

文章编号 : 0258-7025(2002)10-0885-04

# 飞秒光参量放大过程中高阶非线性效应的影响

朱鹏飞<sup>1</sup>, 钱列加<sup>2</sup>, 薛绍林<sup>3</sup>, 李美荣<sup>3</sup>, 林尊琪<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 上海交通大学物理系, 上海 200240; <sup>2</sup> 复旦大学光科学系, 上海 200433  
<sup>3</sup> 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)

**提要** 用计算机仿真模拟了高强度飞秒激光抽运下的光参量放大(OPA)过程,着重讨论了高阶非线性效应对参量转化效率和波形的影响。为了抑制高阶非线性效应对放大信号光波形的调制,改善波形质量,防止信号光的能量倒流回抽运光,并为进一步从抽运光中抽取尽可能多的能量,提高参量转化效率,引入了适当的相位失配以抵消高阶非线性效应。利用级联非线性相移从理论上解释了这一物理原因。

**关键词** 飞秒脉冲, 光参量放大, 高阶非线性, 数值模拟

**中图分类号** O 437.4 **文献标识码** A

## Effect of Cubic Nonlinearity on Optical Parametric Amplification of Femtosecond Pulse at High Pumping Intensity

ZHU Peng-fei<sup>1</sup>, QIAN Lie-jia<sup>2</sup>, XUE Shao-lin<sup>3</sup>, LI Mei-rong<sup>3</sup>, LIN Zun-qi<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240  
<sup>2</sup> Department of Optical Science & Engineering, Fudan University, Shanghai 200433  
<sup>3</sup> National Laboratory on High Power Lasers and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** The optical parametric amplification of femtosecond pulse at high pumping intensity is numerically simulated by computer. The effect of cubic nonlinearity on conversion efficient of the high-intensity pump pulse and the envelopes of signal-pulse are studied in detail. A suitable phase mismatch is introduced to compensate the nonlinear phase mismatch induced by cubic nonlinearity. The compensation can counteract the modulation on the signal pulse on count of cubic nonlinearity and prevent the energy converting from the signal back to pump in three-wave interaction. So, higher optical-conversion efficiency and better quality of amplified signal can be gotten. An explicit explanation with cascaded nonlinear phase shift is presented.

**Key words** femtosecond pulse, optical parametric amplification, cubic nonlinearity, numerical simulation

## 1 引言

光参量放大(OPA)具有增益高、可调谐范围宽的特点,是有望成为产生 5 fs 脉冲的手段之一,近年来人们一直对它保持着浓厚的兴趣。但是大多数研究着重于讨论时域脉冲的压缩问题<sup>[1,2]</sup>,没有进行

全面的讨论。OPA 是一种  $\chi^{(2)}$  过程,要求很高的驱动或者抽运光强,超短超强飞秒脉冲的出现为它提供了条件。当抽运光强超过  $\text{GW}/\text{cm}^2$  量级时,高阶非线性效应的影响将会体现出来,这时就应该考虑  $\chi^{(3)}$  过程。关于高强度抽运下  $\chi^{(2)}$  和  $\chi^{(3)}$  的混合过程,许多研究者已围绕着二次谐波<sup>[3,4]</sup>和三次谐

收稿日期: 2001-07-05; 收到修改稿日期: 2001-08-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863-804-2)、国家自然科学基金(60088003)和国家 973(G19990752023)资助课题。

作者简介: 朱鹏飞(1974—),男,上海交通大学物理系讲师,博士,主要从事光波导技术的研究。E-mail: zhupengfei@hotmail.com

波<sup>[5]</sup>做了很多理论和实验方面的工作,但对于高阶非线性效应的影响,没有进行特别详细的讨论。

本文用计算机仿真模拟了高强度飞秒激光抽运下光参量放大的过程,着重讨论了三阶非线性效应对参量转化效率和波形的影响。

## 2 理 论

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_{g1}} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_1(z, t) &= i \frac{\omega_1}{n_1 c} \hat{\chi}^{(2)} E_3 E_2^* \exp(-iz\Delta k) + i \frac{3\omega_1}{2n_1 c} \hat{\chi}^{(3)} E_1 \sum_{j=1}^3 \kappa_{1j} |E_j|^2 \\ \left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_{g2}} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_2(z, t) &= i \frac{\omega_2}{n_2 c} \hat{\chi}^{(2)} E_3 E_1^* \exp(-iz\Delta k) + i \frac{3\omega_2}{2n_2 c} \hat{\chi}^{(3)} E_2 \sum_{j=1}^3 \kappa_{2j} |E_j|^2 \\ \left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_{g3}} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_3(z, t) &= i \frac{\omega_3}{n_3 c} \hat{\chi}^{(2)} E_1 E_2 \exp(iz\Delta k) + i \frac{3\omega_3}{2n_3 c} \hat{\chi}^{(3)} E_3 \sum_{j=1}^3 \kappa_{3j} |E_j|^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $E_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\kappa_i$ ,  $v_{gi}$ ,  $n_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 分别为三个波(抽运波、信号波和闲波)的复振幅、频率、波矢、群速度、折射率。 $\Delta k$  为三个波之间的相位失配,  $\Delta k = k_3 - k_1 - k_2$ 。定义非线性长度  $L_N = n_1 c / \omega_1 \hat{\chi}^{(2)} E_{30}$ ,

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{\partial}{\partial z'} + \frac{\delta T_{13}}{l'} \right) E_1(z', \tau) &= i E_3 E_2^* \exp(-iz' L_N \Delta k) + 8\pi i (n_2 E_{30}^2 \chi L_N / \lambda) E_1 \sum_{j=1}^3 \kappa_{1j} |E_j|^2 \\ \left( \frac{\partial}{\partial z'} + \frac{\delta T_{23}}{l'} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) E_2(z', \tau) &= i E_3 E_1^* \exp(-iz' L_N \Delta k) + 8\pi i (n_2 E_{30}^2 \chi L_N / \lambda) E_2 \sum_{j=1}^3 \kappa_{2j} |E_j|^2 \\ \frac{\partial}{\partial z'} E_3(z', \tau) &= 2i E_1 E_2 \exp(iz' L_N \Delta k) + 16\pi i (n_2 E_{30}^2 \chi L_N / \lambda) E_3 \sum_{j=1}^3 \kappa_{3j} |E_j|^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $n_2(\omega_j) = 3\hat{\chi}^{(3)}/8n_{\omega_j}$ ,  $\delta T_{ij}$  定义为走离时间,其意义是两个不同中心频率的光脉冲通过非线性晶体后相互分开的时间,即群速度失配(GVM),  $l'$  为晶体归一化长度(相对于  $L_N$ )。系数  $\kappa_{ij}$  代表相位调制:当  $i = j$  时,  $\kappa_{ij} = 1$ , 代表自相位调制;当  $i \neq j$  时,  $\kappa_{ij} = 2$ , 代表交叉相位调制。

## 3 计算机仿真模拟与分析

在仿真模拟中假定入射的抽运光和信号光波形都是高斯型。为了充分地对信号光进行放大,使抽运激光的脉宽略大于信号光脉宽。计算机仿真模拟的结果和分析如下。

### 3.1 三阶非线性效应对参量转化效率和波形的影响

三个波在沿着非线性晶体耦合传播的过程中,抽运波的能量将逐渐转化给信号波和闲波,抽运波的中心会因损耗而凹陷下去。当信号波与闲波的能量达到可与抽运波的能量相比拟的程度时,它们的能量开始“倒流”回抽运波,使抽运波凹陷下去的中心略微突起(图 1(a)波形 1)。对于多级参量放大,

在高强度激光抽运下,介质的高阶非线性效应就会体现出来,极化率  $p$  可表示为

$$p = \hat{\chi}^{(1)} \cdot E + \hat{\chi}^{(2)} : EE + \hat{\chi}^{(3)} : EEE + \dots \quad (1)$$

式中  $E$  为电场强度。 $\hat{\chi}^{(1)}$  为介质的线性电极化率, $\hat{\chi}^{(2)}$ ,  $\hat{\chi}^{(3)}$  分别为二阶和三阶电极化率。OPA 是一个三波非线性互作用的过程,耦合方程可写为<sup>[1]</sup>

其中  $E_{30}$  为抽运光的振幅。将长度量按  $L_N$  归一化,并对时间进行坐标变换,令  $\tau = t - z/v_{g3}$ , 则方程(2)变为

当光强超过  $\text{GW}/\text{cm}^2$  量级时,高阶非线性效应的影响将会体现出来。高阶非线性效应会加剧信号波的能量倒流,使抽运波凹陷下去的中心更加突起(图 1(a)波形 2)。为了抑制倒流,可引入相位失配以抵消  $\hat{\chi}^{(3)}$  引起的非线性相位失配,使抽运波的中心完全凹陷下去(图 1(a)波形 3)。从图 1(a)中三种不同情况下抽运波的总体凹陷程度来看,波形 3 凹陷的程度最大,波形 2 次之,波形 1 最小。抽运波凹陷得越多,说明它转化给信号波和闲波的能量也就越多,因此参量转化效率也就越高。这与图 1(c)中三种不同情况下参量转化效率最大值的差异是一致的。

信号光沿着晶体传播到某一距离时,光波中心处的增益会达到最大值,但在此距离处整个光波的总增益并没有达到最大,接着往后传输时,信号波中心处的能量开始“倒流”回抽运波(图 1(b)波形 1),可是此时光波边缘部分的强度还是比较低的,所以边缘部分强度继续增大,增大到一定程度后,边缘部分的能量也将开始“倒流”(图 1(b)波形 2),整个波的总增益就开始转而下降。在参量放大过程中,信号光虽然得到了较高的增益,但与此同时它的波形质量也会变差。这是由于高阶非线性效应对光波产

生了很强的调制<sup>[6]</sup>。

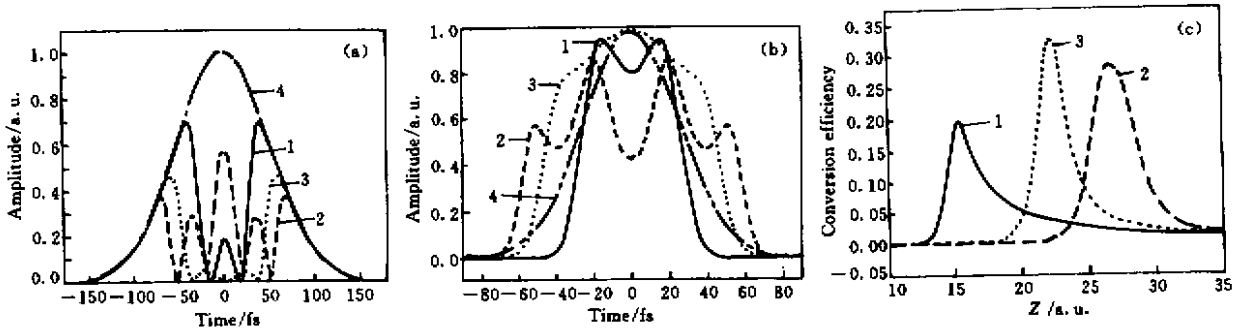


图 1 参量放大过程中 (a) 抽运光的波形 (b) 信号光的波形 (c) 转化效率

曲线 1 代表忽略高阶非线性效应的情况 ; 曲线 2 代表考虑高阶非线性效应的情况 ;

曲线 3 代表引入适当的相位失配以抵消高阶非线性效应的影响 ; 曲线 4 代表初始时的脉冲形状

Fig.1 Process of optical parametric amplification

(a) envelopes of the pump pulse ; (b) envelopes of the signal pulse ; (c) calculated conversion efficiency as a function of distance in crystal

Curve 1 represents the case of no cubic nonlinearity. Curve 2 represents the case of with the nonlinear phase mismatch included. Curve 3 represents the case with the nonlinear phase mismatch and the inclusion of additional phase mismatch to counteract for cubic phase. In addition, curve 4 represents the incident Gaussian pulse

### 3.2 对三阶非线性效应的补偿

三阶非线性效应会引起非线性相位失配  $\phi^{NL}$  , 它的大小与光强  $I$  成正比

$$\phi^{NL} \propto n_2 I \quad (4)$$

为了抑制  $\phi^{NL}$  对信号光波形的调制 , 改善波形质量 , 防止信号光的能量倒流回抽运光 , 并进一步从抽运光中抽取出尽可能多的能量 , 提高参量转化效率 , 可引入适当的相位失配以补偿  $\phi^{NL}$  . 这是由于相位失配的存在会引起非线性相移  $\Delta\phi^{NL}$  .  $\Delta\phi^{NL}$  可近似表示为<sup>[7]</sup>

$$\Delta\phi^{NL} \cong - \frac{\Delta k L}{2} \left[ 1 + (2\Gamma/\Delta k)^2 \right]^{1/2} - 1 \quad (5)$$

式中  $L$  为晶体长度 ,  $\Gamma$  为一与光强有关的量 . 从公式 (5) 中可以看出  $\Delta\phi^{NL}$  与  $\Delta k$  的大小与符号有关 . 如果  $\Delta k$  选择合适 , 可以使  $\Delta\phi^{NL}$  最大限度地抵消  $\phi^{NL}$  , 进一步提高参量转化效率 . 这就是为什么相位失配时的参量转化效率反而要比相位匹配时高的原因 (图 1(c)) .  $\Delta\phi^{NL}$  抵消了  $\phi^{NL}$  对信号光的调制 , 所以放大信号光的输出波形质量亦有所改善 (图 1(b) 中波形 3) .

如果引入的  $\Delta k$  太大或太小  $\Delta\phi^{NL}$  便不能最大限度地抵消  $\phi^{NL}$  , 参量转化效率就达不到最大值 . 所以引入的相位失配有一最佳值 . 对于不同的抽运光强 , 相位失配补偿的值不同 . 较大的抽运光强对应着较大的  $\Delta k$  最佳值 (图 2) . 抽运光强越大 , 非线性效应引起的非线性相位失配  $\phi^{NL}$  越大 , 需要用较大的  $\Delta\phi^{NL}$  来抵消 , 也就是要求相位失配补偿大一些 (图 2) .

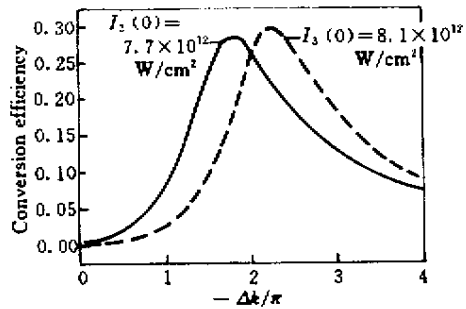


图 2 参量转化效率与相位补偿的关系

抽运光强度  $I_s(0)$  分别为  $7.7 \text{ GW/cm}^2$  和  $8.1 \text{ GW/cm}^2$

Fig.2 Dependences of the parametric conversion efficiency  $\eta$  on the phase mismatch to counteract for cubic phase for the peak intensity of the pump pulse  $7.7 \text{ GW/cm}^2$  and  $8.1 \text{ GW/cm}^2$

## 4 总 结

高强度抽运下光参量放大是一个很复杂的动态过程 . 本文的计算机仿真模拟表明 , 高阶非线性效应引起的非线性相位会对波形产生调制 , 降低参量转化效率 . 为了得到较好的放大信号光波形和更高的参量转化效率 , 可引入适当的相位失配以抵消高阶非线性效应带来的不利影响 . 利用级联非线性相移从理论上解释了这一物理原因 .

### 参 考 文 献

1 Rodrigo Lopez-Martens , Stephane Fournier , Catherine Le Blanc

*et al.*. Parametric amplification and self-compression of ultrashort tunable pulses [ J ]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* ,1998 ,**4** ( 2 ) 230 ~ 236

2 John D. V. Khaydarov , James H. Andrews , Kenneth D. Singer. Pulse-compression mechanism in a synchronously pumped optical parametric oscillator [ J ]. *J. Opt. Soc. Am. B* ,1995 ,**12** ( 11 ) 2199 ~ 2208

3 Y. Beaudoin , C. Y. Chien , J. S. Coe *et al.*. Ultrahigh-contrast Ti:sapphire/Nd:glass terawatt laser system [ J ]. *Opt. Lett.* ,1992 ,**17** ( 12 ) 865 ~ 867

4 T. Ditmire , A. M. Rubenchik , D. Eimert *et al.*. Effects of cubic nonlinearity on frequency doubling of high-power laser

pulses [ J ]. *J. Opt. Soc. Am. B* ,1996 ,**13** ( 4 ) 649 ~ 655

5 Audrius Dubietis , Gintaras Tamosauskas , Arunas Varanavicius. Femtosecond third-harmonic pulse generation by mixing of pulses with different duration [ J ]. *Opt. Comm.* ,2000 ,**186** :211 ~ 217

6 T. B. Razumikhina ,L. S. Telegin ,A. I. Kholodnykh *et al.*. Three-frequency interactions of high-intensity light waves in media with quadratic and cubic nonlinearities [ J ]. *Sov. J. Quantum Electron.* ,1984 ,**14** ( 10 ) :1358 ~ 1363

7 R. DeSalvo , D. J. Hagan , M. Sheik-Bahae *et al.*. Self-focusing and self-defocusing by cascaded second-order effects in KTP [ J ]. *Opt. Lett.* ,1992 ,**17** ( 1 ) 28 ~ 30

\*\*\*\*\*

### 高斜率效率 6.5 W 双包层掺 Yb 光纤激光器 \*

用多模大功率 LD 抽运掺 Yb 双包层光纤 ,研制出了一台高斜率效率的双包层光纤激光器。实验采用线形腔结构 ,LD 端面抽运 20 m 长掺 Yb 双包层光纤。LD 抽运源输出中心波长 976 nm ,带有直径 800  $\mu\text{m}$  的输出尾纤 ,数值孔径小于 0.22。抽运光经透镜组耦合进入光纤内包层。二相色镜 (  $R_{1064\text{ nm}} = 99.5\%$  ,  $T_{976\text{ nm}} = 95\%$  )置于光纤输入端面与透镜组之间。双包层掺 Yb 光纤具有 ( 340/400  $\mu\text{m}$  )D 形内包层结构 ,数值孔径 0.38 ,这种 D 形结构的内包层使抽运光在其中传播时更加有效地被纤芯中的 Yb 离子吸收。纤芯直径 10.6  $\mu\text{m}$  ,数值孔径 0.16 ,其中可容纳几个模式传输。Yb 双包层光纤输出端面与光纤轴成直角 ,这样利用光纤端面 4% Fresnel 反射作为输出端反馈与前面二相色镜构成了线形谐振

腔。输出激光经透镜准直 ,再利用 LP-3C 型功率计测其输出功率 ,并采用 MS900/B 光谱分析仪监测其输出光谱。

实验中测得激光输出功率与入纤抽运功率的关系曲线。得到的阈值抽运功率为 0.8 W ,斜率效率高达 86.5%。当入纤抽运功率为 8.4 W 时 ,得到最大输出激光功率 6.5 W。通过观测其光谱可知 ,激光输出中心波长 1.08  $\mu\text{m}$  ,抽运光几乎完全被吸收。进一步改进抽运光的耦合系统以提高入纤功率 ,必将获得更高功率的激光输出。

南开大学物理科学学院  
 光电信息科学系 ,天津 300071  
 吕福云 ,樊亚仙 ,王宏杰 ,吕可诚  
 收稿日期 2002-04-22

\* 国家自然科学基金 ( No.69977012 ) 国家自然科学基金重点项目 ( No.60137010 ) 资助。