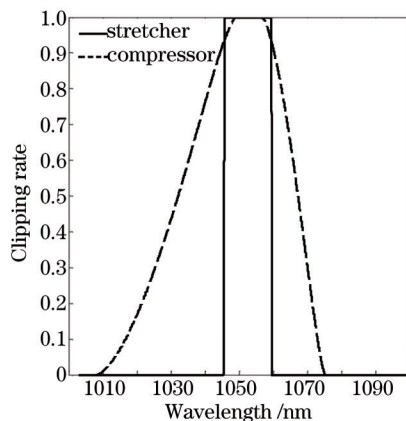


图1 展宽器和压缩器的光谱透射率

Fig.1 Spectral transmissivity of stretcher and compressor

3.2 OPA 数值模拟

SG-II-U-PW 激光系统采用两级 OPA,第一级为预放大,第二级为功率放大,为了减小走离效应导致的空间光斑调制和提高预脉冲对比度,第二级 OPA 采用闲置光注入。两级 OPA 输出信号光的能量稳定性、转换效率和光束质量之间存在一个相互制约关系。经过数值研究结果表明,当第一级高增益 OPA 工作在过饱和状态时,第二级 OPA 有一个能量转换效率比较高、光斑强度调制较小的稳定工作区^[8,26],第二级 OPA 工作在近饱和状态。两级 OPA 模拟参数见表 2,第二级 OPA 输出能量 112 mJ,能量起伏 $\pm 3\%$,光斑直径 2.8 mm,脉冲时间半极大全宽为 3.8 ns。OPA 信号光输出时间积分光斑强度分布如图 2(a)所示,光束空间分布接近平顶分布。信号光光斑中心脉冲光谱强度分布如图 2(b)所示,对于大啁啾量展宽脉冲,其频率与时间呈线性对应关系,由此可知光谱强度分布和时间强度分布一致,也基本接近平顶分布。从以上讨论可以看出,该设计方案可以同时实现 OPA 放大的能量的高稳定性、高转换效率和较高的光束质量。

表2 OPA模拟参数

Table 2 Parameters used for OPA studies

	Pump pulse		Signal pulse
Pulse time width (FWHM)	4 ns		220 fs, 3.2 ns(chirped)
Beam diameter (FWHM)	OPA I, 2.0 mm	OPA II, 3.0 mm	OPA I, 2 mm
Pulse energy	60~120 mJ	140~300 mJ	500 pJ
Temporal shape	Fourth-order super-gaussian		Gaussian distribution
Spatial distribution	Fourth-order super-gaussian		Gaussian distribution
Nonlinear crystal: LBO	OPA I: 5 mm×5 mm×30 mm (two crystals), OPA II: 10 mm×10 mm×11 mm		
Noncollinear angle (or walk-off angle)	0.42°		0.5°

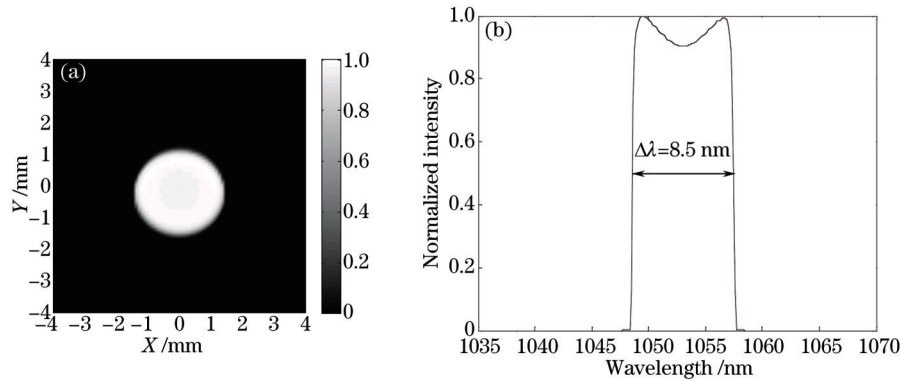


图2 (a) 时间积分归一化光斑强度分布; (b) 光斑中心光谱归一化强度

Fig.2 (a) Normalized beam cross-section for the temporally integrated signal beam output;

(b) normalized spectral shape in beam center

3.3 CPA数值模拟

前端OPA输出的啁啾放大脉冲,经过适当能量衰减并扩束后,将被注入到后续棒状和片状Nd:glass放大器进行放大,提取更多的能量,最后进行压缩。根据SG-II-U-PW系统的设计目标,考虑到啁啾脉冲压缩过程将经过光栅衍射四次,单次衍射效率约为92%,同时考虑到各级空间滤波器的透射率、窗口玻璃的透过损耗、旋转偏振以及导入和导出反射镜的表面损耗,Nd:glass放大器最终输出啁啾脉冲的能量应小于1700 J。

SG-II-U-PW系统将以神光-II第九路为主放大器,其各级放大的N31型磷酸盐Nd:glass是由上海光机所20世纪90年代开发的,其主要性能指标已经达到国际先进水平^[27],N31型磷酸盐钽玻璃的材料参数见表3,其受激发射截面线型分布见图3(上海光机所高功率激光单元技术研发中心实测数据)。

表3 N31型磷酸盐钽玻璃的材料参数

Table 3 Parameters of N31 phosphat glass

Laser properties		Optical properties	
Fluorescent linewidth FWHM: $\Delta\lambda_n$	20.1 nm	Index of refraction	1.53 (1053 nm)
Effective fluorescence linewidth: $\Delta\lambda_e$	24.5 nm	Nonlinear refractive index	1.15×10^{-13} esu
Spontaneous emission lifetime: τ	340 μ s	1.053 μ m index of refraction	1.528
Stimulated emission cross-section	3.8×10^{-20} cm ²	Abbe number	66.2

利用CPA计算模块对SG-II-U拍瓦系统进行了三维数值模拟计算,主要计算了增益窄化、能量放大和B积分,计算结果见表4。输入脉冲能量为10 mJ,其输入脉冲时空分布见OPA模拟部分。从表中可以看出第九路终端可输出脉冲能量为2518 J,总的能量增益为 2.5×10^5 ,光路无需作太大改动即可满足拍瓦升级所需的能量要求,各级放大器总的B积分累积 $\sum B = 1.70 < 1.8$ 。从各级放大器的能流密度和B积分增量可以看出非线性效应主要产生在最后三级放大器,尤其是 Φ 350放大器,其能流密度最高,达到 3.13 J/cm²,B积分增量高达0.843。如果激光脉冲空间振幅和位相存在畸变,由于空间自聚焦效应,尤其是小尺度自聚焦效应,将会导致 Φ 350放大器面临较高的安全风险。

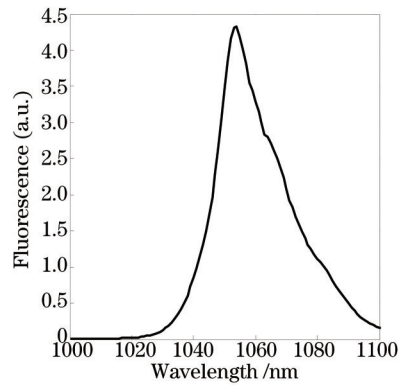


图3 N31型磷酸盐钕玻璃受激发射截面

Fig.3 Emission cross section of N31 phosphate glass

表4 各级放大器增益以及B积分计算结果

Table 4 Numerical results of gains and B-integral in every amplifier stage

Amplification stage	Beam aperture /mm	Output energy /J	Energy flux density $/(J/cm^2)$	Gain	B-integral increment	B-integral accumulation
Φ 40	30	0.18	0.03	18	0.002	0.002
Φ 40	30	2.11	0.30	11.7	0.033	0.035
Φ 70	60	13.25	0.47	6.3	0.074	0.109
Φ 100	90	94.23	1.48	7.11	0.237	0.346
Φ 200	190	672.5	2.37	7.14	0.497	0.843
Φ 350	320	2518	3.13	3.74	0.86	1.70

图4为数值模拟得到的Nd:glass终端放大器输出的脉冲时间波形、光谱分布、时间积分光斑强度分布和B积分累积。由于增益窄化效应导致放大后啁啾脉冲的时间宽度和光谱宽度变窄,OPA输出脉冲的脉宽和B积分累积。

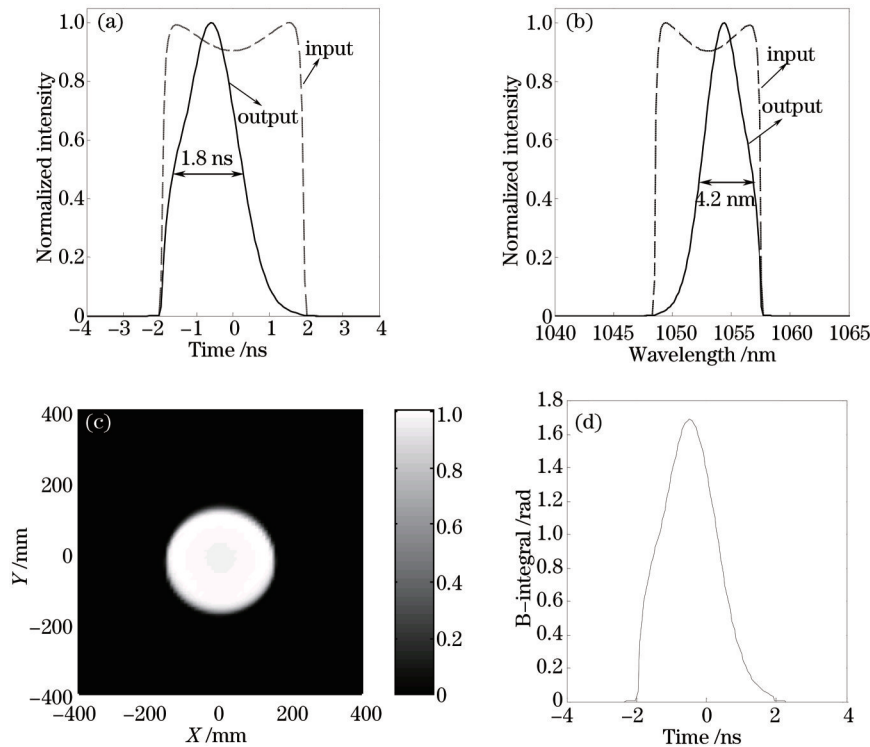


图4 SG-II-U-PW系统终端放大器输出脉冲特性。(a) 脉冲光斑中心处的归一化时间强度分布;(b) 输入和输出脉冲光斑中心的归一化光谱强度分布;(c) 输出时间积分光斑强度分布;(d) B积分累积

Fig.4 Characters of the output pulse from the last amplifier in SG-II-U-PW. (a) Normalized temporal profiles in the beam center; (b) normalized spectral profiles in the beam center; (c) normalized beam cross section for the temporally integrated output pulse; (d) total accumulated B-integral

谱宽分别为 3.8 ns 和 8.5 nm, 增益窄化后分别变为 1.8 ns 和 4.2 nm, 见图 4(a)、(b) 所示。由于啁啾脉冲的频率和时间的线性对应关系, 脉冲的时间增益和光谱窄化的关系可以描述为

$$\tau_A = \frac{\Delta\lambda_C}{\Delta\lambda_{seed}} \Delta t_{seed}, \quad (9)$$

式中 τ_A 、 $\Delta\lambda_C$ 、 $\Delta\lambda_{seed}$ 和 Δt_{seed} 分别为放大后啁啾脉冲时间宽度、主放大链的增益谱宽、注入主放大链的脉冲谱宽和脉宽。(4.2 nm×3.8 ns)/8.5 nm=1.87 ns, 与数值计算结果一致。图 4(c) 为放大后脉冲的时间积分空间强度分布, 呈超高斯平顶分布。图 4(d) 为主放大链的 B 积分累积, 尽管输入脉冲时间波形略微呈中心凹陷, 但由于增益窄化效应和轻微的增益饱和导致在 1054 nm 处出现峰值, 脉冲峰值处的 B 积分累积为 1.7, 满足 SG-II-U-PW 设计指标。

图 5 为计算得到的 Nd:glass 放大链输出的啁啾脉冲经过再压缩后的时间波形, 由于增益窄化效应导致光谱宽度为 4.2 nm, 图 5(a) 显示再压缩后脉宽为 538 fs, 脉冲时间带宽积为 0.61。图 5(b) 为再压缩后脉冲的时间信噪比, 由于光栅光谱剪切、OPA 放大过程对光谱的软剪切和整形、Nd:glass 主放大链的光谱增益窄化和光栅压缩器的光谱剪切等综合效应导致脉冲的时间信噪比下降, 在主脉冲前沿 20 ps 处, 信噪比为 $10^{10}:1$ 。计算中未加入光栅加工面型误差导致的位相噪声和 OPA 放大过程中抽运光中 ASE 噪声以及参量荧光对信噪比的影响。

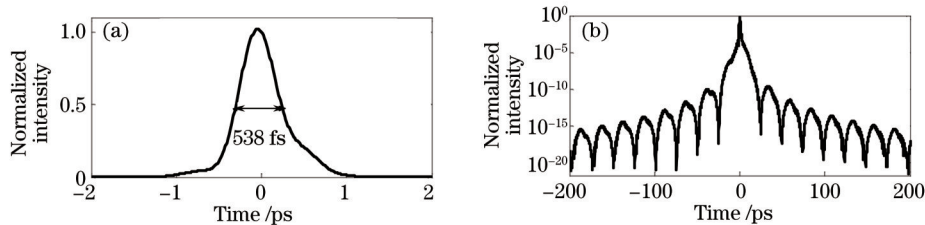


图 5 再压缩后的脉冲时间特性。(a) 再压缩后的强度归一化的时间波形; (b) 时间信噪比信噪比

Fig.5 Temporal characters of the compressed pulse. (a) Normalized temporal profile of the compressed pulse; (b) temporal SNR.

从以上模拟可以看出, 神光 II 第九路光路基本满足 SG-II-U-PW 升级需求。Nd:glass 光路也可以做出简单调整以便降低末端两级片状放大器的通量密度和 B 积分增量, 在满足 SG-II-U-PW 系统升级要求(1 kJ, 1 ps)的条件下, 激光器安全运行可以有两种选择方案: 1) 原光路不做改动, 减小经过 OPA 放大后的激光脉冲能量, 使得注入 Nd:glass 放大链的脉冲能量不大于 10 mJ; 2) 适当提高 Nd:glass 放大链前面几级放大器的增益, 降低 $\Phi 200$ 的增益(可以通过撤掉几片 Nd:glass 来实现), 则注入放大链的脉冲能量应不低于 30 mJ。

为了确保 SG-II-U-PW 激光器低风险、安全运行, 仍有很多问题需要深入仔细研究, 如放大器增益的空间非均匀性导致的填充因子下降问题, OPA 中抽运光空间调制和波前畸变导致的信号光的振幅和位相调制, OPA 和 Nd:glass 主放大链在脉冲时间增益窄化和光谱增益窄化的有效匹配问题, 宽带激光脉冲在 Nd:glass 放大链的空间自聚焦效应, 光栅损伤问题, 拍瓦系统的时间信噪比和可聚焦能力等。以上问题都可以通过给出的三维 OPA+CPA 数值模拟程序来进行研究, 对拍瓦系统进行优化设计, 为实验提供理论依据。

4 结 论

主要讨论了 OPCPA 激光脉冲传输放大的物理模型和三维 OPCPA 的数值模拟研究, 根据 OPCPA 模型编写了相应的三维 OPA+CPA 数值模拟程序。应用该程序对 SG-II-U-PW 系统进行了数值模拟研究, 模拟结果表明, 现有 SG-II 第九路无需太大的光路改动即可实现能量不小于 1700 J 和脉宽不大于 1 ps 的输出能力。另外根据模拟结果, 提出了神光 II 第九路满足 SG-II-U-PW 的两种运行方案, 模拟结果可以为 SG-II-U-PW 的优化设计和安全运行提供理论依据。对该程序参数进行修改后也可以将其应用到飞秒级 OPCPA 系统的设计和优化, 尤其是将其拓展应用到大能量百拍瓦甚至 exawatt 级激光系统的可行性方案的探索研究^[28]。

参 考 文 献

- 1 Peng Hansheng. 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(1)[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 721-729.
- 2 Barty C, Key M, Britten J, *et al.*. An overview of LLNL high-energy short-pulse technology for advanced radiography of laser fusion experiments[J]. Nuclear Fusion, 2004, 44(12): S266.
- 3 Kelly J H, Waxer L J, Bagnoud V, *et al.*. OMEGA EP: High-energy petawatt capability for the OMEGA laser facility[C]. J Phys IV EDP Sciences, 2006, 133: 75-80.
- 4 Miyanaga N, Azechi H, Tanaka K, *et al.*. 10- kJ PW laser for the FIREX- I program[C]. Journal de Physique IV (Proceedings), 2006, 133: 81-87.
- 5 Azechi H, Mima K, Fujimoto Y, *et al.*. Plasma physics and laser development for the fast- ignition realization experiment (FIREX) project[J]. Nuclear Fusion, 2009, 49(10): 104024.
- 6 Blanchot N, Behar G, Berthier T, *et al.*. Overview of PETAL, the multi-petawatt project on the LIL facility[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2008, 50(12): 124045.
- 7 Yaping D, Guang X, Tao W, *et al.*. Development of 1 kJ PW laser beamline in SG-II facility[C]. CLEO/Europe and IQEC 2007 Conference, 2007. CA_10.
- 8 Guardalben M J, Keegan J, Waxer L J, *et al.*. Design of a highly stable, high-conversion-efficiency, optical parametric chirped-pulse amplification system with good beam quality[J]. Opt Express, 2003, 11(20): 2511-2524.
- 9 Wang Yanhai, Pan Xue, Li Xuechun, *et al.*. The influence of wave-front-distorted pump pulse on the beam quality of OPA front-end system of the petawatt laser[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3088-3093.
王艳海, 潘 雪, 李学春, 等. 抽运光波前畸变对拍瓦激光器前端 OPA 光束质量的影响[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 3088-3093.
- 10 Wang Yanhai, Pan Xue, Wang Jiangfeng, *et al.*. Restrictions of signal-to-noise ratio by amplified spontaneous emission noise of pump pulse in optical parametric chirped pulse amplification system[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 980-985.
王艳海, 潘 雪, 王江峰, 等. 抽运光中 ASE 噪声对 OPCPA 信噪比的影响[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 980-985.
- 11 Chuang Y H, Zheng L, Meyerhofer D D. Propagation of light-pulses in a chirped-pulse-amplification laser[J]. IEEE J Quantum Electron, 1993, 29(1): 270-280.
- 12 Planchon T, Burgy F, Rousseau J P, *et al.*. 3D modeling of amplification processes in CPA laser amplifiers[J]. Appl Phys B-Lasers O, 2005, 80(6): 661-667.
- 13 Lu Xingqiang, Qian Liejia, Fan Dianyuan. Theory and simulation of amplified pulses from chirped-pulse laser amplifier [J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(10): 882-884.
卢兴强, 钱列加, 范滇元. 啁啾脉冲激光放大器输出光束时间特性的理论和数值模拟[J]. 中国激光, 2002, 29(10): 882-884.
- 14 Tian Jinrong, Sun Jinghua, Wei Zhiyi, *et al.*. Theoretical and experimental studies on large-rate 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.
- 15 Trentelman M, Ross I N, Danson C N. Finite size compression gratings in a large aperture chirped pulse amplification laser system[J]. Appl Opt, 1997, 36(33): 8567-8573.
- 16 Li B C, Theobald W, Welsch E, *et al.*. Optimization of grating size in chirped-pulse-amplification laser system[J]. Appl Phys B-Lasers, 2000, 71(6): 819-826.
- 17 Backus S, Durfee C G, Murnane M M, *et al.*. High power ultrafast lasers[J]. Rev Sci Instrum, 1998, 69(3): 1207-1223.
- 18 Baumgartner R, Byer R. Optical parametric amplification[C]. IEEE J Quantum Electron, 1979, QE-15(6): 432-444.
- 19 Milonni P W, Auerbach J M, Eimerl D. Frequency-conversion modeling with spatially and temperally varying beams [C]. Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion (ICF), 1995. 230-241.
- 20 Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- 21 Bridges R E, Boyd R W, Agrawal G P. Multidimensional coupling owing to optical nonlinearities .1. General formulation [J]. J Opt Soc Am B, 1996, 13(3): 553-559.
- 22 Perry M D, Ditmire T, Stuart B C. Self-phase modulation in chirped-pulse amplification[J]. Opt Lett, 1994, 19(24): 2149-2151.
- 23 Xu G, Wang T, Li Z, *et al.*. 1 kJ petawatt laser system for SG-II-U program[J]. The Review of Laser Engineering, 2008, 36: 1172-1175.

- 24 Yang Q, Guo A, Xie X, *et al.*. Stretcher design for the SGII petawatt upgrade laser facility[J]. *The Review of Laser Engineering*, 2008, 36: 1053-1055.
- 25 Li Z, Xu G, Wang T, *et al.*. Object-image-grating self-tiling to achieve and maintain stable, near-ideal tiled grating conditions[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(13): 2206-2208.
- 26 Bagnoud V, Begishev I A, Guardalben M J, *et al.*. 5 Hz, >250 mJ optical parametric chirped-pulse amplifier at 1053 nm [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(14): 1843-1845.
- 27 Jiang Zhonghong. ICF laser glasses[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(9): 1265-1276.
姜中宏. 用于激光核聚变的玻璃[J]. *中国激光*, 2006, 33(9): 1265-1276.
- 28 Hays G R, Gaul E W, Martinez M D, *et al.*. Broad-spectrum neodymium-doped laser glasses for high-energy chirped-pulse amplification[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(21): 4813-4819.