

焦耳级光参量啁啾脉冲放大系统的优化设计

王翔峰 戴亚平 王 韬 季来林

(中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 使用 I 类非共线相位匹配结构, 建立三维空间和时间的数值计算模型, 优化设计了一个焦耳级光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)系统。该系统主要由两级三硼酸锂(LBO)预放大器和一级三硼酸钙氧钇(YCOB)功率放大器组成。通过将抽运光的时空波形整形形成超高斯形状、使用走离补偿结构、仔细分析及选取各级参量放大器的长度等措施, 保证了最后输出信号光的能量稳定性, 同时还获得了较高的能量转换效率和好的光束质量。理论设计结果表明, 该系统的各项参数均满足神光 II 九路前端的技术指标要求, 是一个具有可行性的设计方案。

关键词 非线性光学; 参量放大; 数值模拟; 稳定性

中图分类号 O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702009

Optimization Design of 1 J-Level Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification System

Wang Xiangfeng Dai Yaping Wang Tao Ji Lailin

(Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)

Abstract Using a three-dimensional spatial and temporal numerical model, optimization design of 1 J-level optical parametric chirped-pulse amplification system with type I noncollinear phase matching structure is discussed. With the two LiB_3O_5 (LBO) preamplifiers and one $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ (YCOB) power amplifier, highly stable, high-conversion-efficiency and good beam quality signal output is got by shaping the pump beam's spatiotemporal profiles to super-Gaussian shapes, using the walk-off compensation structure and choosing the crystal's length on each stage. This design can meet the requirement of SG-II upgrade project's front-end.

Key words nonlinear optics; parametric amplification; numerical simulation; stability

OCIS codes 190.4970; 190.4400; 320.7090

1 引 言

1986 年 A. Piskarskas 等首次提出了光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)的概念, 1992 年 A. Dubietis^[1] 在实验上验证了 OPCPA 技术的可行性并对其概念进行了完善。相比啁啾脉冲放大技术(CPA), OPCPA 技术具有更高的增益和信噪比、更宽的带宽以及热效应小等显著优点。因此美国罗切斯特大学的 OMEGA EP 装置、德克萨斯大学的拍瓦装置、英国卢瑟福实验室的 Vulcan 装置、中国的神光 II 第九路升级装置等主要的拍瓦级激光装置前端均利用 OPCPA

技术对种子光进行预放^[1~4]。近年来, 一些基于 OPCPA 技术的新技术也得到了不断的发展^[1]。例如 2005 年利弗莫尔实验室的科研人员成功地利用周期性极化磷酸钛氧镓(PPKTP)晶体实现了一个增益大于 10^6 、信噪比大于 3×10^7 、脉冲输出为 1.2 mJ 的 OPCPA 系统^[5], 该系统非常适合作为拍瓦前端的初级预放使用。而华东师范大学曾和平教授的团队则通过新颖的结构设计实现了 OPCPA 系统抽运光和信号光的全光学同步^[6,7]。

由于目前还无法获得大口径的偏硼酸钡(BBO)

收稿日期: 2011-01-19; **收到修改稿日期**: 2011-03-21

基金项目: 四川省学术和技术带头人培养资金资助课题。

作者简介: 王翔峰(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事大口径光参量啁啾脉冲放大技术方面的研究。

E-mail: wxiangf86@163.com

导师简介: 戴亚平(1973—), 男, 研究员, 主要从事高功率激光技术方面的研究。E-mail: ypdai@mail.shnc.ac.cn

和三硼酸锂 (LBO) 晶体, 采用这两种晶体的 OPCPA 系统获得的能量一般都不高, 输出能量最高在百毫焦量级, 这使得该技术还无法在拍瓦装置的主放大系统中得到应用^[2]。可以预见, 大口径高能量 OPCPA 技术的研究将成为高功率激光技术的重要课题。2006 年, 英国卢瑟福实验室用 LBO 和磷酸二氢钾 (KDP) 晶体设计完成了世界上输出能量最高的 OPCPA 系统, 达 35 J^[3]。同年, 利弗莫尔实验室报道了三硼酸钙氧钇 (YCOB) 晶体在 OPCPA 中的应用^[8]。YCOB 晶体具有有效非线性系数高 (与 LBO 相当)、尺寸大 (最大口径为 5.5 cm × 8.5 cm)、透光波段宽、相位匹配范围大、不潮解、损伤阈值高等优点, 因而是一类比较优良的频率变换晶体。它的出现为进一步提高 OPCPA 系统输出的能量和平均功率提供了可能。

本文根据神光 II 第九路升级装置前端的现有条件, 参考 OMEGA EP 装置前端和德克萨斯拍瓦装置前端的设计, 用 LBO 和 YCOB 晶体作为光参量放大器, 设计了一个能量输出大于 1 J 的 OPCPA 系统, 并对其主要性能进行了相关数值模拟分析^[2,9]。

2 数值计算模型

设计的三级光参量放大 (OPA) 系统全部采用 I 类相位匹配结构, 在抽运光和信号光脉宽均达到了纳秒级, 晶体的色散作用和吸收损耗都可以忽略的条件下, 由慢变振幅近似得到时空域内的三波耦合方程为^[10]

$$\frac{\partial E_s}{\partial z} + \rho_s \frac{\partial E_s}{\partial x} = -i \frac{\omega_s d_{\text{eff}}}{c n_s} E_i^* E_p \exp(-i\Delta k z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_i}{\partial z} + \rho_i \frac{\partial E_i}{\partial x} = -i \frac{\omega_i d_{\text{eff}}}{c n_i} E_s^* E_p \exp(-i\Delta k z), \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial z} + \rho_p \frac{\partial E_p}{\partial x} = -i \frac{\omega_p d_{\text{eff}}}{c n_p} E_s E_i \exp(i\Delta k z), \quad (3)$$

式中的下标 s, i, p 分别代表信号光, 闲频光和抽运光。坐标轴取为 xyz , 其中 z 轴的正方向取为抽运光波矢 k_p 的方向, x 轴位于抽运光走离角 ρ_p 与 k_p 组成的平面内。 ρ_s 和 ρ_i 分别代表信号光和闲频光与波矢 k_p 之间的非共线角。 $E_{s,i,p}$ 是光场在时域和空域的分布函数, Δk 是相位失配量。

利用离散傅里叶变换和四阶龙格-库塔算法相结合的方法, 编写了时空准四维数值计算程序, 利用该程序在空间频域中计算了走离角和非共线角的传播效应, 在时空域中对啁啾脉冲的时空特性进行了数值分析。

3 系统设计与分析

如图 1 所示, 系统由两级预放大和一级功率放大的三级光参量放大器组成。种子脉冲由 Nd:glass 锁模激光器提供, 中心波长 1053 nm, 通过展宽器后展宽成半峰全宽 (FWHM) 为 3.3 ns 的线性啁啾脉冲, 展宽量为 3.3 ns/6.5 nm, 能量 500 pJ, 时空波形均接近理想高斯分布^[11]。抽运源的振荡器为 Nd:YAG 单纵模激光器, 脉冲经过时空预整形后, 再通过 Nd:YAG 放大器、Nd:silicate 玻璃放大器和 DKDP 倍频器, 获得的脉冲中心波长为 532 nm, 脉宽 8 ns, 能量输出为 10 J 左右^[12,13]。抽运光源经过时间和空间整形后, 时空波形均接近超高斯分布。采用 6 阶和 10 阶超高斯分布分别模拟抽运光的时间和空间分布, 用理想高斯分布模拟种子信号光的时空分布。

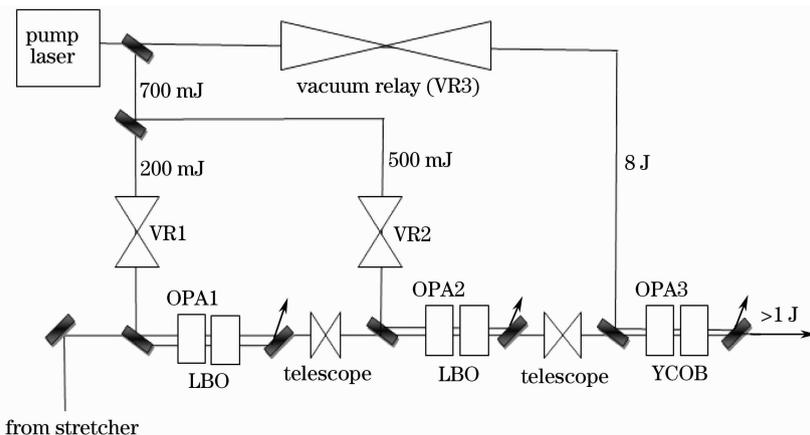


图 1 三级 OPCPA 系统结构示意图

Fig. 1 Diagram of three-stage OPCPA system

3.1 预放大系统

考虑到 LBO 小的走离角(约为 BBO 的 $1/8$)、高的损伤阈值以及宽的参量带宽等优点,预放的两级 OPA 均选用了 LBO 晶体^[14]。抽运光和信号光之间的走离会加剧放大后的信号光在走离方向上的空间增益窄化,降低信号光的转换效率,并导致光斑形状椭圆化^[2]。为进一步减小走离效应的影响,每级 OPA 均使用两块尺寸一样,反向平行放置(即第二块晶体绕抽运光波矢 k_p 的方向旋转 180°)的晶体进行走离角补偿^[15,16]。LBO 按 x - y 主平面的 I 类

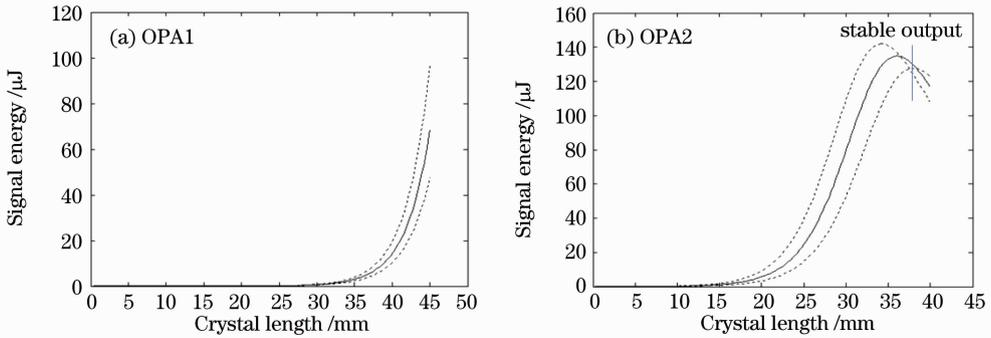


图2 OPA 信号光输出能量稳定性的数值模拟,实线表示抽运光功率密度为 360 MW/cm^2 , 虚线表示抽运光功率密度的起伏为 5%

Fig. 2 Signal output energy versus length of the crystal for LBO preamplifier design. The solid curve represents the pump input intensity of 360 MW/cm^2 , and the dashed curves represent 5% jitter about this intensity

OPA2 抽运光能量为 500 mJ , 光束口径为 4.8 mm , 输入信号光能量 $50 \mu\text{J}$, 信号光束口径稍小于抽运光, 为 4.2 mm , 抽运光与信号光光束尺寸的匹配有利于提高参量转换效率。图 2(b) 为同时考虑抽运光和 OPA1 输出信号光光强抖动的条件下, 信号光能量随晶体长度 L 的变化情况。OPA2 系统主要工作在饱和增益区, $L=36.15 \text{ mm}$ 时, 信号光理论上可获得峰值能量 134.7 mJ , 转换效率达 26.94% , 但信号光能量总体抖动性很大, 超过 10% 。随着 L 的进一步加大, OPA 工作在过饱和区, 信号光的能量稳定性迅速得到改善, $L=37.6 \text{ mm}$ 时, 信号光的能量稳定性最高, 能量总体抖动仅为 3.4% 。从图 3 可以看出, 由于入射信号光是线性啁啾脉冲且接近高斯分布, 越靠近脉冲中心 ($T=0$), 信号光光强越强, 相位失配量越少 ($T=0$ 时刻相位失配量为 0), 非线性相互作用也就越强, 导致脉冲中心部分的能量倒空比边缘快, 引起了不同时间位置的信号光增益不同。 $L=36.15 \text{ mm}$ 时, 信号光脉冲靠近中心的信号光能量已经开始向抽运光回流, 波形中心产生凹陷, 信号光边缘被整形为超高斯形状, FWHM 从种子脉冲的 3.3 ns 增宽到了

相位匹配角 ($90^\circ, 11.6^\circ$) 进行切割, 抽运光和信号光之间错开 0.42° , 以使 LBO 的参量带宽最宽^[14]。OPA1 的两块 LBO 尺寸为 $7.0 \text{ mm} \times 7.0 \text{ mm} \times 22.5 \text{ mm}$, 抽运光和信号光光束口径为 3.0 mm (FWHM), 抽运光功率密度为 360 MW/cm^2 。如图 2(a) 所示, 一级 OPA 工作在小信号增益区, 信号光获得的能量总增益约为 10^5 , 抽运光功率密度起伏 5% 时, 信号光的输出能量起伏很大, 理论计算获得信号光能量最大为 $68.5 \mu\text{J}$, 抖动范围为 $-30\% \sim 41\%$, 可见 OPA1 阶段系统信号光的能量稳定性很差。

5.4 ns 。随着晶体长度进一步加长, 系统开始工作在深度饱和区, 波形的中心凹陷程度加深, 脉宽进一步加宽, 但同时也导致参量转换效率降低和光束质量变差。图 4 中时间积分后的空间分布波形与时间脉冲波形情况类似, 光斑中心处的增益高于边缘并先进入过饱和状态造成中心凹陷。走离补偿结构的引入则使得 OPA 无论是工作在饱和区还是过饱和区, x 方向(平行于走离方向)和 y 方向(垂直于走离方向)的光强分布都基本保持对称。相比之下, x 方向上过饱和区较饱和区受走离效应影响更为严重, 光斑能量向走离方向集中的程度要更高一些, 而 y 方向则基本不受走离效应的影响, 光强分布始终保持对称。

由此可见, 两级 OPA 系统的能量稳定性、参量转换效率和光束质量三者之间存在着一个需要仔细权衡的关系。考虑到前端对能量稳定性要求很高(均方根值小于等于 3%), 两级 OPA 结构的前端装置 OPA2 应选用两块 LBO 尺寸为 $10.0 \text{ mm} \times 10.0 \text{ mm} \times 18.8 \text{ mm}$ 走离补偿结构的晶体, 适当地牺牲信号光的转换效率和光束质量以最大程度地保证能量稳定性。

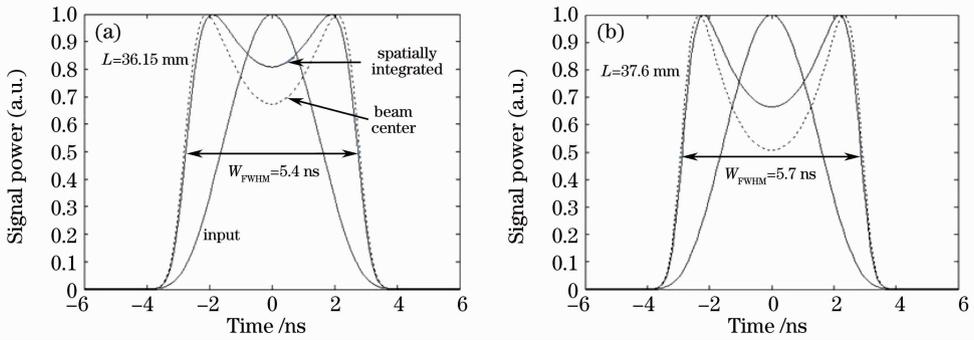


图 3 OPA2 工作在 $L=36.15\text{ mm}$ 和 $L=37.6\text{ mm}$ 时的信号光脉冲时间波形

Fig. 3 Normalized, temporal profiles for the OPA2 with $L=36.15\text{ mm}$ and $L=37.6\text{ mm}$

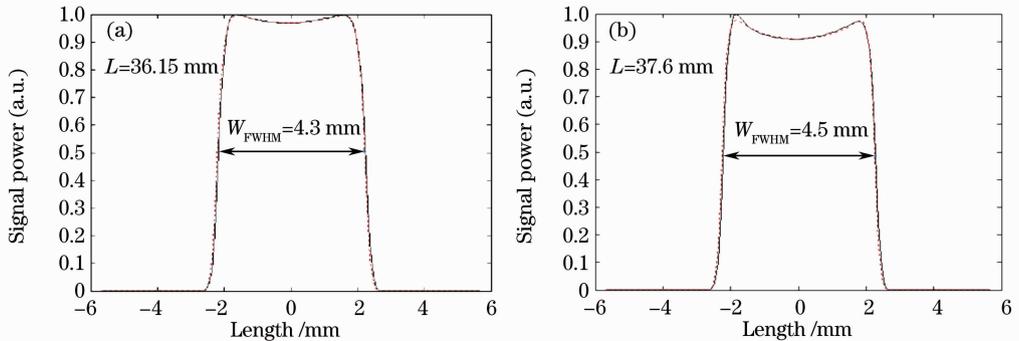


图 4 OPA2 在 $L=36.15\text{ mm}$ 和 $L=37.6\text{ mm}$ 时过信号光中心 x 方向(实线)和 y 方向(虚线)时间积分后的一维空间分布

Fig. 4 Temporally integrated one-dimension spatial intensity distribution of the x (solid line) and y (dashed line) directions through the beam center for the OPA2 with $L=36.15\text{ mm}$ and $L=37.6\text{ mm}$

3.2 OPA3 功率放大系统

在 OPA3 中将 8 J 的抽运光通过真空望远系统后口径放大至 20.0 mm (FWHM), 功率密度为 330 WM/cm^2 。信号光光束口径放大至 18.0 mm, 考虑到 OPA 过程中的各种损耗, 注入的信号光能量按前级 OPA 理论计算数值的 70% 进行计算。

YCOB 晶体按 $x-z$ 主平面的 I 类相位匹配角 ($30.5^\circ, 180^\circ$) 进行切割^[17]。图 5 给出了 YCOB 功率放大器 (OPA3) 的稳定性数值结果, 实线表示抽运光功率密度为 330 MW/cm^2 , 虚线表示抽运光功率密度的起伏为 5%。与文献[2] OMEGA EP 中所设计的 LBO 功率放大器结果相一致。

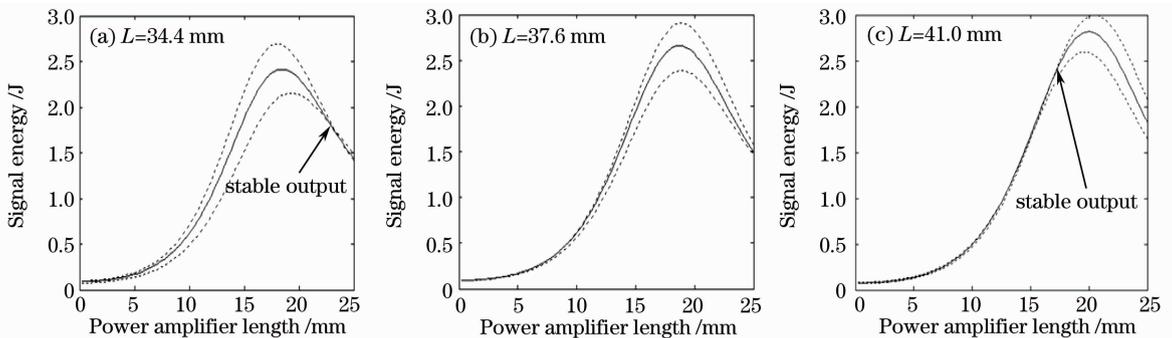


图 5 OPA2 预放大器晶体长度不同时功率放大器 (OPA3) 信号光输出能量稳定性的数值模拟

Fig. 5 Simulated plots of the signal output energy versus length of the power amplifier (OPA3) for three different preamplifiers

图 5(a) 中 OPA2 在 $L=34.4\text{ mm}$ 时, 预放大器工作在未饱和区, 与 3.1 中讨论的情况类似, 此时 OPA2 输出能量起伏很大, 而功率放大器 (OPA3) 则

在晶体长度为 23.0 mm 处有一个稳定输出, 但在此晶体长度下功率放大器工作在深度饱和区, 参量转换效率不高, 理论值仅为 21.7%。图 5(b) 对应

OPA2 晶体长度为 37.6 mm 的情况,OPA2 输出的信号光脉冲起伏很小,但在功率放大阶段却不存在输出稳定的工作区。继续增加 OPA2 的晶体长度,发现 OPA3 的稳定输出点从曲线的低转换效率区域向高转换效率区域移动。图 5(c)中 OPA2 的 $L=41.0$ mm 时,功率放大器在饱和区附近仍然存在着稳定输出点 ($L=17.0$ mm),此时获得信号光理论转换效率高 29.1%,能量稳定性好于 4.3%,这是一个非常理想的结果,因此 OPA3 应在图 5(c)所示的条件下进行工作,即取 OPA2 的长度为 41.0 mm。当图 5(c)中 OPA3 的长度增加到 20.0 mm 时,OPA3 的参量转换效率达到峰值为 34.8%,但同时能量总体抖动达 13.9%。图 6,7 分别给出了预放系统(OPA1 和 OPA2)优化后(见表 1)功率放大器取 $L=20.0$ mm 和 $L=17.0$ mm 时输出信号光的时间波形和时间积分后的空间波形,从图中明显可以看出信号光光束质量在 $L=20.0$ mm 时比 $L=17.0$ mm 时好, $L=20.0$ mm 时输入信号光光斑中

心调制得到完全补偿,空间波形接近 10 阶超高斯分布,时间波形也接近平顶分布,光束质量接近达到最好的情况;而 $L=17.0$ mm 时输出信号光的时空分布虽然存在着一定程度的调制,但光束质量仍保持在一个较高的水平,时间积分光斑中心调制度仅为 6%,满足前端系统对输出信号光光束质量的要求。考虑到拍瓦前端系统对输出信号光的能量稳定性要求很高,可适当牺牲信号光的参量转换效率和光束质量,OPA3 的长度最终取为 17.0 mm,系统优化的最终结果如表 1 所示。图 7 即为最终获得的输出信号光的时空分布。优化后的系统的各项性能都很优异,光谱 FWHM 达到 12.6 nm(对应脉宽 6.4 ns),完全满足神光 II 九路前端高稳定性高光束质量和宽光谱带宽(大于 6.5 nm)的要求。由于 OPA3 的晶体口径较大,受参量超荧光的影响系统很难获得高的参量转换效率,转换效率为 15%~20%,因此最终可获得能量大于 1 J 的脉冲输出^[3,8,9]。

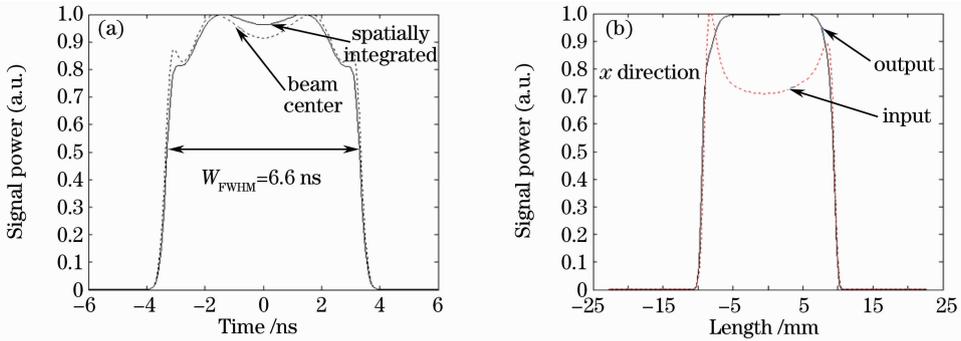


图 6 预放系统优化后 OPA3 长度为 20.0mm 时的信号光时间波形和时间积分后的空间波形

Fig. 6 Temporal and temporally integrated spatial profiles for OPA3 with $L=20.0$ mm after the preamplifier optimization

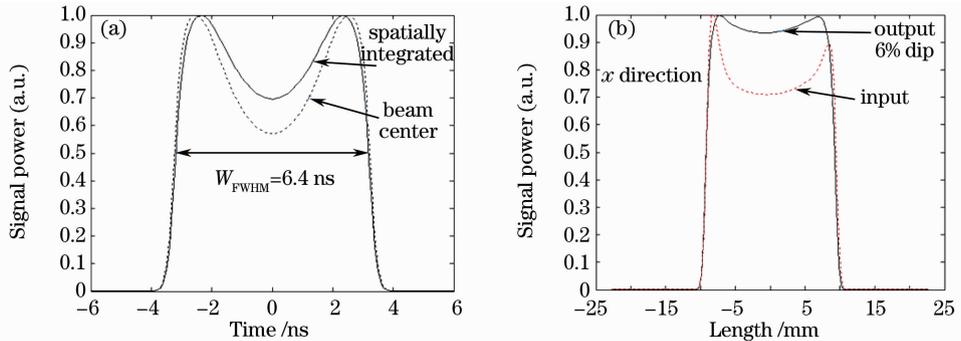


图 7 系统整体优化后 OPA3 长度为 17.0mm 时的信号光时间波形和时间积分后的空间波形

Fig. 7 Temporal and temporally integrated spatial profiles for OPA3 with $L=17.0$ mm after the overall system optimization

表 1 优化后的 OPCPA 系统参数

Table 1 Optimized OPCPA system parameters

| OPA stage | 1 | 2 | 3 |
|--|---------------------|--------------------------------------|---------------------|
| Crystal | LBO | LBO | YCOB |
| Crystal aperture /mm | 7.0×7.0 | 10.0×10.0 | 45.0×45.0 |
| Crystal length /mm | 22.5×2 | 20.5×2 | 8.5×2 |
| Pump pulse aperture /mm | 3.0 | 4.8 | 20.0 |
| Pump pulse duration /ns | 8 | 8 | 8 |
| Pump pulse energy /J | 0.2 | 0.5 | 8 |
| Pump pulse intensity / (MW/cm ²) | 360 | 360 | 330 |
| Input signal aperture /mm | 3.0 | 4.2 | 18.0 |
| Input signal duration /ns | 3.3 | 3.3 | 6.2 |
| Input signal energy /μJ | 5×10 ⁻⁴ | 50 | 7.6×10 ⁴ |
| Output signal energy /μJ | 68 (theoretical) | 1.1×10 ⁵ (theoretical) | >10 ⁶ |

4 结 论

参考美国德克萨斯大学的拍瓦前端设计,结合我国神光 II 九路的实际情况,给出一种焦耳级 OPCPA 系统的具体设计。数值模拟计算的结果表明,这种系统能较好地同时保证输出光束的能量稳定性、参量转换效率和光束质量,完全满足九路前端的技术指标要求,是一个具有可行性的理论设计。文中的研究工作对其他类型的 OPCPA 系统也有一定的参考作用,如使用的 YCOB 功率放大器还可用于提高基于 OPCPA 技术的超短脉冲系统的峰值功率;数值计算模型与分析方法则具有普遍的意义,这些方法进行适当修改后(考虑耦合波方程中时间导数项)即可用于飞秒级 OPCPA 系统的讨论和设计^[18]。

参 考 文 献

- 1 Audrius Dubietis, Rytis Butkus, Algis Petras Piskarskas. Trends in chirped pulse optical parametric amplification[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(2): 163~172
- 2 M. J. Guardalben, J. Keegan, L. J. Waxer *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
- 3 O. V. Chekhlov, J. L. Collier, I. N. Ross *et al.*. 35 J broadband femtosecond optical parametric chirped pulse amplification system[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(24): 3665~3667
- 4 Vincent Bagnoud, Ildar A. Begishev, Mark J. Guardalben *et*

- 5 *al.*. 5 Hz, >250 mJ optical parametric chirped-pulse amplifier at 1053 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14): 1843~1845
- 5 I. Jovanovic, C. G. Brown, C. A. Ebberts *et al.*. Generation of high-contrast millijoule pulses by optical parametric chirped-pulse amplification in periodically poled KTiOPO₄ [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(9): 1036~1038
- 6 Shixiang Xu, Hui Zhai, Kun Wu *et al.*. Accurate all-optical synchronization of 1064 nm pulses with 794 nm femtosecond pulses for optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(6): 2487~2496
- 7 H. Zeng, J. Wu, H. Xu *et al.*. Generation of accurately synchronized pump source for optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(7): 837~839
- 8 Zhi M. Liao, Igor Jovanovic, Chris A. Ebberts. Energy and average power scalable optical parametric chirped-pulse amplification in yttrium calcium oxyborate[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1277~1279
- 9 Erhard Gaul, Mikael Martinez, Todd Ditmire *et al.*. The Texas Petawatt Laser, OSA/ASSP, 2007
- 10 Peter W. Milonni, Jerome M. Auerbach, David Eimerl. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams[C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 230~241
- 11 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** (11): 3088~3093
- 12 Gao Yunkai, Jiang Yuntao, Li Xuechun. Laser pulse-shaping system based on aperture-coupled striplines [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1619~1622
- 高云凯, 蒋运涛, 李学春. 基于孔径耦合带状线的激光脉冲整形系统[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12): 1619~1622
- 13 Momoko Tanaka, Hiromitsu Kiriyama, Yoshihiro Ochi *et al.*. High-energy, spatially flat-top green pump laser by beam homogenization for petawatt scale Ti:sapphire laser systems[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(22): 4401~4403
- 14 Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Study on the bandwidth of three-wave mixing optical parametric amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 680~686
- 刘红军, 陈国夫, 赵卫等. 三波混频光参量放大器中带宽的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 680~686
- 15 A. V. Smith, D. J. Armstrong, W. J. Alford. Increased acceptance bandwidths in optical frequency conversion by use of multiple walk-off-compensating nonlinear crystals[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(1): 122~141
- 16 Peng Yuefeng, Wei Xingbin, Wang Weimin *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator 2.7 μm laser with near diffraction limit beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37** (9): 2376~2379
- 彭跃峰, 魏星斌, 王卫民等. 近衍射极限腔内光参量振荡 2.7 μm 激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2376~2379
- 17 Sun Meizhi, Bi Qunyu, Zhang Fuling *et al.*. Study on noncollinear phase matching in YCOB crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0119001
- 孙美智, 毕群玉, 张福领等. YCOB 晶体非共线相位匹配技术研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0119001
- 18 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