

# 用光学参量啁啾脉冲放大技术产生 TW 级 激光脉冲系统的最优化设计\*

刘红军 陈国夫 赵 卫 王屹山 赵尚弘

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室 西安 710068)

(2001 年 2 月 25 日收到, 2001 年 4 月 2 日收到修改稿)

用数值模拟的方法,给出了一种适合以纳秒级的高功率钕玻璃激光系统为抽运源的光学参量啁啾脉冲放大(OPCPA)系统的最优化设计.该系统主要由一级 LBO 预放大器和一级 LBO 主放大器组成.数值模拟结果表明该系统能够把纳焦级能量的飞秒脉冲放大到焦级,从而产生几十个太瓦( $10^{12}$  W)的脉冲输出.这一结果为进一步利用 OPCPA 技术放大飞秒脉冲产生拍瓦( $10^{15}$  W)的超短超强激光脉冲输出奠定了基础,从而为强场科学研究提供崭新的技术手段.

关键词:光学参量放大,非共线抽运,高超宽带增益,超短超强激光

PACC: 4265K, 4280W, 4255R, 4260B

## 1 引 言

近年来,随着强场激光科学及其应用研究的蓬勃发展,人们对超短脉冲高功率激光系统的研究与发展产生了极大的兴趣.在强场激光物理研究领域,如高次谐波的产生,强场原子,超快 X 射线辐射,超短波长 X 射线激光以及小型化高能粒子加速器等实验研究中,需要提供峰值功率高达 TW( $10^{12}$  W)甚至 PW( $10^{15}$  W)的超短超强激光脉冲,因此以啁啾脉冲放大(CPA)技术为核心的超短超强激光是近年来激光技术最热门的研究内容之一<sup>[1]</sup>.尽管目前利用 CPA 技术已经能够获得峰值功率大于 1PW( $10^{15}$  W)、聚焦强度大于  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> 的激光脉冲<sup>[2]</sup>,但由于传统的 CPA 技术存在着明显的缺点:首先是放大过程中的光谱窄化效应影响着再压缩后所能得到的最窄脉冲宽度,而且随着放大能量的提高,这种影响越严重,从而导致峰值功率增长缓慢,因此很难得到脉宽极短和能量极高的脉冲激光;其次是其放大过程中始终伴随着高的自发辐射放大,这种自发辐射放大降低放大后脉冲的信噪比;最后是其放大过程中单通增益低,必须进行多级多通放大,从而导致实验不但结构复杂,而且非常困难,系统成本很高,因此

目前利用 CPA 技术产生超短超强激光已经达到其应用的极限.为克服传统 CPA 技术的缺点,最近以光学参量放大(OPA)为基础的光学参量啁啾脉冲放大技术(OPCPA)成为产生超强超短激光的最新技术<sup>[3]</sup>,其实质就是通过一束高能量单色抽运光和一束低能量啁啾宽带种子光在一个非线性晶体中的参量耦合来获得高超宽带增益<sup>[4]</sup>.利用此技术不仅可以实现高超宽带单通增益,而且可以大大降低激光脉冲的预脉冲,使放大后的脉冲具有高的信噪比,并且结果简单,易于实现.最近利用 OPCPA 技术放大纳焦级飞秒脉冲产生太瓦级的脉冲输出已被 Ross 等人实现<sup>[5]</sup>,因此利用 OPCPA 技术完全可能产生峰值功率大于 10PW、聚焦强度大于  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup> 的激光脉冲.本文将结合采用自行研制的钛宝石飞秒激光器和脉宽可变的高能量钕玻璃激光系统的 OPCPA 技术研究<sup>[6,7]</sup>,用数值方法给出了一种可行的 OPCPA 系统的最优化设计,该系统能够将纳焦级能量的飞秒脉冲放大到焦级,从而产生几十个太瓦级的激光脉冲输出.数值模拟的结果表明,以高能量钕玻璃激光系统为抽运源的 OPCPA 技术是目前放大飞秒脉冲产生超强超短激光非常可行而且十分有效的途径,并且这一系统具有结构简单紧凑,易于运行的缺点,这对于进一步利用 OPCPA 技术产生拍瓦级的超

\* 国家高技术研究发展计划(批准号: 863-416-2-318)及中科院创新工程试点基金资助的课题.

短超强激光脉冲输出具有极其重要的意义.

## 2 最优化的 OPCPA 系统设计

### 2.1 光学参量啁啾脉冲放大技术

OPCPA 技术方案的基本思想是,将欲放大的一束低能量飞秒宽带种子信号光脉冲通过正啁啾色散的方法在时域上展宽(展宽后的脉冲在时域上表现为啁啾脉冲),然后使展宽后的啁啾种子光和一束高能窄带抽运光在非线性晶体中进行参量耦合,耦合过程中能量从抽运光脉冲转移到种子光脉冲,于是种子光脉冲被放大,同时产生第三束光即闲频光,放大后的种子光脉冲通过负啁啾色散的方法再被压缩成飞秒脉冲.三光波在参量过程中必须满足动量和能量守恒条件:

$$k_p = k_s + k_i, \quad (1)$$

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (2)$$

其中  $p, s, i$  分别代表抽运光、种子光和闲频光.为保证三光波之间能量有效的转移,三光波在晶体中必须以相等的速度传播,即必须满足相位匹配条件.通过选择合适的偏振方向并求解方程(1)(2),即可得到满足相位匹配条件的传播方向.当参量光非简并( $\omega_s > \omega_i$ )时,参量过程可以采用非共线抽运的方式来实现种子光和闲频光群速匹配,即实现闲频光群速在种子光传播方向上的投影值与种子光群速相等,这等价于

$$v_s = v_i \cos(\beta), \quad (3)$$

$v_s$  和  $v_i$  分别为种子光和闲频光的群速, $\beta$  为它们之间的夹角,从而可以获得极宽的参量带宽,于是可以实现超宽带增益<sup>[8,9]</sup>.

本文在忽略抽运光耗尽影响的条件下,首先建立非共线  $I$  类相位匹配抽运的参量过程的数值模拟方程,然后用数值计算辅助软件(MATLAB5.0)进行参量过程的各种数值计算.在本文的 OPCPA 系统设计中,选择双轴晶体 LBO 作为参量晶体,主要是考虑到 LBO 具有高破坏阈值、不易潮解、大的参量带宽、大的参量允许角、小的走离角、小的群速色散以及输出光束质量好等特点<sup>[10]</sup>,其相对于 BBO 晶体较小的非线性系数可以通过增加晶体的长度来补偿.由于 LBO 是双轴晶体,在本文中设定它的沿三个主轴方向  $X, Y, Z$  的主折射率  $n_z > n_y > n_x$ ,参量光均在晶体的  $XY$  主平面内传播,其中抽运光的偏振方

向垂直于主轴  $Z$ ,种子光和闲频光的偏振方向平行于主轴  $Z$ ,计算中采用的折射率色散方程来自于文献[11].根据(3)式,选择  $\lambda_p = 532\text{nm}$ ,  $\lambda_s = 800\text{nm}$ ,通过数值计算求得抽运光和种子光之间的最佳非共线角  $\alpha = 1.11^\circ$ .一般定义满足  $|\Delta k l_c / \pi| \leq 1$  的参量光波长范围为参量带宽,因此求得参量带宽的数值计算表达式如下:

$$\Delta\lambda(\text{nm}) = \frac{\lambda^2}{c} \cdot \frac{1}{l} \frac{|u_{si}|}{u_{si}} \neq 0, \quad (4)$$

$$\Delta\lambda(\text{nm}) = \frac{0.8 * \lambda^2}{c} \cdot \sqrt{\frac{1}{l \cdot |g_{si}|}} \frac{1}{u_{si}} = 0,$$

其中  $1/u_{si} = 1/v_s - 1(v_i \cos(\beta))$ ,  $v_s$  与  $v_i$  为群速度,  $g_{si} = g_s + g_i$ ,  $g_m = (\partial^2 k_m / \partial \omega_m^2)|_{\omega = \omega_m}$  ( $m = s, i$ ),  $g_m$  为群速度色散,  $l$  (单位:cm)为晶体的有效长度. LBO 晶体的长度取为 15mm,此时参量带宽由(4)式计算可达到最大值 170nm,由于参量带宽是由参量过程允许的相位失配决定的,而增益带宽是由参量过程中抽运光强和参量晶体长度共同决定的<sup>[12]</sup>,因此参量带宽给出了增益带宽的最大可能值<sup>[9]</sup>.

参量放大过程是典型的三波非线性耦合过程,可以用三波非共线相互作用耦合方程来描述<sup>[13]</sup>.由于在本文中参量光脉宽均大于 100ps,因此群速失配问题忽略不计.在相位匹配和群速匹配条件满足下,选取  $\lambda_p = 532\text{nm}$ ,  $\lambda_s = 800\text{nm}$ ,非共线抽运下计算得  $d_{\text{eff}} \approx 0.8 \text{ pm/v}$ ,因此求得参量放大过程的增益系数为

$$G_{\text{LBO}} = 0.25 \exp(4.1L(I_p)^2), \quad (5)$$

其中  $L$  为晶体的长度(单位:cm),  $I_p$  为抽运光的强度(单位:GW/cm<sup>2</sup>).因此通过优化选择合适的 LBO 晶体长度及抽运光强度,可以实现高超宽带增益.其中非共线角与相位匹配角的关系如图 1 所示.

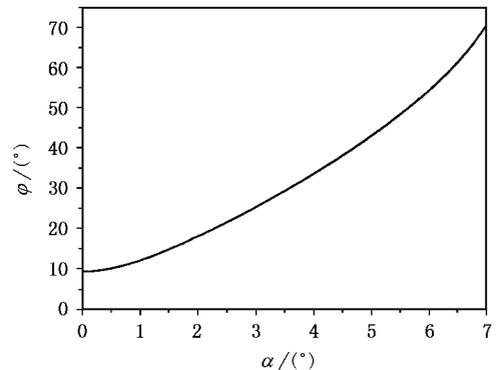


图 1 相位匹配角  $\varphi$  与非共线角  $\alpha$  之间的关系

## 2.2 基本的系统设计

本文研究的 OPCPA 系统是用来将脉宽为 12fs (对应光谱半高宽度约 87nm) 中心波长 800nm、能量 ~ 5nJ 的钛宝石输出激光脉冲放大到焦级后输出,系统的抽运光源为输出脉冲能量 ~ 6.7J、单一纵模、脉宽 580ps、中心波长 532nm 的钕玻璃激光系统.系统的基本方案如图 2 所示,系统主要由抽运源、种子源、展宽器、两级 LBO 放大器和压缩器等六部分组成.脉宽 12fs 的种子光脉冲首先经光栅展宽器展宽成 350ps 的啁啾脉冲,然后经两级放大器放大,最后经光栅压缩器压缩成近种子脉宽的脉冲输出.假设输入到放大器 I 中的种子光脉冲能量为 2.5nJ (展宽器的能量传递率 50%),若要求系统最终的输出脉冲能量大于 1J,考虑到系统的各种损耗,则种子

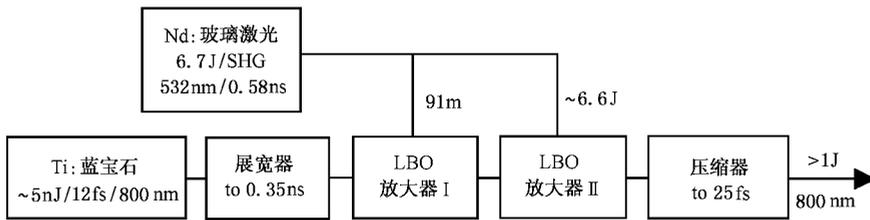


图 2 OPCPA 实验系统的基本设计方案示意图

$$\Delta\lambda(\text{nm}) = \frac{0.53\lambda^2}{c} \sqrt{\frac{\Gamma_0}{l}} |u_{si}| \quad 1/u_{si} \neq 0, \quad (6)$$

$$\Delta\lambda(\text{nm}) = \frac{0.58\lambda^2}{c} \left(\frac{\Gamma_0}{l}\right)^{1/4} \sqrt{\frac{1}{|g_{si}|}} \quad 1/u_{si} = 0,$$

其中  $\Gamma_0$  为小信号增益系数,其余的符号意义与(4)式相同.根据(6)式,在上述条件下,通过数值计算得到系统的增益带宽为 ~ 107nm,因此系统的增益带宽已完全满足放大脉宽 12fs 的脉冲所需的 87nm 增益光谱带宽.

## 2.3 最优化设计的 OPCPA 系统描述

用数值模拟计算得出 OPCPA 系统的各种最优化参数,结果如表 1 所示.其中抽运光束和种子光束之间非共线角  $\alpha$  的引入不仅增大了 OPCPA 系统的增益带宽,而且有助于输出参量光束的分离,使系统易于调谐.为了确保系统具有高的参量转换效率,并减小由于抽运光强随时间的变化而引起的光谱窄化效应,同时考虑到脉冲展宽器中光栅尺寸的限制,将种子光脉冲展宽到 350ps 的最优化值.在两级放大中选择抽运光束直径大于种子光束直径主要是为减

小系统调整和准直的难度,其中第一级输入的种子光束直径是最佳值,如果进一步减小将会增大系统的  $B$  积分,从而影响系统的输出光束质量.表中的净增益是指考虑系统损耗后的增益.设定双轴晶体 LBO 的主折射率  $n_z > n_y > n_x$ ,相位匹配角  $\theta$  是指抽运光传播方向与  $Z$  轴之间的夹角, $\varphi$  是指抽运光的传播方向与  $X$  轴之间的夹角,参量光在晶体的  $XY$  面内传播.

光经 OPCPA 系统后的能量净增益应大于  $10^9$ .由于参量放大过程中的增益带宽与抽运光强成正比而非线性晶体长度成反比,抽运光强越强,增益越大,增益带宽也越宽<sup>[12]</sup>,因此考虑到要同时保证系统具有足够的增益(净增益大于  $10^9$ )和足够的增益带宽(增益带宽须大于 87nm),优化选择晶体长度分别为第一级 15mm、第二级 12mm.为获得大于  $10^9$  倍的净增益,根据(5)式,并考虑到由于使 LBO 放大器运行在高度饱和状态可以有效地减小由于抽运光强度随时间变化的非均匀性而导致的带宽增益窄化效应,两级放大器的抽运光强度应选择为  $5\text{GW}/\text{cm}^2$ ,对应的能流密度为  $2.9\text{J}/\text{cm}^2$ ,此值远低于 LBO 晶体的破坏阈值.一般定义满足  $G = 1/2G(\Delta k = 0)$  条件的参量光波长范围为增益带宽,我们求得增益带宽表达式为

图 3 是依据表 1 设计的 OPCPA 系统的实验设置示意图.实验中一束中心波长为 532nm 的钕玻璃倍频激光首先经分束器后被分成两束,然后分别经可调光学延迟器、真空缩束望远镜、分色镜后并以合适的非共线角入射到放大器 I 和 II 中,其中延迟器是为保证抽运光脉冲和种子光脉冲在晶体中能很好地重叠(同步误差在  $\pm 50\text{ps}$  的范围内).作为种子源的自锁模钛宝石激光(800nm,脉宽 12fs,FWHM ~ 87nm),首先经过一个全反射式光栅展宽器(能量损耗 50%),将脉冲展宽到 350ps 的啁啾脉冲,然后经过一个缩束望远镜进行缩束后入射到放大器 I 上,经过放大器 I 预放大后输出的光束通过分色镜进行

小系统调整和准直的难度,其中第一级输入的种子光束直径是最佳值,如果进一步减小将会增大系统的  $B$  积分,从而影响系统的输出光束质量.表中的净增益是指考虑系统损耗后的增益.设定双轴晶体 LBO 的主折射率  $n_z > n_y > n_x$ ,相位匹配角  $\theta$  是指抽运光传播方向与  $Z$  轴之间的夹角, $\varphi$  是指抽运光的传播方向与  $X$  轴之间的夹角,参量光在晶体的  $XY$  面内传播.

图 3 是依据表 1 设计的 OPCPA 系统的实验设置示意图.实验中一束中心波长为 532nm 的钕玻璃倍频激光首先经分束器后被分成两束,然后分别经可调光学延迟器、真空缩束望远镜、分色镜后并以合适的非共线角入射到放大器 I 和 II 中,其中延迟器是为保证抽运光脉冲和种子光脉冲在晶体中能很好地重叠(同步误差在  $\pm 50\text{ps}$  的范围内).作为种子源的自锁模钛宝石激光(800nm,脉宽 12fs,FWHM ~ 87nm),首先经过一个全反射式光栅展宽器(能量损耗 50%),将脉冲展宽到 350ps 的啁啾脉冲,然后经过一个缩束望远镜进行缩束后入射到放大器 I 上,经过放大器 I 预放大后输出的光束通过分色镜进行

表 1 最优化 OPCPA 系统的参数

|  | 放大器 I<br>LBO 类型 I<br>(xy ooe) | 放大器 II<br>LBO 类型 I<br>(xy ooe) |
|--|-------------------------------|--------------------------------|
| 抽运脉宽/ps  | 580                           | 580                            |
| 种子源脉宽/ps   | 350                           | 350                            |
| 抽运脉冲能量/J   | $91 \times 10^{-3}$           | $\sim 6.6$                     |
| 抽运光斑直径/mm  | 2                             | 17                             |
| 抽运能流密度/ $J \cdot cm^{-2}$                        | 2.9                           | 2.9                            |
| 抽运功率密度/ $GW \cdot cm^{-2}$                       | 5                             | 5                              |
| 注入种子能量/J   | $2.5 \times 10^{-9}$          | $0.37 \times 10^{-3}$          |
| 种子光斑直径/ $\mu m$                                  | 0.63                          | 16.2                           |
| 净抽运能量/J  | $9 \times 10^{-3}$            | 6                              |
| 晶体长度/ $\mu m$                                    | 15                            | 12                             |
| 非共线角 $\alpha(^{\circ})$                          | 1.11                          | 1.11                           |
| 相位匹配角 ( $\theta = 90^{\circ}$ ) $\rho(^{\circ})$ | 12.57                         | 12.57                          |
| 净增益  | $\sim 1.5 \times 10^5$        | $\sim 1.1 \times 10^4$         |
| B 积分   | $< 0.3$                       | $< 0.5$                        |

分离,再将分离后剩余的 800nm 种子光通过一个真空扩束望远镜进行扩束后入射到放大器 II 上.由放大器 II 输出的放大光经分光镜把剩余的抽运光和闲频光分离掉,然后将已被放大的 800nm 光入射到一个双光栅压缩器进行压缩.实验过程中两级放大器均采用 I 类相位匹配方式,因此使种子光沿水平方向偏振,抽运光沿竖直方向偏振.系统中 LBO 晶体的两端面镀以减反射膜来减少种子光和闲置光在晶体内部的反射,从而防止晶体的输入和输出两端面之间产生寄生振荡.系统的总增益随抽运光强度变化的数值模拟结果如图 4 所示.

将参量光脉冲强度在时域上的分布近似为高斯型,通过数值模拟可以得到在放大器 I 和 II 中抽运光输入、输出和种子光输出的脉冲形式,结果分别如

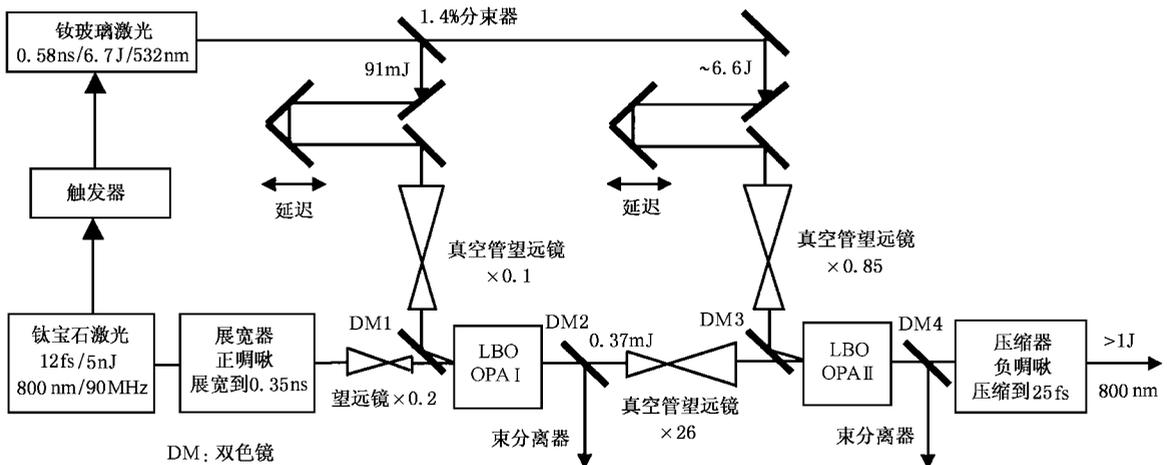


图 3 OPCPA 系统的实验装置示意图

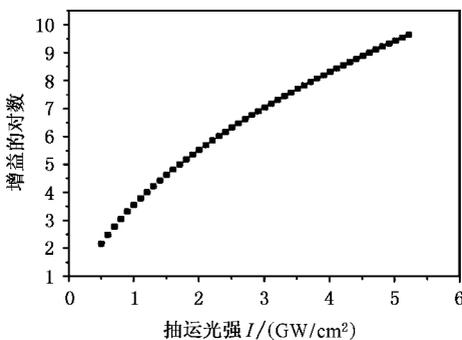


图 4 OPCPA 系统的总增益随抽运光强度变化的数值模拟结果

冲的中心部分光强强,能量倒空快,参量光强度也增长的快;光脉冲的边缘部分光强弱,能量倒空慢,参量光的成长速度也慢.即抽运光强度的非均匀分布,引起了不同时间位置处参量光的成长速度不同.又由于参量过程的逆过程——和频过程的存在,使得光脉冲在不同时间处的非线性过程不同(或者是参量过程,或者是和频过程),从而引起参量光在时域上的光强分布如图 5 所示的多峰结构<sup>[14]</sup>.这种结构会使参量转换效率降低和光束质量变坏.因此在实验中要获得高转换效率和高光束质量的输出光,理想的抽运光强在时域上的分布应尽量近似平顶脉冲.这样同时也可以减小因光强随时间的变化而引起的光谱窄化效应.

由于参量过程中会存在由以下原因引起的光谱窄化效应<sup>[5]</sup>:一是展宽和压缩过程中光栅导致的光

图 5 的 (a) (b) 所示.由于在非线性光学晶体中,光强越强,非线性相互作用也越强,能量转换过程就越快.呈高斯型分布的参量光入射参量放大器后,光脉

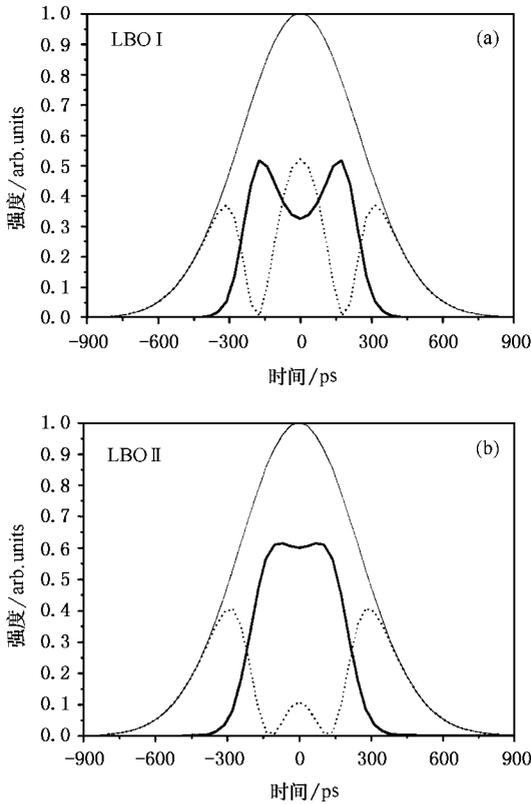


图5 两级放大器中输入抽运光(细实线)、输出抽运光(虚线)和输出种子光(粗线)强度的脉冲时间谱图 (a)在第一个 LBO 放大器中 (b)在第二个 LBO 放大器中

谱窄化;二是由于抽运光强度在时域上的非均匀性分布导致的增益随时间变化而引起的光谱窄化,光谱窄化效应会导致再压缩后的脉冲宽度变宽,但该过程中的光谱窄化效应与 CPA 过程中的光谱窄化效应两者的产生机制有着本质的区别,CPA 过程中的光谱窄化效应是由于增益引起的,其放大过程中的增益越大增益窄化效应越明显,因此它是不可避免的,而且对最后输出的脉宽影响较大;而 OPCPA 过程中的光谱窄化效应可以通过以下几种办法得以避免:一是通过对抽运光脉冲的整形使其近似平顶

脉冲;二是使抽运光脉宽大于种子光脉宽;三是使两级放大器均处于深度饱和状态,忽略相位对脉冲的影响,考虑到放大过程中存在小的光谱窄化效应,并通过合适的光栅设计将放大输出脉冲的色散补偿到三阶,经数值模拟计算表明系统最后可以得到 25fs 的压缩脉冲输出(图 6)。考虑到压缩光栅的损耗(50% 的能量传递率),系统最后输出的脉冲能量大于 1.5J,因此输出脉冲峰值功率可达到 60TW 以上。

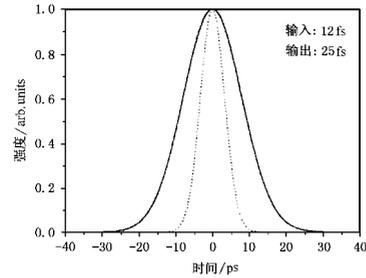


图6 数值计算得到的输入和输出种子光脉冲的时间谱图 (虚线:输入 12fs,实线:输出 25fs)

### 3 结 论

本文给出了一种适合于纳秒级的高功率钕玻璃激光系统的 OPCPA 系统的理论设计,数值模拟的结果表明,该系统可以将纳焦级能量的飞秒激光脉冲放大到焦级,从而产生脉宽 25fs、峰值功率大于 60TW 的激光脉冲输出。这一结果表明了 OPCPA 技术是目前能够替代传统的 CPA 技术而产生超短超强激光的一种十分有效而且可行的最新技术。利用此技术并选择合适的高功率抽运光系统和非线性参量晶体,可以进一步产生拍瓦级的超强超短脉冲输出,这将为强场科学研究创造极端超强超快光场条件和开辟新的研究领域。

有关本文的实验正在进行中。

- [1] I. N. Ross, M. Trentelman *et al.*, *Appl. Opt.*, **36**(1997), 9348.  
 [2] M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*, *Opt. Lett.*, **24**(1999), 160.  
 [3] I. N. Ross, P. Matousek, M. Towrie *et al.*, *Opt. Comm.*, **144**(1997), 125.  
 [4] R. Boyd, *Nonlinear Optics* (Academic, New York, 1992).  
 [5] I. N. Ross, John L. Collier, Pavel Matousek *et al.*, *Appl. Opt.*, **39**(2000), 2422.

- [6] Y. S. Wang, G. F. Chen, S. H. Zhao *et al.*, *Acta Photonica Sinica*, **29**(2000), 203 (in Chinese) [王屹山等, *光子学报*, **29**(2000), 203].  
 [7] W. Zhao, B. Z. Yang, X. Q. Zheng *et al.*, *Acta Photonica Sinica*, **26**(1997), 189 (in Chinese) [赵卫等, *光子学报*, **26**(1997), 189].  
 [8] T. Wilhelm, J. Piel, E. Riedle, *Opt. Lett.*, **22**(1997), 1494.

- [ 9 ] Jiang-fan Xia , Zhi-yi Wei , Jie Zhang , *Acta Physica Sinica* , **49** (2000) , 256( in Chinese [ 夏江帆等 , 物理学报 , **49**( 2000 ) , 256 ] .
- [ 10 ] J. Y. Zheng , J. Y. Huang , Y. R. Shen. *Appl. Phys. Lett.* , **58** ( 1991 ) , 213 .
- [ 11 ] CRYSTALS , Fujian Castech Crystals , Inc.
- [ 12 ] R. Danielius , A. Piskarskas , A. Stabinis *et al.* , *J. Opt. Soc. Am.* , **B10**( 1993 ) , 2222 .
- [ 13 ] Richard A. Baumgartner , Robert L. Byer , *IEEE J. Quantum Electron.* , **15**( 1979 ) , 432 .
- [ 14 ] M. F. Becker , Y. C. Kim , S. R. Gautam *et al.* , *IEEE J. Quant. Electron.* , **18**( 1982 ) , 113 .

## OPTIMIZED DESIGN OF A SYSTEM OF GENERATING TERAWATT LASER PULSES BY USE OF OPTICAL PARAMETRIC CHIRPED PULSE AMPLIFICATION\*

LIU HONG-JUN CHEN GUO-FU ZHAO WEI WANG YI-SHAN ZHAO SHANG-HONG

( *State key Laboratory of Transient Optics and Technology* ,

*Xi 'an Institute of Optics and Precision Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Xi 'an 710068 , China* )

( Received 25 February 2001 ; revised manuscript received 2 April 2001 )

### ABSTRACT

Using the numerical method , an optimized design is presented for the generation of peak powers up to  $\sim 60$  TW with pulse duration  $\sim 25$  fs using an optical parametric chirped pulse amplifier( OPCPA ) pumped by the high-power Nd :glass laser. The OPCPA system consists of an LBO preamplifier and an LBO power amplifier. The numerical simulation results demonstrate that this system can scale the pulse energy at nanojoule level to the joule level and generate terawatt pulses. So it provides great potential to efficiently produce and amplify very short femtosecond laser pulses , and can be regarded as a step toward generating petawatt laser pulses using optical parametric chirped pulse amplifiers pumped by powerful nanosecond systems.

**Keywords** : optical parametric amplification , noncollinearly pump , high ultrabroadband gain , ultrashort and ultrahigh laser

**PACC** : 4265K , 4280W , 4255R , 4260B

\* Project supported by the National High Technology Development Program of China( Grant No. 863-416-2-318 ).