

光参量啁啾脉冲放大的逆问题*

曾曙光 张 彬†

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

(2007 年 12 月 17 日收到, 2008 年 9 月 7 日收到修改稿)

针对光参量啁啾脉冲放大的逆问题, 即如何在给定输出信号光脉冲波形的前提下, 通过计算得到输入信号光脉冲波形, 提出了相应的计算模型和方法. 以分步傅里叶变换和四阶龙格-库塔法为基础, 通过数值拟合等方法, 建立了输入-输出信号光强之间的定量关系. 分别以预期输出信号光脉冲为啁啾高斯脉冲以及具有特定形状的整形脉冲为例, 通过逆算得到了相应的输入信号光脉冲波形. 研究表明, 该逆算方法具有原理简单、计算快速准确等优点, 可为激光脉冲整形设计提供参考.

关键词: 光参量啁啾脉冲放大, 逆问题, 啁啾脉冲, 脉冲整形

PACC: 4265K, 4260F

1. 引 言

光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)是获得超高功率、超高脉冲对比度和高光束质量激光脉冲的有效途径. 大型激光装置中, 如大阪大学激光工程研究所的 GEKKO-XII、英国卢瑟福实验室的“火神”PW 装置、美国 Rochester 大学激光力能学实验室的 OMEGA 升级装置、德国的 PHELIX 计划和法国的 PHEBUS 激光装置均采用了 OPCPA 技术^[1-5], 我国正在研制的高能拍瓦激光系统也可能在前端放大采用 OPCPA 技术方案.

以光参量放大(OPA)为基础的 OPCPA 的概念早在 1986 年就由 Piskarskas 等^[6]提出. 迄今为止, 人们对 OPCPA 技术已开展了大量的理论和实验研究^[7]. 对于大型激光装置前端的 OPCPA, 往往要求其输出脉冲为具有特定形状的激光脉冲. 然而, 为了获得较高的提取效率, OPCPA 通常工作在饱和放大状态, 此时, 输出脉冲波形较输入脉冲波形将产生变化, 甚至出现明显的畸变^[8], 从而很难获得能满足要求的预期输出波形. 因此, 有必要对 OPCPA 的逆问题进行研究, 即如何在给定输出信号光脉冲波形的前提下, 通过逆算得到相应的输入信号光脉冲波形. 在实际工作中, 可根据逆算结果对输入信号光脉冲

波形进行整形或预补偿, 从而使输出信号光脉冲波形能满足应用要求.

本文通过数值求解光参量放大耦合波方程组, 分析了饱和度对输出脉冲波形的影响, 指出了研究 OPCPA 逆问题的必要性. 在此基础上, 提出了解决 OPCPA 逆问题的计算模型和方法, 以预期输出激光脉冲为啁啾高斯脉冲以及抛物线型的整形脉冲为例, 对光参量放大的逆问题进行了研究.

2. 光参量放大的计算与分析

2.1. 光参量放大理论模型

光参量放大一般以 Armstrong 等^[9]的理论为基础, 在平面波近似和慢变振幅近似下, 光参量放大过程可用如下三波耦合方程^[10]来描述:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_1}{\partial z} + \frac{n_1}{c} \frac{\partial E_1}{\partial t} + \alpha_1 E_1 \\ = i \frac{\omega_1 d_{\text{eff}}}{n_1 c \cos^2 \beta_1} E_2^* E_3 \exp(i \Delta k z), \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_2}{\partial z} + \frac{n_2}{c} \frac{\partial E_2}{\partial t} + \alpha_2 E_2 \\ = i \frac{\omega_2 d_{\text{eff}}}{n_2 c \cos^2 \beta_2} E_1^* E_3 \exp(i \Delta k z), \quad (2) \end{aligned}$$

* 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-05-0784)和四川省青年科技基金(批准号: 05ZQ026-013)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: zhangbinff@sohu.com

$$\begin{aligned} & \frac{\partial E_3}{\partial z} + \frac{n_3}{c} \frac{\partial E_3}{\partial t} + \alpha_3 E_3 \\ & = i \frac{\omega_3 d_{\text{eff}}}{n_3 c \cos^2 \beta_3} E_1 E_2 \exp(-i \Delta k z), \quad (3) \end{aligned}$$

式中 E_j , n_j , α_j 和 β_j ($j = 1, 2, 3$) 分别代表信号光、闲频光和抽运光的电场强度、折射率、损耗系数和光波在非线性介质中传播时的坡印廷(Poynting)矢量的走离角; c 为真空中光速; d_{eff} 为三波作用下晶体的有效非线性系数; Δk 为三波耦合的相位失配量, 对于宽带激光, 其相位失配量 Δk 为

$$\Delta k = \frac{n(3\omega)3\omega}{c} - \frac{n(2\omega)2\omega}{c} - \frac{n(\omega)\omega}{c}. \quad (4)$$

当参量光脉冲大于 100 ps 时, 可忽略群速度失配的影响^[11]. 本文采用分步傅里叶变换和四阶龙格-库塔方法数值求解上述三光波耦合波方程组, 并在计算中忽略了吸收损耗和群速度失配的影响. 计算中假设输入信号光中心波长为 800 nm, 抽运光中心波长为 532 nm, 光参量放大非线性晶体为 BBO 晶体, 并采用非共线参量放大的方式, 非共线角为 2.38° . 此时, 光参量放大的增益带宽可达 150 nm 左右^[12].

2.2. 饱和度和对输出脉冲波形的影响

假设输入信号光为啁啾高斯脉冲, 其场分布可表示为

$$E(t) = E_0 \exp\left\{-\frac{(1+iC)}{2}\left(\frac{t}{\tau}\right)^2 - i\omega_0 t\right\}, \quad (5)$$

式中 τ 为 $1/e$ 处的脉冲半宽; ω_0 为中心频率; C 为啁啾参数, 通过适当调整啁啾参数即可获得不同带宽的啁啾脉冲.

图 1 给出了输入信号光及在不同晶体长度时的输出信号光脉冲波形. 计算中假设输入信号光的带宽(FWHM)为 10 nm, $\tau = 100$ ps, $C = 1768$, 峰值强度为 0.7 MW/cm^2 ; 抽运光为 20 阶超高斯窄带脉冲, τ 为 200 ps, 峰值强度为 0.3 GW/cm^2 .

由图 1(b)可以看出, 对于不同 BBO 晶体长度, 输出信号光波形各不相同. 当 BBO 晶体长度 $d = 1.2$ cm 时, 对应于放大过程尚未饱和的情况, 输入、输出信号波形变化并不明显, 经计算得到的相应提取效率(光参量放大过程中信号光所增加的能量与初始抽运光能量之比)为 12.1%. 当 $d = 1.6$ cm 时, 此时已达到饱和, 相应的波形变化比较明显, 输出脉冲已变成近似平顶分布脉冲, 相应的提取效率为 44.3%. 当 $d = 2.0$ cm 时, 处于过度饱和状态, 输出脉冲波形发生明显畸变, 相应提取效率为 42.4%.

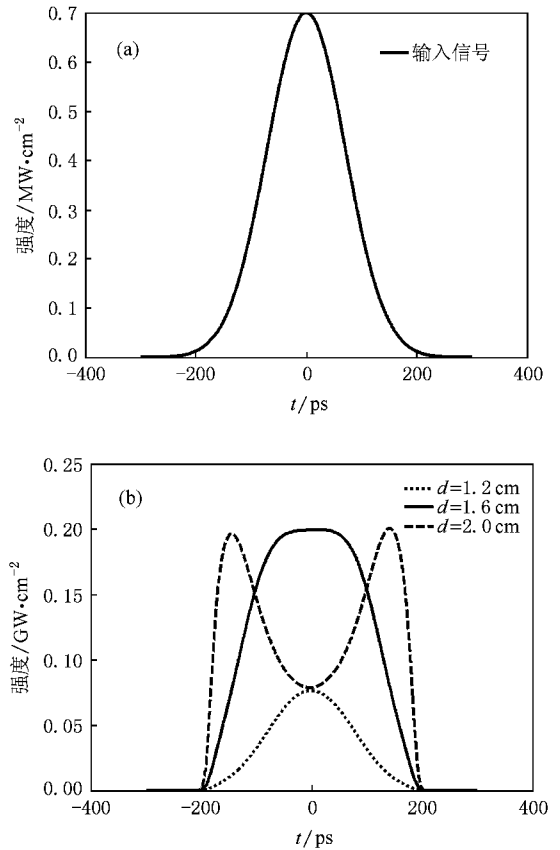


图 1 输入信号光及在不同晶体长度时的输出信号光脉冲波形 (a) 输入信号光 (b) 输出信号光

当出现过度饱和时, 脉冲波形中心呈现凹陷, 这是由于在光参量放大过程中, 对于一定强度的输入信号光存在一最佳晶体长度与之对应, 且输入信号光越强, 对应的最佳晶体长度就越短. 当晶体长度超过了最佳长度时, 脉冲中心部分由于强度较大, 信号光强在达到最大值后开始发生光参量放大的逆过程, 能量由信号光“回流”至抽运光^[13], 从而使得脉冲中心出现凹陷. 此外, 进一步计算表明, 对于相同的晶体长度、不同入射信号光强时的光参量放大饱和程度也不相同, 相应的输入、输出信号光波形变化情况与图 1 类似.

3. 光参量啁啾脉冲放大逆问题的计算方法及结果分析

3.1. 计算方法

根据上述对图 1 的分析可知, 在光参量放大过程中, 一方面, 为了增大提取效率, 需要进行饱和放大; 另一方面, 当饱和放大时, 由于信号光不同时刻

的增益不同,输出信号光波形将会发生畸变.因此,在实际应用中很难获得能满足应用要求的预期输出信号光波形.为了解决这一问题,则需要对输入信号光波形进行预补偿.

通过分析三光波耦合方程组(1)–(3)可以发现,在抽运光强度给定的情况下,对于某一输入信号光强度,存在唯一的输出信号光强度与之对应.由此可采用本文提出的方法解决光参量放大过程的逆问题,即由输出信号光光强分布数值计算出输入信号光光强分布.具体步骤如下:(1)在给定抽运光强度的情况下,通过数值求解方程组(1)–(3)即“正算”,可以得到不同输入信号光光强时相应的一组输入-输出信号光光强的计算数据.(2)采用五阶多项式拟合方法,对计算得到的输入-输出信号光光强度数据进行拟合,从而获得相应的输入-输出信号光强度之间的函数关系,即

$$I_{in}(t) = \sum_{n=0}^5 a_n [I_{out}(t)]^n, \quad (6)$$

式中, $I_{in}(t)$ 、 $I_{out}(t)$ 分别为输入、输出信号光强度分布, a_n 为多项式系数.值得指出的是,在对输入-输出信号光光强数据进行拟合时,为了提高拟合精度,可分别按输入信号光为小信号和大信号情况进行“分段拟合”.(3)根据拟合得到的输入-输出信号光强度之间的函数关系(6)式,由给定的输出信号光波形即可“逆算”出相应的输入信号光波形.

为了更清楚地说明上述“逆算方法”,图2给出了抽运光强度为 0.3 GW/cm^2 时,输入-输出信号光的计算数据及其多项式拟合曲线.计算中输入信号光为20阶超高斯窄带脉冲(啁啾参数为零),峰值光强从零依次增大,脉冲FWHM为100 ps,抽运光脉冲为20阶超高斯窄带脉冲,脉冲FWHM为200 ps,峰值强度为 0.3 GW/cm^2 ,BBO晶体长度为1.6 cm.

由图2可以看出:在小信号情况下,拟合曲线与计算数据符合很好.在大信号情况下,拟合曲线与计算数据符合得也较好.此时,可获得各拟合曲线的多项式系数,例如小信号时, $a_0 = -3.6293 \times 10^3$, $a_1 = 9.0194 \times 10^{-4}$, $a_2 = 2.2251 \times 10^{-16}$, $a_3 = 8.4684 \times 10^{-29}$, $a_4 = -2.7464 \times 10^{-42}$, $a_5 = 3.1666 \times 10^{-53}$;大信号时, $a_0 = -1.9632 \times 10^{11}$, $a_1 = 0.7756$, $a_2 = -1.1978 \times 10^{-12}$, $a_3 = 9.0850 \times 10^{-25}$, $a_4 = -3.3821 \times 10^{-37}$, $a_5 = 4.9574 \times 10^{-50}$.尽管此时的信号光是按窄带宽的情况计算的,但由于光参量放大的增益带宽很宽(可达150 nm左右),且增益谱很平

坦^[12],因此相应的(6)式将适用于同一晶体参数和抽运光条件下不同信号光形状和不同啁啾参数(不同带宽)的情况.

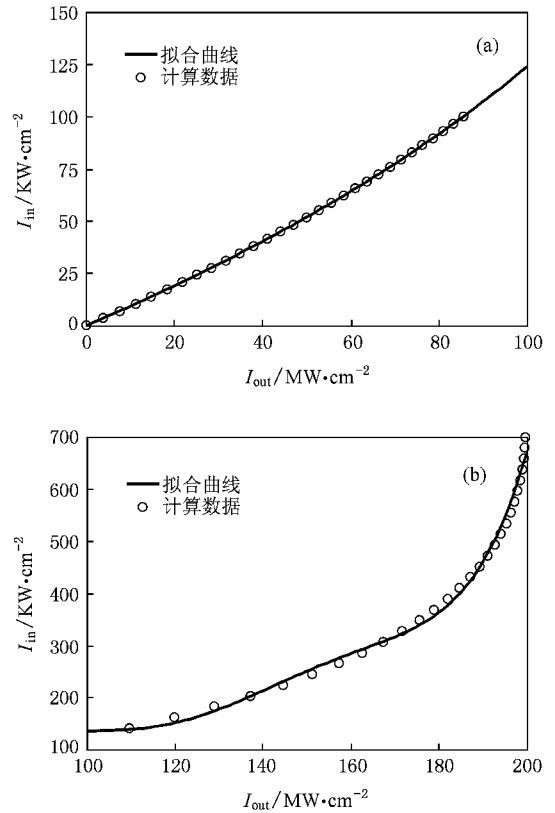


图2 输入-输出信号光计算数据及其拟合曲线 (a)小信号, (b)大信号

3.2. 计算结果及分析

3.2.1. 预期输出信号光为高斯脉冲的情形

以预期输出信号光为啁啾高斯脉冲为例来说明本文所提出的逆算方法的有效性.图3给出了输入信号光及在不同带宽下的输出信号光脉冲波形.计算中预期输出信号光为啁啾高斯脉冲, τ 为100 ps,峰值强度为 0.2 GW/cm^2 ,其他参数同图2.逆算时所用(6)式中多项式系数即为图2给出的多项式系数.图3(a)为输入信号光波形,实线为预补偿输入信号,虚线为无补偿输入信号.其中,预补偿输入信号是由预期输出信号光波形经逆算得到的输入信号;无补偿输入信号为不加以预补偿时的输入信号,其波形与预期输出脉冲的波形相同,峰值光强则等于预补偿输入信号的峰值光强.图3(b)和(c)分别为窄带信号光(带宽约为0 nm)和宽带信号光(带宽为28.3 nm)输入时的输出波形.其中,预补偿输出信号(实线所示)为预补偿信号输入时的输出信号,而无

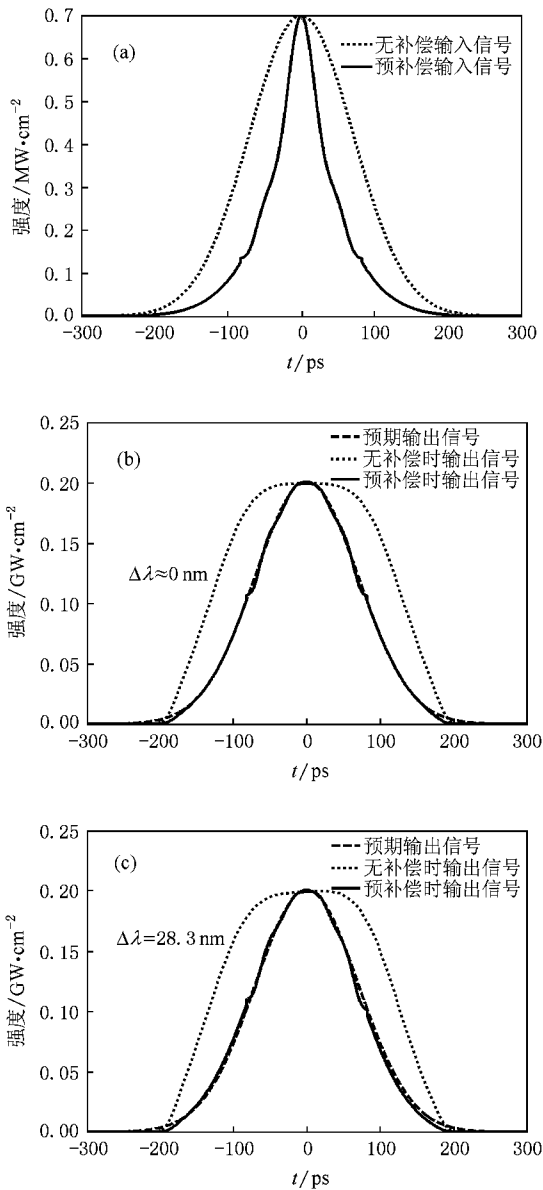


图3 输入信号光及在不同带宽下的输出信号光脉冲波形 (a)输入信号光波形 (b)窄带信号光的输出波形 (c)宽带信号光的输出波形

补偿输出信号(虚线所示)为无补偿信号输入时的输出信号,预期输出信号由短划线表示。由图 3(a)可以看出,无补偿输入信号光为高斯脉冲,而逆算得到的预补偿输入信号光脉冲比无补偿输入信号光脉冲更窄,这是因为输入信号光脉冲两侧的光强小,获得的增益比脉冲中间高。因此,作为预补偿输入波形,就必须减小信号光脉冲两侧的光强,从而才能得到预期输出的高斯型脉冲。从图 3(b)和(c)可以看出,当输入信号光脉冲不加以补偿时,输出信号光波形将会发生明显变化,变成了近似平顶脉冲。这是由于

在光参量放大过程中,输入信号光脉冲两侧的光强较小,其增益比中间高的缘故。然而,将“逆算法”求得的预补偿波形输入时,无论输入信号光脉冲为窄带(图 3(b))还是宽带(图 3(c)),得到的输出信号光波形与预期输出的高斯型脉冲均符合很好。

为了更好地衡量实际输出信号波形 $I'(t)$ 与预期输出信号波形 $I_0(t)$ 之间的偏离程度,引入平均偏差 δ ,

$$\delta = \frac{\sum_{j=1}^{N_t} |I'(j) - I_0(j)|}{N_t}, \quad (7)$$

式中, N_t 为时域采样点数, $I'(j)$, $I_0(j)$ 均为归一化的光强数据。

经计算,带宽为 0 nm 时,若对输入信号光加以“预补偿”,此时的输出信号光与预期输出信号光之间的偏差为 $\delta = 0.62\%$,而未加以补偿时, $\delta = 14.13\%$ 。当带宽为 28.3 nm 时,若对输入信号光加以“预补偿”,此时的输出信号光与预期输出信号光之间的偏差为 $\delta = 1.14\%$,而未加补偿时, $\delta = 13.64\%$ 。由此可见,通过对输入信号光加以“预补偿”,可以从很大程度上减小实际输出信号光与预期输出信号光之间的偏差,从而得到能满足要求的输出信号光。

3.2.2. 预期输出信号光为整形脉冲的情形

将 OPCPA 用于大型激光装置的前端时,往往需要输出具有特定形状的整形脉冲。以预期输出信号光为抛物线型脉冲为例来说明本文所提出的逆算方法在预期输出信号光为整形脉冲时的应用。图 4 给出了不同情况下的输入和输出信号光脉冲波形。计算中假设预期输出信号光脉冲为抛物线型窄带脉冲,脉冲持续时间为 8 ns,峰值强度为 0.2 GW/cm^2 ; 抽运光脉冲为 20 阶超高斯窄带脉冲, τ 为 6 ns,其他参数同图 2,逆算依据(6)式的多项式系数即为图 2 中的多项式系数。

由图 4(a)可以看出,当预期输出信号为抛物线型脉冲时,逆算得到的预补偿输入信号波形(实线所示)并非抛物线分布,而是脉冲宽度更窄、上升沿更陡的形状。由图 4(b)可以看出,若不对输入信号光加以预补偿,即以图 4(a)中的抛物型的无补偿输入信号(虚线所示)输入时,由于放大过程的增益饱和效应,输出信号光脉冲形状将产生明显变化,从而无法获得预期的抛物型输出信号光脉冲(短划线所示)。对输入信号光进行预补偿后,则输入信号光经

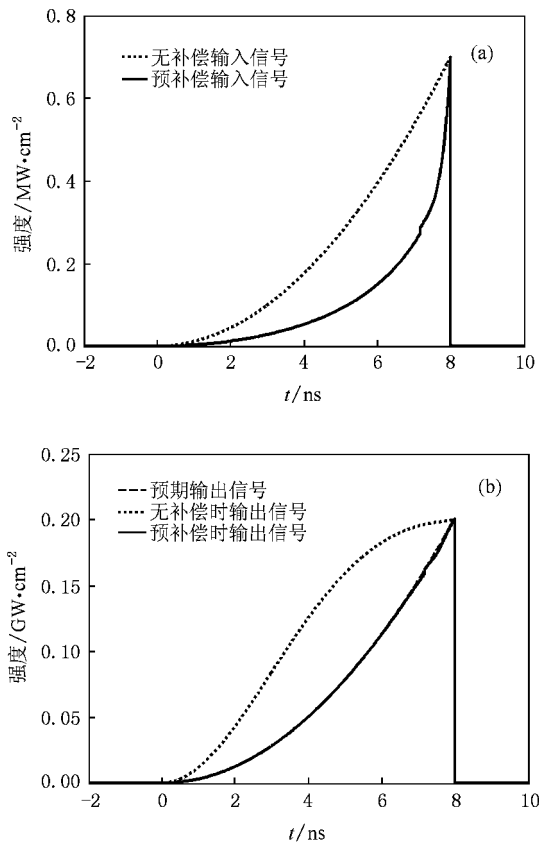


图 4 输入信号光和输出信号光脉冲波形 (a) 输入信号光 (b) 输出信号光

光参量放大后可获得抛物型的输出脉冲波形(实线所示)。经计算可知,对输入信号光加以预补偿时,输出信号光与预期输出信号光之间的偏差为 $\delta = 0.14\%$,而未加以补偿时, $\delta = 15.45\%$ 。

4. 结 论

本文通过讨论饱和度和输出信号脉冲波形的影响,指出了研究 OPCPA 逆问题的必要性。在此基础上,提出了解决 OPCPA 逆问题的计算模型和方法,并以预期输出激光脉冲为啁啾高斯脉冲以及抛物型的整形脉冲为例,对光参量放大的逆问题进行了研究。研究表明,在给定光参量放大晶体参数和输出脉冲波形的情况下,按照本文给出的逆算法可计算出相应的输入脉冲波形。然后通过脉冲整形技术对输入信号光加以预补偿,就可以从很大程度上减小实际输出信号光与预期输出信号光之间的偏差,从而获得能满足要求的输出信号光。本文提出的逆算法适用于不同形状、不同带宽的预期输出信号光脉冲,而且具有原理简单、计算快速准确的特点,可为激光脉冲整形设计提供参考。值得指出的是,本文的逆算法还可推广应用于倍频、和频等非线性过程的逆问题研究。

[1] Ross I N , Matousek P , Towrie M , Langley A J , Collier J L 1997 *Opt. Commun.* **144** 125
 [2] Igor J , Brian J C , Christopher A E 2002 *Appl. Opt.* **41** 2923
 [3] Kitagawa Y 1998 *Ann. Prog. Report* **17** 11
 [4] Collier J , Hernandez-Gomez C , Ross I N 1999 *Appl. Opt.* **38** 7486
 [5] Fragemann A , Pasiskevicius V , Laurrell F 2005 *Opt. Lett.* **30** 2296
 [6] Piskarskas A , Stabinis A , Yankauskas A 1986 *Sov. Phys. Usp.* **29** 869
 [7] Dubietis A , Jonusauskas G , Piskarskas A 1992 *Opt. Commun.* **88** 437
 [8] Zhu P F , Qian L J , Xue S L 2003 *Opt. Laser Technol.* **35** 16

[9] Armstrong J A , Bloembergen N , Ducuing J 1962 *Phys. Rev.* **127** 1918
 [10] Baumgartner R A , Byer R L 1979 *IEEE J. Quantum Electron.* **15** 432
 [11] Becker M F , Kuizenga D J , Phillion D W 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 3996
 [12] Xia J F , Wei Z Y , Zhang J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 256 (in Chinese) [夏江帆、魏志义、张 杰 2000 物理学报 **49** 256]
 [13] Li G 2005 *The Transformation and Expansion of Laser Frequencies (Applied Nonlinear Optical Technology)* (Beijing : Science Press) p235 (in Chinese) [李 港 2005 激光频率的变换与扩展(实用非线性光学技术) (北京 : 科学出版社) 第 235 页]

Inverse problem of optical parametric chirped pulse amplification *

Zeng Shu-Guang Zhang Bin[†]

(College of Electronics and Information Engineering , Sichuan University , Chengdu 610064 , China)

(Received 17 December 2007 ; revised manuscript received 7 September 2008)

Abstract

A method for solving the inverse problem of optical parametric chirped pulse amplification , i. e. , for a given shape of the output signal pulse , how to calculate the shape of the input signal pulse , is proposed. Based on numerical techniques such as split-step Fourier transform and fourth-order Runge-Kutta , the quantitative relation between the input signal intensity and the output signal intensity was obtained by numerical fitting. Taking the chirped Gaussian pulse and the shaping pulse with a certain shape as the required output signal pulse , the input signal pulse shape can be worked out by the inverse calculation. The results indicate that the inverse problem can be solved quickly and precisely with the method proposed in this paper , and this method is useful for pulse shaping.

Keywords : optical parametric chirped pulse amplification , inverse problem , chirped pulse , pulse shaping

PACC : 4265K , 4260F

* Project supported by the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education , China (Grant No. NCET-05-0784) and the Outstanding Young Researchers Foundation of Sichuan Province , China (Grant No. 05ZQ026-013).

[†] Corresponding author. E-mail : zhangbinff@sohu.com