

SGII-5 PW 激光系统大能量光参量放大器光束 近场分布均匀性

周 剑^{1,2}, 孙美智^{1*}, 梁 潇^{1,2}, 康 俊¹, 郭爱林¹, 杨庆伟¹, 谢兴龙¹, 朱健强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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提高神光 II 5 PW (SGII-5 PW) 超短脉冲激光系统的运行安全性, 针对大能量光参量啁啾脉冲放大 (OPCPA) 光束近场分布均匀性问题, 从理论上进行了数值模拟, 并与实验数据进行了对比分析。在 1 PW 级放大器模拟中, 以预放大器以及神光 II 大能量抽运脉冲的测量数据为基础, 利用参量耦合波方程组数值模拟方法, 得到了近场填充因子与光通量对比度在光参量放大过程中的演变, 并结合转换效率与输出稳定性进行讨论, 得到了对应于高光束质量、高转换效率与高稳定性的非线性晶体长度优化范围, 结果还表明抽运光对放大后光束均匀性影响较大, 进一步提升神光 II 第 7 路光束质量是大幅提升第 2 级 OPCPA (OPCPA-II) 光束均匀性的切实途径。

关键词 非线性光学; 光参量啁啾脉冲放大; 非共线相位匹配; 填充因子; 通量对比度

中图分类号 O437.3; TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0801007

Analysis on Near-Field Distribution Uniformity of High Energy Optical Parametric Chirped Pulse Amplifier in SGII-5 PW System

Zhou Jian^{1,2}, Sun Meizhi¹, Liang Xiao^{1,2}, Kang Jun¹, Guo Ailin¹, Yang Qingwei¹,
Xie Xinglong¹, Zhu Jianqiang¹, Lin Zunqi¹

¹State Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to improve the operation security of Shenguang II 5 PW (SGII-5 PW) ultrashort pulse laser system, the near-field distribution uniformity of large energy optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA) beam is numerically simulated, and the simulation results are compared with experimental results. In the 1 PW amplifier, based on the measurement data of the preamplifier and the SGII high energy pump pulse, the evolution of the near field fill factor and the fluence beam contrast in optical parametric amplification process are presented by numerical simulation of parametric coupling wave equations. The conversion efficiency and the amplification stability are also discussed. The optimal range of nonlinear crystal length, in which high beam quality, high conversion efficiency and high stability can be achieved simultaneously, is obtained. The results also indicate that the pump light greatly affects the amplified beam uniformity. Enhancement of the SGII 7th beam quality is a practical way to improve the beam uniformity of second stage OPCPA.

Key words nonlinear optics; optical parametric chirped pulse amplification; non-collinear phase matching; fill factor; fluence beam contrast

OCIS codes 190.4410; 190.4970; 140.4480

收稿日期: 2017-02-15; **收到修改稿日期:** 2017-04-01

基金项目: 国家自然科学基金 (11304332)、中国科学院对外合作重点项目

作者简介: 周 剑(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事超短脉冲放大技术方面的研究。E-mail: zhoujian1613@163.com

导师简介: 谢兴龙(1968—), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事短脉冲与强激光技术方面的研究。

E-mail: xiexl329@mail.shnc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: eric913@siom.ac.cn

1 引 言

光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术自20世纪90年代被提出并证实之后,已经成为实现超短脉冲放大的重要途径^[1-2]。在皮秒拍瓦高能高功率激光系统与飞秒超高功率激光系统中,OPCPA技术已经成为前端预放大的主要方式,甚至成为波长为808 nm与910 nm的装置中唯一的放大方式^[3-4]。针对亚艾瓦量级超高功率激光装置的研制需求,输出功率为10 PW量级的单光束原型机正在研制中。在全OPCPA激光系统中,放大器输入、输出的光束口径会达到300 mm量级;相应地,在终端光学组件,特别是在压缩器中,光束口径会进一步增大至400 mm量级以降低光通量密度;在以特定角度斜入射情况下,光栅尺寸为近米级甚至更大^[5-9]。大口径光栅的制备工艺复杂,制造周期极长,而且价格昂贵;光栅的破坏阈值远低于玻璃元件,当平均通量密度一定时,若光栅局部辐照能流密度太大,则极易出现区域损伤,而且在常规运行中损伤区域只会持续生长并可能引发后续光学元件的膜层损伤。因此,全口径光束均匀性制约了超短脉冲全系统的输出能力,对装置运行的安全性非常重要。

目前有很多关于OPCPA系统的理论和实验研究,包括系统的转换效率、稳定性、信噪比等^[10-15]。在参量放大过程中,信号光、抽运光以及闲频光存在空间强度分布与波前相位畸变的耦合传递,对放大输出的信号光脉冲光束均匀性产生影响。文献^[16-17]对波前畸变在三波混频中的传递进行了研究,发现波前畸变的作用在光束传输过程中逐渐演化为强度调制,但没有给出抽运光强度分布对放大后光束均匀性影响的定量描述。本文针对大口径OPCPA系统,以神光II(SGII)装置第7路输出脉冲的倍频光作为抽运光,以SGII-5 PW系统前端OPCPA输出脉冲光作为信号光,利用耦合波方程组进行数值模拟。由于当前没有抽运光相位信息数据,仅限于分析具有不均匀近场强度分布的抽运光在参量放大过程中对输出信号光近场的影响。通过填充因子 F_F 与通量对比度 F_{BC} 两个参数在OPCPA过程中的变化,并将强度近场分布的模拟结果与联机实验采集数据进行对比,结合系统的转换效率、稳定性展开讨论分析。本文研究结果对SGII-5 PW激光系统大能量OPCPA优化具有实际指导意义。

2 大能量OPCPA的理论分析与实验分析

2.1 近场强度描述参数

近场光束均匀性可通过填充因子 F_F 与通量对比度 F_{BC} 来描述。将 F_F 定义为光束有效截面内的平均强度 I_{avg} 与最大强度 I_{max} 之比^[18]; F_F 数值越小,表明光束近场某局部区域存在越强的尖峰,在该区域的光学元件越易被破坏,因此 F_F 反映了近场强度局部特征,是高功率激光器安全运行的重要指标之一, F_F 数值越接近于1越好。 F_F 可表示为

$$F_F = I_{avg} / I_{max} \quad (1)$$

光束的通量对比度可表示为

$$F_{BC} = \sqrt{\frac{1}{pq} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \{ [F(x_i, y_j) - \bar{F}] / \bar{F} \}^2}, \quad (2)$$

式中 $F(x_i, y_j)$ 为取样区域内任意取样点 (x_i, y_j) 处的光通量, \bar{F} 为取样区域内的平均光通量, p 与 q 分别为横截面取样区域内横向、纵向取样点的个数。 F_{BC} 反映了近场分布的全局统计特征,可以较好地描述近场光束均匀性,其数值越小表明近场统计特性越接近于均匀^[19]。 F_{BC} 结合 F_F ,可以较好地评价光束近场强度分布特征。

2.2 大能量OPCPA注入信号光与抽运光

SGII-5 PW激光系统结构示意图如图1所示,全放大链路由3级OPCPA组成,第1级OPCPA(OPCPA-I)作为前端预放大提供主要增益(6×10^9 量级),经过预压缩器及空间滤波器SF3后扩束注入第2级OPCPA(OPCPA-II)的单脉冲能量为80 mJ,半峰全宽(FWHM)为60 nm,对应的脉冲宽度为1.5 ns。OPCPA-II单元以SGII装置第7路的倍频光作为抽运光源,以OPCPA-I的输出作为种子源,设计实现啁啾脉冲放大输出能量为40 J,经过压缩之后输出能量达到30 J,脉冲宽度为30 fs,峰值功率在1 PW量级。当前的OPCPA-II输出脉冲经压缩后可实现压缩聚焦,得到的压缩脉冲能量为30 J,脉冲宽度为27 fs,峰值功

率达到 1 PW 量级,已完成首轮物理实验。SGII 第 9 路装置为多功能高能激光系统,具备多脉冲宽度及强大的时空整形能力,其输出脉冲的光束质量远优于 SGII 8 路装置,可输出的倍频脉冲能量超过 3000 J^[20]。第 3 级 OPCPA(OPCPA-III)单元将以第 9 路的倍频光作为抽运光源,以实现 250 J 的啁啾脉冲放大输出能量,输出脉冲经压缩后的能量及脉冲宽度分别优于 150 J 和 30 fs,峰值功率达到 5 PW。这里以 OPCPA-II 单元为研究目标,以实验测量数据为基础,从理论上研究 OPCPA 中的光束近场演化,该单元注入脉冲光的详细参数如表 1 所示,OPCPA 采用三硼酸锂晶体(LBO)非共线结构的第一类匹配方式^[4]。表 1 中 λ_0 为脉冲的中心波长, E 为脉冲能量, m 和 n 分别为脉冲的时域和空域的超高斯阶数, τ_0 为脉冲宽度, $\Delta\lambda$ 为光谱的 FWHM, Φ 为直径, C 为脉冲的啁啾特性参数。

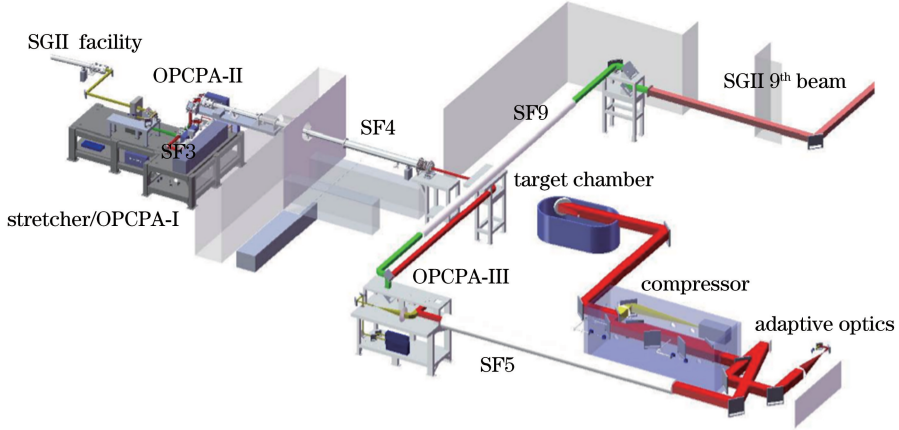


图 1 SGII-5 PW 激光系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of SGII-5 PW laser system

表 1 输入信号光与抽运光参数

Table 1 Parameters of incident signal light and pump light

Parameter	λ_0 /nm	E /J	m	n	τ_0 /ns	$\Delta\lambda$ /nm	Size /mm	C
Signal light in experiment	808.0	0.08	—	—	1.5	About 60	$\Phi 77$	173557
Pump light in experiment	526.5	110.00	—	—	2.5	—	55×55	0
Ideal signal light	808.0	0.08	6	8	1.5	—	$\Phi 77$	173557
Ideal pump light	526.5	110.00	6	8	2.5	—	55×55	0

利用 CCD 测量得到的 OPCPA-I 输出脉冲的近场光斑分布如图 2(a)、(b)所示。大能量 OPCPA 作用于 $55 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ 的方形区域,由(1)~(2)式计算得到信号光的 F_F 与 F_{BC} 分别为 0.6348 与 0.2873。将 SGII 装置第 7 路输出脉冲的倍频光作为大能量 OPCPA 的抽运光,得到的近场光斑分布如图 2(c)、(d)所示,有效横截面区域内抽运光的 F_F 与 F_{BC} 分别为 0.7546 与 0.2600。将图 2(a)、(c) 作为注入信号光与抽运光的近场分布,并进行模拟。

为了对比分析近场光束均匀性问题,明确进一步提高抽运光近场光束均匀性对 SGII-5PW 输出放大信号光均匀性的提升程度,可以分别进行以下 2 种计算:1)以实验测量的抽运光与信号光的时域和空域强度数据作为计算依据,数值模拟输出放大信号光的近场分布随晶体长度的变化情况;2)将理想时空超高斯抽运光或信号光分别与实际信号光及抽运光相互作用,定量给出信号光均匀性的变化过程,估计通过优化注入抽运光或者信号光均匀性对 OPCPA-II 输出信号光均匀性的提升程度。通过对比上述 2 种模拟与实验的结果,明确是否有必要对 SGII 第 7 路进行改造或者提升 OPCPA-I 的光束质量。利用示波器测量得到并经归一化处理的注入信号光与抽运光的波形数据分别如图 3(a)、(b)所示,结合图 2 可以获得注入信号光与抽运光完整的四维(时域和空域)强度分布,在不考虑相位的情况下,得到可以用于参量放大计算模型的振幅分布。

时域和空域内具有理想超高斯分布的方形光束啁啾脉冲的复振幅可以表示为^[21]

$$\tilde{A}_{(x,y,T)} = A \exp\left(-\frac{x^n}{2x_0^n}\right) \exp\left(-\frac{y^n}{2y_0^n}\right) \exp\left(-\frac{T^m}{2T_0^m}\right) \exp\left[-i\left(\frac{CT^2}{2T_0^2} + \omega_0 T\right)\right], \quad (3)$$

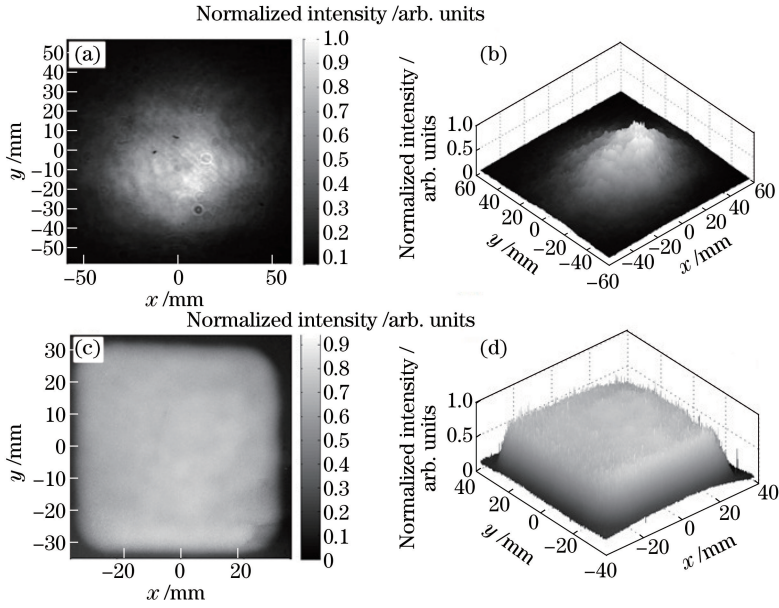


图 2 SGII-5 PW 前端 OPCPA 输出信号光的(a)近场光斑与(b)近场分布；
SGII 装置第 7 路输出倍频光的(c)近场光斑与(d)近场分布

Fig. 2 (a) Near-field light spot and (b) near-field profile of OPCPA output signal light from SGII-5 PW front end;
(c) near-field light spot and (d) near-field profile of the second harmonic generation
light from the 7th output beam of SGII system

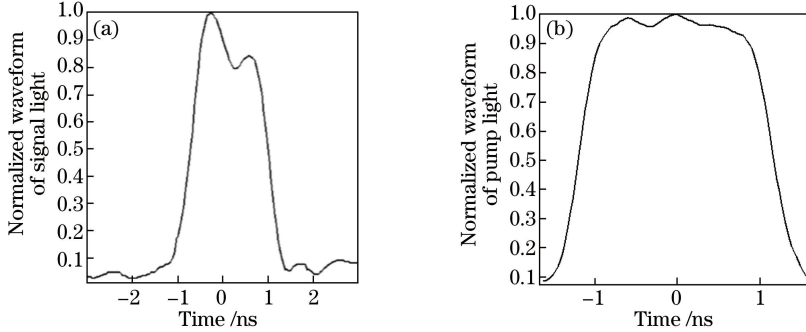


图 3 OPCPA-II 注入的归一化波形。(a)信号光；(b)抽运光

Fig. 3 Normalized waveforms of injection for OPCPA-II. (a) Signal light; (b) pump light

式中 ω_0 为脉冲中心圆频率, λ_0 为 ω_0 对应的中心波长, T_0 为脉冲在时域光强降为最大值的 $1/e$ 时对应的脉宽的一半, x_0 和 y_0 为方形光斑在空域光强降为最大值的 $1/e$ 时对应的空间宽度的一半, 计算时取 $x_0 = y_0 = r_0$ 。在应用中, 普遍采用以光强最大值的 $1/2$ 为边界的区域宽度 (R_0 与 τ_0) 作为光束口径与脉冲宽度, 且有转换关系 $R_0 = 2(\ln 2)^{1/m} r_0$ 与 $\tau_0 = 2(\ln 2)^{1/m} T_0$ 。采用 FWHM 标准, 理想超高斯抽运光与信号光脉冲参数如表 1 所示。

2.3 相位匹配与耦合波方程组模拟

在长度为 20 mm LBO 晶体的 XOY 主平面中, 对于波长为 808 nm 的宽带啁啾信号光与波长为 526.5 nm 的抽运光, 第一类非共线相位匹配的参量带宽与匹配角随非共线夹角的变化分别如图 4(a)、(b) 所示。可以看出, 当非共线夹角取值为 1.25° 时, 参量带宽达到最大值 73 nm, 此时匹配角为 (波矢与主轴 z 的夹角 $\theta = 90^\circ$, 方位角 $\varphi = 13.85^\circ$)^[22-23]。

在确定的非共线匹配结构下, 考虑衍射效应、空间走离效应与非线性放大过程。由于晶体表面镀有高透射膜, 因此晶体的反射损耗极小。高质量 LBO 晶体对参与混频的 3 种光波的损耗极小, 因此体损耗可以忽略。参量放大中高阶非线性效应包括双光子吸收与非线性折射率效应, 二者都远低于参量放大的二阶非线性效应, 可以忽略。耦合波方程组可表示为^[16, 21]

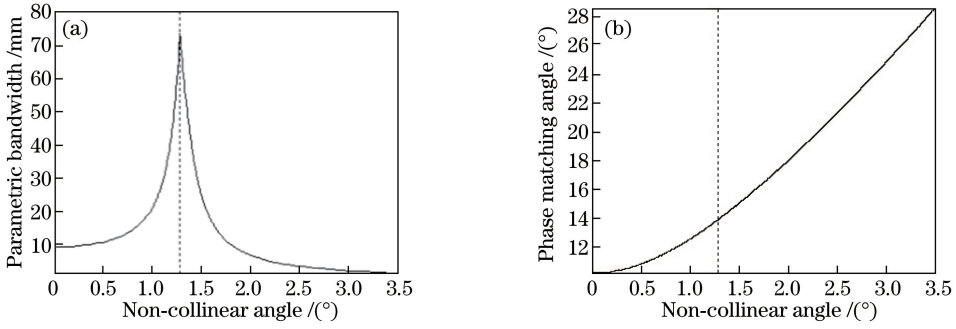


图 4 长度为 20 mm 的 LBO 晶体在 XOY 主平面内的(a)参量带宽和(b)相位匹配角随非共线夹角的变化
Fig. 4 Variations in (a) parametric bandwidth and (b) phase matching angle with non-collinear angle of 20 mm LBO crystal in XOY principal plane

$$\begin{cases} \frac{\partial A_s}{\partial z} = \frac{i\omega_s d_{\text{eff}}}{cn_s \cos^2 \rho_s} A_p A_i^* \exp(i\Delta k z) + \tan \rho_s \frac{\partial A_s}{\partial y} - \frac{1}{i2k_s \cos^2 \rho_s} \nabla_{\perp}^2 A_s \\ \frac{\partial A_i}{\partial z} = \frac{i\omega_i d_{\text{eff}}}{cn_i} A_p A_s^* \exp(i\Delta k z) + \tan \rho_i \frac{\partial A_i}{\partial y} - \frac{1}{i2k_i} \nabla_{\perp}^2 A_i \\ \frac{\partial A_p}{\partial z} = \frac{i\omega_p d_{\text{eff}}}{2cn_p \cos^2 \rho_p} A_s A_i \exp(-i\Delta k z) + \tan \rho_p \frac{\partial A_p}{\partial y} - \frac{1}{i2k_p \cos^2 \rho_p} \nabla_{\perp}^2 A_p \end{cases}, \quad (4)$$

式中下标 s、i、p 分别代表信号光、闲频光与抽运光； k_s 、 k_i 、 k_p 分别为 3 种光波在晶体内的波数； $\Delta k = k_p - k_s - k_i$ 为相位失配因子； A_s 、 A_i 、 A_p 分别为晶体内 3 种光波的复振幅； ω_s 、 ω_i 、 ω_p 为对应的时间角频率； n_s 、 n_i 、 n_p 分别为晶体对 3 种光波的折射率； ρ_s 、 ρ_i 、 ρ_p 分别为信号光非共线夹角、闲频光非共线夹角以及抽运光的走离角； c 为真空中光速； d_{eff} 为晶体有效非线性系数，该匹配方向取值为 0.9513 pm/V； z 为 LBO 晶体长度； ∇_{\perp}^2 为横向拉普拉斯算符。(4)式方程组中等号左侧表示晶体内耦合与传输的 3 种光波振幅的变化；(4)式中 3 个方程右侧第 1 项表示非线性增益，由于(3)式中采用 $\exp(-i\omega_0 T)$ 作为单色波相位的定义，因此(4)式中非线性增益项与文献[16]的有正负符号的差别；(4)式方程组中等号右侧第 2 项表示走离效应；(4)式方程组中等号右侧第 3 项表示激光在晶体内传输时的衍射效应。

对于光参量放大器而言，重要的指标包括转换效率、增益带宽、输出稳定性、信噪比、光束质量以及光束均匀性，这些指标分别关系到系统输出能量、可压缩的脉冲宽度极限、输出能力可控性、主激光与靶相互作用准确性、聚焦能力与系统运行安全性。转换效率、增益带宽与输出稳定性是全系统设计的先决条件，取决于非线性晶体的选择与放大器的结构参数；信噪比、光束质量以及光束均匀性都可以通过系统主动控制手段实现优化。为了更加全面地讨论问题，在全系统空间特征优化的角度下考虑光束均匀性优化的问题。

大能量 OPCPA 抽运光的不稳定性源于高能钕玻璃放大器以及倍频过程。结合表 1 给出的参数以及图 2、3 所确定的实际信号光与抽运光，通过数值模拟得到抽运光能量 $E_p = 110$ J 的信号光能量随 LBO 晶体长度的变化，如图 5(a)实线所示。图 5(b)为放大信号光能量的稳定性[即均方根(RMS)]随晶体长度的变化。由图 5(a)、(b)可以看出，当抽运光能量上下波动 5%(RMS 为 3.71%)、晶体长度为 17.75 mm 时，输出能量为 48.4 J，可得到高达 44% 的转换效率，相应的信号光能量稳定性(RMS)为 3.65%；当晶体长度为 18.75 mm 时，可实现最优 RMS 为 0.4% 的能量稳定性。由图 5 还可以看出，总是存在一个非线性晶体长度范围使放大信号的稳定性优于抽运光的稳定性，并且在此范围中的某一晶体长度范围内可同时获得高能量转换效率与高能量稳定性，该晶体长度范围是优化光束均匀性的可选择长度范围。

图 6(a)所示为 OPCPA-II 信号光的 F_F 与 F_{BC} 随晶体长度的变化，相应的能量转换效率如图 6(b)所示。根据图 6(a)可将晶体长度分为 4 个范围。

1) 晶体长度小于 12.5 mm。该范围为功率快速增益区，信号光的 F_F 在该范围内快速降低，而 F_{BC} 快速升高，说明信号光的近场光束均匀性变差。出现该现象的原因是在快速增益区内，抽运光的较强区域使信号光的增益速度更快，抽运光强度相对弱的区域内增益速度较慢，因此信号光局部区域内的强弱差距迅速变大，从而使 F_F 降低、 F_{BC} 升高。

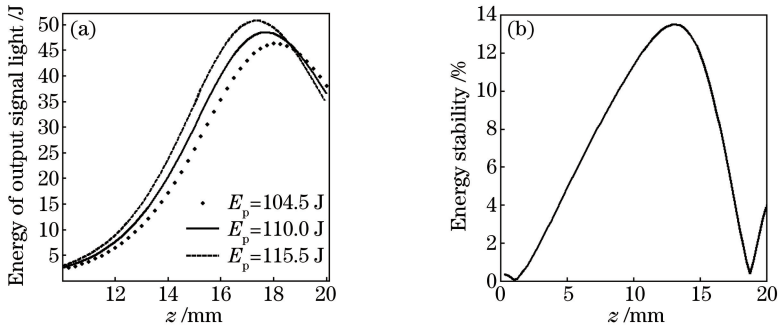


图 5 (a)不同抽运光能量下 OPCPA 输出信号光能量随晶体长度的变化;(b)放大信号光能量稳定性随晶体长度的变化

Fig. 5 (a) Variation in energy of output signal light with length of crystal under different energy of pump light; (b) variation in energy stability of amplification signal light with length of crystal

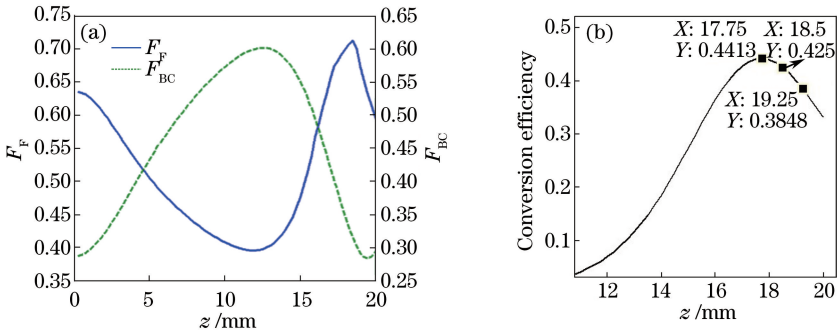


图 6 OPCPA-II 信号光的(a) F_F 与 F_{BC} 和(b)转换效率随晶体长度的变化

Fig. 6 Variations in (a) F_F and F_{BC} and (b) conversion efficiency with length of crystal

2) 晶体长度在 12.5~18.5 mm 范围内。在该范围内, F_F 变大, 而 F_{BC} 变小, 晶体长度为 18.5 mm 时可以获得的最大 $F_F = 0.7123$, 此时 $F_{BC} = 0.3145$, 出现该现象的原因在于能量增益饱和效应, 当局域信号光强度达到一定程度时, 由于抽运光能量被迅速转化, 之前增益强区放大速度降低, 增益弱区将拥有相对较大的放大速度, 从而缩小了强弱差距, 使光束均匀性变好。

3) 晶体长度在 18.5~19.25 mm 范围内。在该范围内, F_F 与 F_{BC} 同时变小, 当晶体长度为 19.25 mm 时, F_{BC} 有最小值 0.2854, 对应的 $F_F = 0.6504$, 该值与初始注入信号光的 F_F 相近。

4) 晶体长度大于 19.25 mm。该范围为深度饱和区, F_F 快速降低, 因此近场光束均匀性要求 OPCPA 不宜工作在此区域。

综上, 在最高转换效率与最小 F_{BC} 对应的长度范围内, 即晶体长度在 18.5~19.25 mm 的范围, 参量放大过程可以获得相对最优的近场光束均匀性, 同时保持较高的转换效率。相对于最优稳定区的晶体长度 18.75 mm, 该范围内可以得到较高的输出稳定性, 具体长度的选择可以根据系统实际情况进行优化设计。此外, 比较注入抽运光的 $F_F = 0.7546$ 与 $F_{BC} = 0.2600$, 由注入信号光的 $F_F = 0.6348$ 与 $F_{BC} = 0.2873$ 可以看出, 高转换效率的 OPCPA 系统存在特定的晶体长度范围, 使放大信号光的光束均匀性优于注入信号光, 但不能优于抽运光, 因此, OPCPA 系统对抽运光的近场光束均匀性要求极高。

模拟计算时采用的晶体长度与 OPCPA-II 实际晶体长度均为 19 mm, 模拟得到信号光的近场分布如图 7(a)、(b)所示, 其中模拟时 $F_F = 0.6732$, $F_{BC} = 0.2918$; 实验测量的信号光近场分布如图 7(c)、(d)所示, 经过数据分析得到 $F_F = 0.7284$, $F_{BC} = 0.3100$ 。对比两组数据可以看出, 尽管信号光的近场分布在细节上存在差异, 但 F_F 与 F_{BC} 接近。出现该现象的原因可能是理论模拟得到的是晶体输出端面位置的近场分布, 而实验测量得到的场强分布是由信号光经过空间滤波器 SF4 并在主光路中被取样、再经过聚焦衰减后在前离焦面测量得到, 空间滤波器的滤波作用以及传输过程对强度分布产生了额外调制。此外, 图 7(c)中存在条纹状微结构, 这源于晶体加工过程中的表面刀纹, 通过改进晶体加工工艺可以避免该问题, 目前 LBO 晶体已完成加工, 利用翟柯干涉仪测量表面时已无明显条纹。

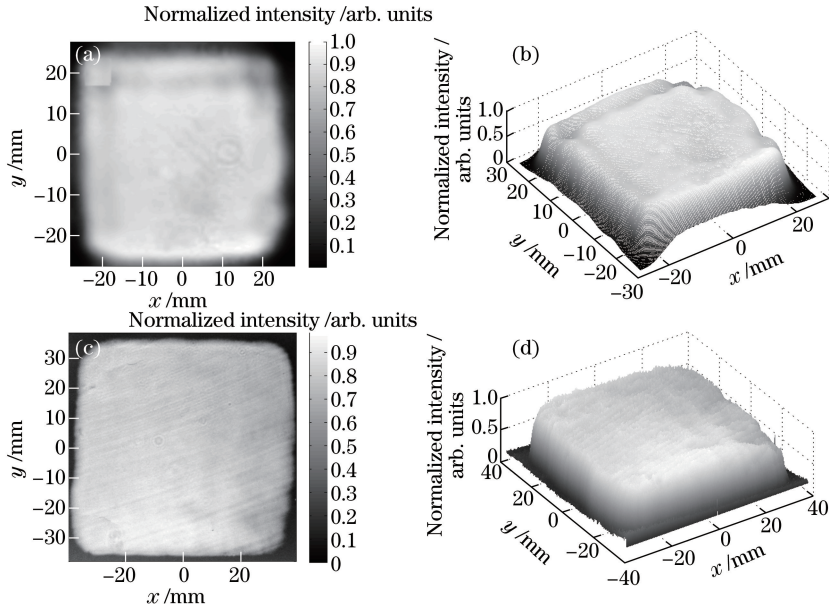


图 7 OPCPA-II 放大信号光的 (a)(b)模拟的近场分布与(c)(d)实验测量的近场分布

Fig. 7 (a)(b) Simulated near-field profiles and (c)(d) measured near-field profiles of OPCPA-II amplified signal light

为了明确进一步优化注入抽运光或信号光均匀性对 OPCPA-II 输出的提升潜力,进行以下两方面计算: 1)将理想时空超高斯抽运光与实际信号光相互作用;2)将理想时空超高斯信号光与实际抽运光相互作用。定量给出两种极限情况下放大光束均匀性的变化过程,从而了解 OPCPA-II 的优化方向与潜力。理想时空超高斯抽运光与信号光的参数如表 1 所示,模拟结果分别如图 8(a)、(b)所示。由图 8(a)可以看出,晶体长度为 19 mm 左右时,放大信号光的 $F_F > 0.85$,且 F_{BC} 降低至 0.06587,输出均匀性可实现较大幅度提升;由图 8(b)可以看出,晶体长度为 19 mm 左右时,放大信号光的最大 $F_F = 0.7700$,对应的 $F_{BC} = 0.2479$,相对于实验数据($F_F = 0.7284$, $F_{BC} = 0.3100$)略有提升。由上述讨论可知,抽运光对 SGII-5 PW 放大器 OPCPA-II 模块近场分布均匀性有着更大的影响,提升 SGII 第 7 路光束质量是更符合实际需求的选择。

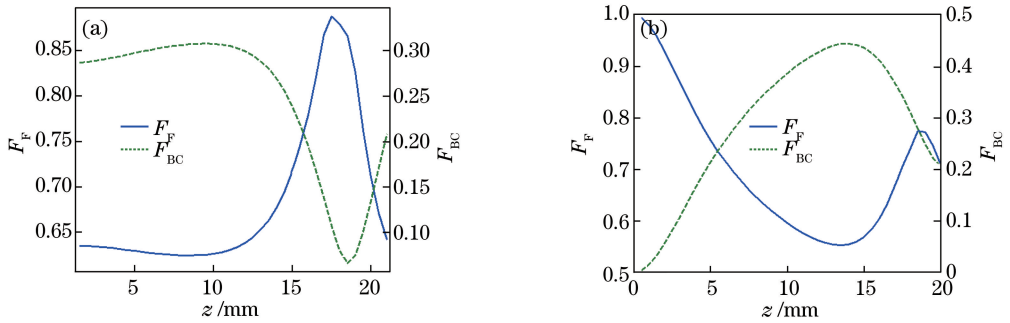


图 8 OPCPA-II 放大信号光的 F_F 与 F_{BC} 随晶体长度的变化。(a)理想时空超高斯抽运光与实际信号光作用;

(b)理想时空超高斯信号光与实际抽运光作用

Fig. 8 Variations in F_F and F_{BC} with length of crystal for OPCPA-II amplified signal light.

(a) Interaction of ideal spatial-temporal super-Gaussian pump light and actual signal light;

(b) interaction of ideal spatial-temporal super-Gaussian signal light and actual pump light

上述模拟与实验对比分析表明,相比于初始注入光,在特定的晶体长度范围内,极好的抽运光均匀性可以明显改善放大信号光的近场分布均匀性,提高系统运行安全性,同时可实现较高的转换效率与输出稳定性。文献[16]提出当非共线角使信号光波矢与抽运光能流方向分别在抽运光波矢两侧且非线性晶体的长度在最优稳定性长度范围内时,抽运光波前畸变对信号光波前的影响较小,从而可保证 OPCPA 过程不会对全系统聚焦能力产生太大的影响。因此在最高转换效率与最优稳定性对应的晶体长度范围内,可以同时获得较高的转换效率、较小的波前相位畸变、最优化的近场分布均匀性以及较高的输出稳定性。

3 结 论

为了提高 SGII-5 PW 系统运行安全性,以实验测量数据为基础,利用参量耦合波方程组数值计算方法,模拟了大能量 OPCPA 输出光近场分布均匀性的填充因子和光通量对比度参数演化及其近场分布,并与实验结果进行了对比分析。结合工程优化升级需求,数值模拟了进一步提升抽运光或者信号光近场特性对提高 OPCPA-II 输出均匀性的潜力。结果表明:1)当参量放大器结构确定时,长度为 19 mm 的非线性晶体可以同时保证较高的转换效率、较小的波前相位畸变、最优化的近场分布均匀性以及较高的输出稳定性;2)抽运光近场分布对参量放大输出有着更大影响,通过进一步提升 SGII 第 7 路光束质量可以大幅度提升 OPCPA-II 输出均匀性,这对 SGII-5 PW 系统运行安全性极为重要。

参 考 文 献

- [1] Dubietis A, Jonušauskas G, Piskarskas A. Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal[J]. *Optics Communications*, 1992, 88(4/5/6): 437-440.
- [2] Ross I N, Matousek P, New G H C, *et al.* Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(12): 2945-2956.
- [3] Danson C, Hillier D, Hopps N, *et al.* Petawatt class lasers worldwide[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2015, 3: e3.
- [4] Xie X L, Zhu J Q, Yang Q E, *et al.* Introduction to SG-II 5 PW laser facility[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2016: SM1M.7.
- [5] Exawatt center for extreme light studies (XCELS) [OL]. [2017-06-17]. <http://www.xcels.iapras.ru/img/XCELS-Project-english-version.pdf>.
- [6] The ELI-Nuclear Physics working groups. The white book of ELI Nuclear Physics Bucharest-Magurele, Romania[OL]. [2017-06-17]. <http://www.eli-np.ro/documents/ELI-NP-WhiteBook.pdf>.
- [7] Central Laser Facility. The vulcan 10 petawatt project[OL]. [2017-06-17]. <https://www.clf.stfc.ac.uk/Pages/The-Vulcan-10-Petawatt-Project.aspx>.
- [8] Chériaux G, Giambruno F, Fréneaux A, *et al.* Apollon-10P: Status and implementation[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2012: 78-83.
- [9] Zuegel J D. Status of high-energy OPCPA at LLE and future prospects[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2014: JTh4L.4.
- [10] Moses J, Manzoni C, Huang S W, *et al.* Temporal optimization of ultra-broadband high-energy OPCPA[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5540-5555.
- [11] 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]. *Optics Express*, 2003, 11(20): 2511-2524.
- [12] Kang J, Chen S H, Zhu J Q, *et al.* Design of a highly stable, high-conversion-efficiency pumping source for optical parametric amplifier by extending efficient crystal length[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(5): 1084-1088.
- [13] Wang Bopeng, Su Jingqin, Zeng Xiaoming, *et al.* Theoretical and experimental study on parametric fluorescence pulse width[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0519001.
王波鹏, 粟敬钦, 曾小明, 等. 参量荧光脉宽的理论及实验研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0519001.
- [14] Wang J, Ma J G, Wang Y Z, *et al.* Noise filtering in parametric amplification by dressing the seed beam with spatial chirp[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2439-2442.
- [15] Zhu Ping, Xie Xinglong, Jiao Zhaoyang, *et al.* Influence of wave-front error on temporal signal-to-noise ratio in large aperture ultrashort pulse focusing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1032001.
朱 坪, 谢兴龙, 焦兆阳, 等. 大口径超短脉冲聚焦系统波前误差对时间信噪比的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1032001.
- [16] Zhang F L, Wang Y H, Sun M Z, *et al.* Numerical simulations of the impact of wavefront phase distortions of pump on the beam quality of OPCPA[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(2): 217-220.
- [17] Wei X H, Qian L J, Yuan P, *et al.* Optical parametric amplification pumped by a phase-aberrated beam[J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 8904-8915.
- [18] You Kaiming, Hu Wei, Guo Hong, *et al.* Impact of the Fresnel number on the fill factor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(1): 120-124.

- 游开明, 胡 巍, 郭 弘, 等. Fresnel 数对光束填充因子的影响[J]. 光子学报, 2001, 30(1): 120-124.
- [19] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.* National ignition facility laser performance status[J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [20] Zhao Dongfeng, Wang Li, Lin Zunqi, *et al.* Experimental study of 351 nm propagation with high fluence on No. 9 system of SG-II laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0702001.
赵东峰, 王 利, 林尊琪, 等. 在神光 II 装置第九路系统开展 351 nm 波长激光高通量传输的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702001.
- [21] Sun Meizhi, Kang Jun, Zhang Yanli, *et al.* Analysis on phase matching and compression of amplified chirped pulse for various deuteration level DKDP crystals[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1219002.
孙美智, 康 俊, 张艳丽, 等. 不同含氘量 DKDP 晶体参量匹配与放大啁啾脉冲压缩特性分析[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1219002.
- [22] Xu L, Yu L H, Liang X Y, *et al.* High-energy noncollinear optical parametric-chirped pulse amplification in LBO at 800 nm[J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4837-4840.
- [23] Liang Xiao, Kang Jun, Sun Meizhi, *et al.* 808 nm optical parametric amplification based on DKDP crystals[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 081901.
梁 潇, 康 俊, 孙美智, 等. 基于 DKDP 晶体的 808 nm 波段光参量放大研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 081901.