

# 啁啾匹配光参量啁啾脉冲放大理论分析

李现华<sup>1</sup> 曾曙光<sup>1</sup> 张彬<sup>1</sup> 孙年春<sup>1</sup> 隋展<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064; <sup>2</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 通过研究光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)过程增益谱随抽运光中心波长的变化,提出了啁啾匹配 OP CPA 方法。以 KDP 晶体为例,研究了啁啾匹配与啁啾非匹配两种 OP CPA 方式的信号光时域和频域特性,以及放大前后脉冲时间波形和频谱形状的变化等。结果表明,非啁啾匹配时,将出现明显的增益窄化现象;而采用啁啾匹配的方法可以大大增加增益谱宽,从而不会出现增益窄化现象。

**关键词** 非线性光学; 啁啾匹配; 光学参量啁啾脉冲放大; 啁啾脉冲; 增益窄化

**中图分类号** O437 **OCIS** 190.7110 320.1590 **文献标识码** A

## Theoretical Analysis on Chirp Matched Optical Parametric Chirped Pulse Amplification

Li Xianhua<sup>1</sup> Zeng Shuguang<sup>1</sup> Zhang Bin<sup>1</sup> Sun Nianchun<sup>1</sup> Sui Zhan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Electronics Information, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China  
<sup>2</sup> Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** Chirp matched optical parametric chirped pulse amplification method (OPCPA) has been proposed by studying the variation of OP CPA gain spectrum with the pump optical center wavelength. Taking nonlinear KDP crystal as an example, the temporal and spectral gain characteristics of the chirp matched and mismatched OP CPA methods have been studied. Furthermore, the changes of the temporal and the spectral profiles before and after the OP CPA have been analyzed in details. The results show that the gain narrowing phenomenon becomes significant for the chirp mismatched case. However, the gain spectrum width is greatly increased by using chirp matched method, eliminating the gain narrowing phenomenon.

**Key words** nonlinear optics; chirp matching; optical parametric chirped pulse amplification; chirped pulse; gain narrowing

## 1 引言

近年来,飞秒激光啁啾脉冲放大(CPA)技术<sup>[1]</sup>日渐成熟,极大地促进了高功率超短脉冲激光系统的发展,使超短脉冲激光的峰值功率达到太瓦量级甚至拍瓦量级,聚焦功率密度已达到  $10^{20} \sim 10^{22} \text{ W/cm}^2$ ,从而成为超高功率、超高强度激光装置开展激光聚变“快点火”以及探索极端条件下物质行为等重大科学研究的强有力手段<sup>[2~4]</sup>。然而,对于高增益放大器,放大器工作介质的增益窄化效应严重制约着输出激光脉冲的时间特性,使脉冲的光谱带宽变窄,导致压缩后的脉冲宽度增加。因此,克服增益窄化效应一直以来都是超短脉冲领域的研究热点<sup>[5]</sup>。以 CPA 为基础的光学参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术既继承了 CPA 的优点,又具有增益高、带宽宽、信噪比高、B 积分低、热效应小<sup>[6]</sup>等突出优点。为此,美国 Rochester 大学激光力能学实验室的 OMEGA 升级装置、法国的 PHEBUS 激光装置、英国卢瑟福实验室的“火神”PW 装置、德国的 PHELIX

收稿日期: 2009-12-17; 收到修改稿日期: 2010-01-05

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 李现华(1982—),男,硕士研究生,主要从事超短脉冲传输和放大方面的研究。E-mail: lhua0306@163.com

导师简介: 张彬(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事激光物理和技术方面的研究。E-mail: zhangbinff@sohu.com

(通信联系人)

计划等均采用了 OPCPA 技术<sup>[7,8]</sup>,OPCPA 已成为产生超强超短激光的一种新技术<sup>[6]</sup>。对于多级 OPCPA 装置的主放大级,由于能量较大,需采用能量阈值较高且口径较大的非线性晶体<sup>[9]</sup>,如 KDP 或 KD\*P 晶体。然而,这类晶体作为 OPCPA 非线性晶体的最大缺点就是增益带宽很窄<sup>[10]</sup>。近年来,提出了用啁啾匹配技术<sup>[11~14]</sup>来提高高频过程的带宽以及获得极宽的光学参量放大(OPA)增益带宽等。

本文采用啁啾匹配技术来克服 KDP 或 KD\*P 等非线性晶体增益带宽较窄的缺点。以 KDP 晶体为例,通过数值模拟计算,分析了在小信号放大以及饱和放大情况下,啁啾匹配与啁啾非匹配两种 OPCPA 方式的时域和频域特性。

## 2 理论模型

光参量放大(OPA)属于典型的三波混频过程,在平面波近似及慢变振幅近似下,可用三波耦合方程描述<sup>[8,15]</sup>

$$\frac{\partial E_s}{\partial z} + \frac{n_s}{c} \frac{\partial E_s}{\partial t} + \alpha_s E_s = i \frac{\omega_s d_{\text{eff}}}{n_s c} \frac{1}{\cos^2 \beta_s} E_i^* E_p \exp(i\Delta k z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_i}{\partial z} + \frac{n_i}{c} \frac{\partial E_i}{\partial t} + \alpha_i E_i = i \frac{\omega_i d_{\text{eff}}}{n_i c} \frac{1}{\cos^2 \beta_i} E_s^* E_p \exp(i\Delta k z), \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial z} + \frac{n_p}{c} \frac{\partial E_p}{\partial t} + \alpha_p E_p = i \frac{\omega_p d_{\text{eff}}}{n_p c} \frac{1}{\cos^2 \beta_p} E_s E_i \exp(-i\Delta k z), \quad (3)$$

式中  $E_j, \omega_j, n_j, \alpha_j, \beta_j$  ( $j$  为 s, i, p) 分别代表信号光、闲频光和抽运光的电场强度、频率、折射率、损耗系数以及光波在非线性介质中传播时坡印亭矢量的走离角; $c$  为真空中的光速; $d_{\text{eff}}$  为三波作用下晶体的有效非线性系数; $\Delta k$  为三波耦合时的相位失配量。当信号光与抽运光、闲频光与抽运光之间的夹角分别为  $\alpha, \beta$  时,相位失配量  $\Delta k$  可以表示为<sup>[7,16]</sup>

$$\Delta k = k_p - k_s \cos \alpha - k_i \cos \beta = 2\pi \left( \frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_s}{\lambda_s} \cos \alpha - \frac{n_i}{\lambda_i} \cos \beta \right), \quad (4)$$

式中

$$\lambda_i = \frac{\lambda_s \lambda_p}{\lambda_s - \lambda_p}, \quad \beta = \arcsin \left( \frac{n_s}{n_i} \frac{\lambda_i}{\lambda_s} \sin \alpha \right). \quad (5)$$

当参量光的脉冲宽度为几百皮秒量级时,可忽略群速度失配的影响。由于参量放大过程中晶体对光的吸收很小,因此,在数值求解中可以暂不考虑吸收损耗。在共线条件下,将三波耦合方程归一化,忽略走离效应及衰减,可得到 OPA 过程的参量增益(强度增益)的解析解为<sup>[7,15,16]</sup>

$$G = 1 + (\Gamma_0 r)^2 (\sinh B/B)^2, \quad (6)$$

式中  $\Gamma_0^2 = 8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 I_p(0) / (\epsilon_0 \lambda_s \lambda_i n_s n_i n_p c)$ ,  $B = \sqrt{(\Gamma_0 r)^2 - (\Delta k r/2)^2}$ ,  $r$  为三波在晶体中的相互作用长度, $I_p(0)$  为抽运光的初始光强度。

在数值模拟中,假设信号光、抽运光的中心波长分别为 800, 527 nm,参量光是通过 KDP 晶体进行放大,晶体采用 I 类相位匹配方式。

## 3 数值模拟及其理论分析

信号光和抽运光的初始场分布均可以表示为

$$E(t) = E_0 \exp \left[ -\frac{1+iC}{2} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{2m} \right], \quad (8)$$

式中  $m=1$  时为信号光脉冲波形, $m>1$  时为抽运光波形; $T_0$  为脉冲在  $1/e$  处的半宽度; $C$  为线性啁啾参数。计算中,信号光和抽运光在  $1/e$  处的半宽度分别为 0.78 ns 和 2 ns,对应的初始最大光强分别为  $4.5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  和  $3.5 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ ,抽运光波形为  $m=20$  的平顶分布。

### 3.1 抽运光中心波长对信号光增益谱的影响

假设信号光与抽运光的夹角  $\alpha=0$  (共线条件下),数值解与解析解的信号光强度随晶体厚度的变化如图

1所示。从图1可以看出,如果KDP晶体过厚则会达到饱和和放大状态,甚至出现过饱和状态,从而导致能量将从信号光和闲频光“回流”到抽运光,使信号光增益明显降低。因此,应该选择合适的KDP晶体厚度以确保信号光在小信号增益条件下按指数迅速增长。本文选择的晶体厚度为1.2 cm,而在饱和放大时晶体厚度为2.1 cm。为了说明抽运光中心波长对信号光增益谱的影响,图2给出了晶体长度为1.5 cm时,不同抽运光中心波长时的信号光增益谱。分析图2可知,对于某一给定的抽运光中心波长,相应地存在一最佳的信号光波长,以使信号光和抽运光对应的频率成分满足相位匹配条件。因此,通过适当调整信号光和抽运光的啁啾参数,使之满足一定的匹配关系,就能使信号光和抽运光在各个时刻均满足相位匹配条件。

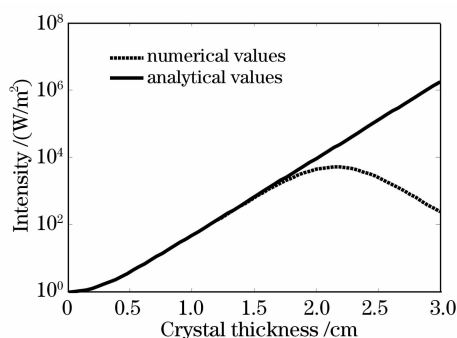


图1 信号光强度随晶体厚度的变化

Fig. 1 Variation of the intensity of signal pulse with the thickness of crystal

图3给出了抽运光波长随信号光波长的变化。可知,对于任一信号光波长,存在一最佳的抽运光波长与之对应,从而可以根据信号光的波长确定抽运光的波长,实现信号光和抽运光在各个时刻的相位匹配。

### 3.2 啁啾匹配的计算方法与分析

通过对图1~3的分析可知,在光参量的放大过程中,一方面,为了获得较高的增益,应该进行饱和放大;另一方面,如果信号光和抽运光啁啾不匹配,则会导致输出信号光的频谱发生畸变。因此,需要计算信号光和抽运光的频率成分满足一种匹配关系使波矢失配量最小。

信号光的瞬时频率为

$$\omega = \omega_0 + CT/T_0^2, \quad (9)$$

式中 $\omega_0$ 为中心频率。

假设 $T_1, T_2$ 时刻信号光的瞬时频率分别为 $\omega_1, \omega_2$ ,于是,由(9)式可得信号光的啁啾参数计算公式为

$$C = \Delta\omega T_0^2 / \Delta T, \quad (10)$$

式中 $\Delta\omega = 2\pi c \Delta\lambda / \lambda^2$ 为 $T_1, T_2$ 时刻瞬时频率的差值, $\Delta T = T_2 - T_1$ (其取值应与信号光在 $1/e$ 处的半宽度相差不大)。

通过分析图2,图3可知,信号光和抽运光在各个时刻满足相位匹配条件的波长是一一对应的,因此,可以先计算信号光的啁啾参数,然后再计算与之相匹配的抽运光的啁啾参数。具体步骤如下:1)根据信号光的脉冲宽度及频谱宽度计算出信号光的啁啾参数;2)根据信号光的脉冲宽度确定抽运光的脉冲宽度;3)根据信号光的频谱宽度确定所需的增益谱宽;4)根据增益谱宽确定所需抽运光的频谱宽度;5)由抽运光的脉冲宽度及频谱宽度确定抽运光的啁啾参数。

由上述计算方法计算得到信号光和抽运光匹配时的啁啾参数分别为 $1.2 \times 10^4$ 和 $5.4 \times 10^4$ 。对于抽运光无啁啾时,则信号光和抽运光啁啾非匹配,此时,信号光和抽运光啁啾参数分别为 $1.2 \times 10^4$ 和0。图4给出了啁啾匹配与非匹配情况下的信号光增益随时间的变化。

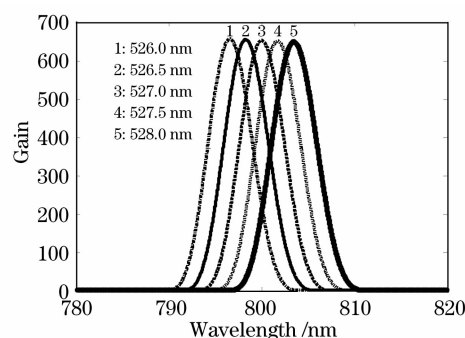


图2 不同抽运光中心波长下信号光的增益谱

Fig. 2 Signal optical gain spectra under different pump optical center wavelengths

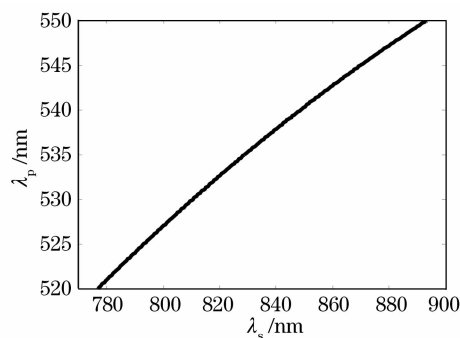


图3 抽运光波长随信号光波长的变化

Fig. 3 Variation of the pump wavelength with signal wavelength

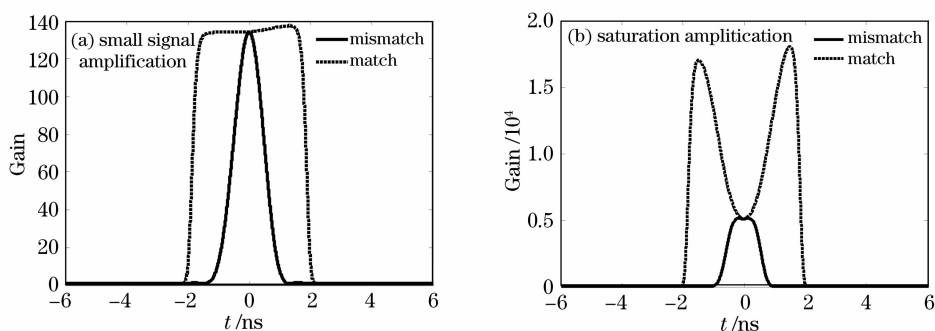


图4 啁啾匹配与非匹配情况下信号光增益随时间的变化

Fig. 4 Variation of the signal optical gain with time under chirp matched and mismatched conditions

由图4可见,相对于啁啾非匹配情况,啁啾匹配时的信号光增益时间窗口更宽。这是因为啁啾匹配时两侧的信号光亦满足相位匹配条件。从图4还可看出,啁啾匹配情况下,饱和放大时的信号光增益在中间部分出现明显凹陷,其主要原因是光参量啁啾脉冲放大过程中,当抽运光强一定时,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。当晶体长度超过最佳晶体长度时,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OPCPA的“逆过程”,能量由信号光“回流”至抽运光,因此,饱和放大时信号光增益在中间部分将出现明显凹陷,而信号光脉冲前后沿则由于强度较弱,仍然可得到有效放大。

图5给出了小信号放大情况下,啁啾匹配与啁啾非匹配时光参量放大前后信号光脉冲形状的变化。分析图5可知,在小信号放大情况下,当啁啾匹配时,信号光脉冲的时间波形和频谱分布均与初始信号光一致,而啁啾非匹配时,时域和频域均出现了窄化现象。分析其主要原因在于小信号放大情况下,当啁啾匹配时,信号光各部分均得到了有效放大。然而,对于非啁啾匹配情况,由于增益带宽较窄,信号光仅有中间部分得到了有效放大,从而出现增益窄化现象。另外,对于线性啁啾脉冲,由(9)式可知,频域与时域存在一一对应关系,因此,啁啾匹配情况下光参量啁啾脉冲的时域加宽也会导致相应的频谱加宽。

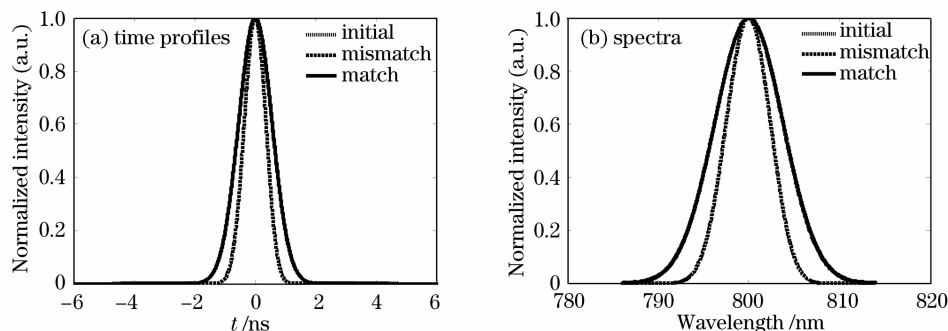


图5 小信号放大情况下,啁啾匹配与啁啾非匹配时光参量放大前后脉冲形状的变化

Fig. 5 Changes of pulse profiles before and after OPA under chirp matched and mismatched condition for the case of small signal amplification

图6给出了饱和放大情况下,啁啾匹配与啁啾非匹配时光参量放大前后脉冲形状的变化。分析图6可知,在饱和放大情况下,啁啾匹配时的脉宽与谱宽均比原始信号光的宽,而啁啾非匹配时时域和频域的窄化效应仍然十分明显。这是因为在饱和放大情况下,当啁啾非匹配时,只有中心波长附近的信号光能与抽运光有效地相互作用,从而使中心波长附近的光强得到迅速增长,而远离中心波长的频谱成分因相位失配很大而不能像中心频率那样得到有效放大,因此,窄化效应比较严重,脉宽变窄。而当啁啾匹配时,由于信号光与抽运光瞬时频率的一一对应关系,信号光在任何时刻均满足相位匹配条件<sup>[10~12]</sup>。另外,由于两侧的信号光光强相对较弱,可获得比中间部分更高的增益,因此,此时的信号光脉宽与谱宽均明显变宽。由此可见,采用啁啾匹配方式可以有效地抑制增益窄化效应。

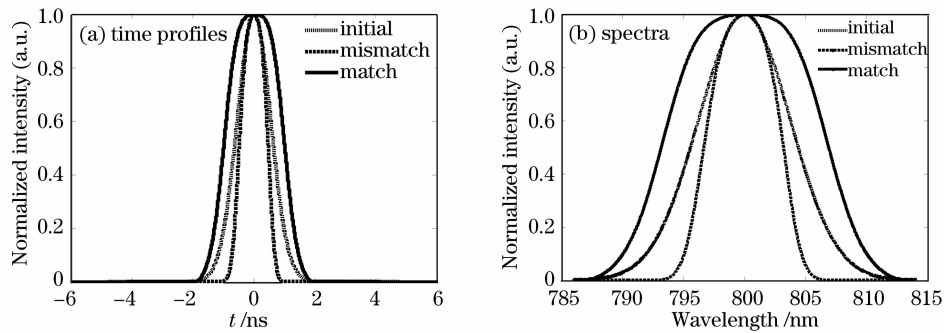


图 6 饱和放大情况下,啁啾匹配与啁啾非匹配时光参量放大前后脉冲形状的变化

Fig. 6 Changes of pulse profiles before and after OPA under chirp matched and mismatched condition for the case of saturation amplification

## 4 结 论

在 OPCPA 的基础上,利用 KDP 晶体,理论分析了小信号放大和饱和放大下啁啾匹配与非啁啾匹配的 OPCPA 的时域和频域特性,详细讨论了啁啾匹配与非啁啾匹配两种 OPCPA 方式的增益特性,以及放大前后信号光脉冲时间波形和频谱形状的变化等。研究表明,采用信号光和抽运光啁啾匹配的方法可以有效地克服 OPCPA 中的增益窄化效应,从而为 KDP 晶体在 OPCPA 中的应用提供一种新的方法。此外,常规的宽带增益 OPCPA 方式在放大信号光的同时也使时间窗口内的参量荧光得到放大,从而限制 OPCPA 系统信噪比提升的不足<sup>[17]</sup>。对于啁啾匹配的 OPCPA 方式,信号光由于满足相位匹配增益较高,而大部分的参量荧光等噪声则位于增益带宽之外,不能得到有效放大,从而信噪比得以提升。这也可为 OPCPA 系统信噪比提升提供一种新的思路。

## 参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3): 219~221
- 2 M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane *et al.*. 0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17): 1594~1596
- 3 Zhang Jie. Strong field physics—a new discipline[J]. *Physics*, 1997, **26**(11): 643~649  
张 杰. 强场物理——一门崭新的学科[J]. *物理*, 1997, **26**(11): 643~649
- 4 Guo Ailin, Yang Qingwei, Zhang Fuling *et al.*. Spectrum shaping of chirped pulse[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1582~1585  
郭爱林,杨庆伟,张福领等. 啁啾脉冲的光谱整形[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1582~1585
- 5 Liu Lanqin, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng *et al.*. Spectral gain narrowing compensation modulation function in high-power ultrashort-pulse laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(6): 2764~2768  
刘兰琴,彭翰生,魏晓峰等. 高功率超短脉冲激光系统中光谱增益窄化补偿的调制函数[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(6): 2764~2768
- 6 Deng Qinghua, Peng Hansheng, Zhang Xiaomin *et al.*. New method of chirped-pulse spectrum shaping using phase mismatched optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 354~359  
邓清华,彭翰生,张小民等. 光学参变啁啾脉冲放大相位失配啁啾脉冲频谱整形新方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 354~359
- 7 Gao Yanxia, Zhao Gaiqing. Optical parametric amplification in periodically poled LiNbO<sub>3</sub> for high energy perawatt laser system front end[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1092~1095  
高艳霞,赵改清. 用于高能拍瓦激光系统前端的周期极化 LiNbO<sub>3</sub> 光参量放大[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1092~1095
- 8 Zeng Shuguang, Zhang Bin. Inverse problem of optical parametric chirp pulse amplification[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(4): 2476~2481  
曾曙光,张 彬. 光参量啁啾脉冲放大的逆问题[J]. *物理学报*, 2009, **58**(4): 2476~2481
- 9 Z. Z. Xu, X. D. Yang, Y. X. Leng *et al.*. High-power output from a compact OPCPA Laser system[J]. *Chin. Opt. Lett.*,

- 2003, **1**(1): 24~27
- 10 T. Brabec. Strong Field Laser Physics[M]. Berlin: Springer, 2008
- 11 K. Osvay, I. N. Ross. Broadband sum-frequency generation by chirp-assisted group-velocity matching[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(7): 1431~1438
- 12 Li Xian, Wang YanLing, Zhou Xugui *et al.*. High conversion efficiency of third harmonic generation using femtosecond laser pulse with chirp compensation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(6): 73~77  
李 贤,王燕玲,周绪桂 等. 啁啾补偿飞秒脉冲高效三次谐波产生[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(6): 73~77
- 13 J. Limpert, C. Agueraray, S. Montant *et al.*. Ultra-broad bandwidth parametric amplification at degeneracy[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7386~7392
- 14 I. N. Ross, P. Matousek, G. H. C. New *et al.*. Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(12): 2945~2956
- 15 R. A. Baumgartner, R. L. Byer. Optical parametric amplification[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **15**(6): 432~444
- 16 Li Gang . The Transformation and Expansion of Laser Frequencies (Applied Nonlinear Optical Technology)[M]. Beijing: Science Press, 2005  
李 港. 激光频率的变换与扩展(实用非线性光学技术)[M]. 北京: 科学出版社, 2005
- 17 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