

基于 YCOB 晶体分析信号光脉冲时间特性对光参变啁啾脉冲放大光谱和转换效率的影响

王楠楠 孙美智 徐婷婷 康俊 谢兴龙

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 基于 YCOB 晶体中三波耦合方程理论模型,在抽运光波形和能量、晶体长度相同的条件下,研究信号光的时间波形对光参变啁啾脉冲放大(OPCPA)光谱和转换效率的影响。计算过程中,抽运光和信号光能量分别为 45 J 和 500 mJ,光斑直径分别为 60 mm 和 50 mm。抽运光脉宽取 3 ns,信号光脉宽为 1.2 ns。数值结果显示,信号光放大后的光谱和转换效率与输入信号光的时间波形有关。1 阶高斯型脉冲光谱的半峰全宽(FWHM)得以展宽,由原来的 36 nm 展宽为放大后的 61 nm,2 阶超高斯脉冲频谱展宽为 47 nm,高斯脉冲的阶数越高,谱宽展宽越小,5 阶和 5 阶以上的高斯脉冲光谱不再展宽,几乎保持原来 36 nm 不变;1 阶高斯脉冲的转换效率最高,达到 32% 左右,2 阶高斯脉冲只有 25%,8 阶以上转换效率基本变化不大,约为 19%。信号光脉冲时间特性对 OPCPA 的光谱输出和转换效率产生很大的影响。

关键词 非线性光学;光参变啁啾脉冲放大;YCOB 晶体;光谱展宽;转换效率

中图分类号 O437.3;TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201239.0502013

Analysis of Optical Parametric Chirped Pulse Amplification Spectrum and Conversion Efficiency Resulting from Time Characteristics of Signal Pulse Based on YCOB Crystal

Wang Nannan Sun Meizhi Xu Tingting Kang Jun Xie Xinglong

(National Laboratory on High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The impact of time-domain properties about the signal pulse on spectrum and conversion efficiency after optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA) is studied, based on coupled equations in YCOB crystal, when pump energy and pulse shape are certain. The energies of pump and signal pulse are 45 J and 500 mJ, and beam diameters are 60 mm and 50 mm, respectively, during the calculation. Pulse width of pump pulse is 3 ns, while signal's is 1.2 ns. The numerical results show that signal spectrum amplified and conversion efficiency are related to time-domain properties of input signal pulse. The spectral full width at half maximum (FWHM) after OPCPA is broadened from 36 nm to 61 nm when the signal pulse as one order Gaussian pulse, but that of two order Gaussian pulse is just broadened to 47 nm. The order is higher, broadening is less. The FWHM keeps almost unchanged at 36 nm, compared with that before OPCPA when the signal pulse as five even higher order Gaussian function. And when the length of YCOB crystal is constant, conversion efficiency reaches 32% when the signal pulse as one order Gaussian pulse, with that of two order Gaussian pulse is only 25%. That of eight order Gaussian pulse or above changed little, remaining approximately 19%. Temporal characteristics of signal pulse make great influence on the spectrum and conversion efficiency of the amplified pulse when the pump pulse and the length of the crystal are certain.

收稿日期: 2012-01-16; 收到修改稿日期: 2012-02-17

基金项目: 国家 863 计划(2009AA8044010)资助课题。

作者简介: 王楠楠(1986—),女,硕士研究生,主要从事超短脉冲非线性效应和色散等方面的研究。

E-mail: 198609wangnan@163.com

导师简介: 谢兴龙(1968—),男,研究员,主要从事超短脉冲与强激光技术等方面的研究。

E-mail: xiexl329@mail.shnc.ac.cn

Key words nonlinear optics; optical parametric chirped pulse amplification; YCOB crystal; spectrum broadening; conversion efficiency

OCIS codes 190.4975; 190.4410; 140.4480

1 引 言

啁啾脉冲放大(CPA)技术和光参变啁啾脉冲放大(OPCPA)^[1]技术是实现高能超短脉冲激光的两种重要技术。很多高能超短太瓦级和拍瓦级激光是基于 CPA 技术和钛宝石晶体作为放大介质实现的^[2~6],但是,由于大口径钛宝石较强的自发辐射放大(ASE)以及增益窄化效应大大影响了钛宝石作为激光放大介质的增益效率,也就限制了利用 CPA 技术进一步提高高能激光的输出。OPCPA 技术作为另外一种能有效实现高能超短太瓦和拍瓦的技术,也越来越受到人们的关注^[7~10]。OPCPA 和 CPA 技术相比,具有以下优势:较高的单程增益、较宽的增益带宽、较小的 B 积分和较好的热效应。目前,OPCPA 技术应用于高能超短脉冲系统获得了巨大成功。英国 Vulcan 装置通过三级光参变放大(OPA)^[11],在中心波长 1053 nm 波段获得了 35 J/84 fs 的超短脉冲输出^[12];俄罗斯的 PEARL-6 装置基于 KDP 晶体,同样在 OPCPA 系统中采用三级放大,最终在中心波长 910 nm 波段获得了 24 J/43 fs、功率密度 0.56 GW/cm² 的输出^[13];欧洲拟建的 ELI 装置,计划采用 OPCPA 和利用钛宝石功率放大的混合放大系统,在 808 nm 波段,设计获得能量达到 150 J、脉宽约 15 fs 的高功率超短脉冲输出。

非线性晶体是 OPCPA 技术的核心部分。过去的 OPCPA 激光系统中,非线性介质主要是 LBO, BBO, KDP 或 KD*P 这三类晶体。LBO 和 BBO 具有比较高的非线性系数,但由于工艺限制难以获得大口径,一般应用于 OPCPA 系统的前级预放大,获得较高的增益,但难以获得焦耳量级的能量。KDP 或 KD*P 虽然能够长为大口径晶体,但是它的非线性系数比较低,易潮解,必须通过增加晶体长度才能用在高能超强超短激光放大中^[14]。近几年来,一种新型非线性晶体 YCOB^[15~17]引起了人们的关注。YCOB 晶体和其他非线性晶体相比,具有很多优点。它不易潮解,具有较好的热光效应和机械性能。另外, YCOB 晶体还具有非线性系数大(最大非线性系数是 KDP 晶体的 5 倍)、光损伤阈值高、容易获得大口径等优点。目前 YCOB 晶体能够达到 8 cm × 25 cm^[18]。YCOB 晶体在 1053 nm 波段被应用于德州大学拍瓦装置前端,已经获得了 0.75~1 J 的能量

输出^[19]。目前 YCOB 晶体主要应用于倍频系统,如 Mercury 装置中采用 YCOB 晶体倍频获得了单脉冲能量 31.7 J、重复频率 10 Hz 的输出^[20]。但是,在 910 nm 和 808 nm 波段尚无实验报道。

抽运光的时间和空间特性对 OPCPA 的输出有很大的影响。在 OPCPA 中,为了得到较高的转换效率和较宽的输出光谱,一般通过时间和空间整形,将抽运光整形为时间平顶型和空间平顶型^[21]。但是有关信号光波形对输出光谱与转换效率的影响并没有文献报道。根据计算发现,信号光的时间波形特性对 OPCPA 的输出光谱和转换效率也会产生很大的影响。这为 OPCPA 实现高能超短激光输出提供了理论指导和支持。

本文主要基于 YCOB 晶体,在相同的晶体长度和抽运光条件下,研究了中心波长为 808 nm 波段的信号光时间特性对 OPCPA 放大光谱和转换效率的影响。通过输入不同级次的啁啾脉冲信号光,在非共线相位匹配^[22]工作方式下,求解三波耦合方程,模拟计算了经 OPCPA 放大后的输出光谱以及转换效率。

2 YCOB 晶体中的三波耦合

2.1 三波耦合方程

YCOB 晶体中的非线性放大过程可由三波耦合方程来描述^[23]:

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

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

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

(1)~(3)式描述了非线性晶体中信号光、闲频光和抽运光的能量转换过程。式中 c 为真空中光速, d_{eff} 是 YCOB 的有效非线性系数; s, i, p 分别代表信号光、闲频光和抽运光, E, n, α, ω 分别代表三波的电

场、折射率、损耗系数和频率； z 为光场传播方向； γ 为坡印亭矢量走离角； $\Delta k = k_p - k_i - k_s$ 为相位失配因子，当 $\Delta k = 0$ 时，三波相互作用是相位匹配的。本文的设计均严格求解频域内三波耦合方程，无任何近似。在解方程的过程中，输入参数都是比较贴近目前的实验条件，符合实验实际，对 OPCPA 实验具有一定指导作用。

2.2 非共线相位匹配

根据傅里叶变换关系，啁啾脉冲的理论可压缩脉宽取决于其光谱的谱宽，因此，在 OPCPA 实验中，为了得到更短的超短脉宽，希望放大光谱足够宽，同时为了得到更大的能量输出，希望更高的转换效率。

非共线光参变放大 (NOPA) 技术，由 Wilhelm 等^[24] 于 1997 年提出。该技术使抽运光和信号光在晶体中保持一定的夹角，同时在中心波长处仍然能够实现相位完全匹配。相关理论和实验表明，相对于共线相位匹配方式，非共线相位匹配的工作方式不但能提供更大的匹配带宽，而且最优非共线角完全满足抽运光和信号光的群速匹配，保证了两光束充分的时间耦合，提高了转换效率；此外，非共线夹角抵消了非寻常光的走离角，削弱了抽运光波前畸变向信号光波前的传输，从而提高了信号光的光束质量。图 1 是双轴晶体中非共线相位匹配的波矢图。

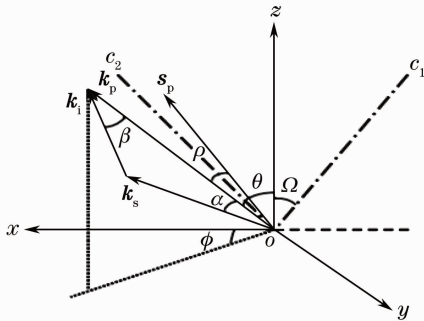


图 1 非共线匹配在双轴晶体中的波矢图
Fig. 1 Non-collinear phase matching vectors in biaxial crystal

3 数值计算结果与分析

很多文献都研究了抽运光时间特性不同对 OPCPA 放大输出脉冲的影响^[25]，但大多数情况都没有提及信号光的波形或没有讨论信号光波形对 OPCPA 输出光谱和转换效率的影响。本文在抽运光能量和波形(平顶型)一定，信号光时间特性不同时，讨论了输出脉冲的光谱以及转换效率。

在非共线相位匹配工作方式下，信号光放大光谱

和转换效率与非共线角以及相位匹配有着严格的关系^[22]，因此选择适当的非共线角和相位匹配角很重要。通过选择合适的相位匹配角，YCOB 晶体能够提供足够大的增益带宽，能够实现中心波长在 808 nm 左右、最大谱宽为 120 nm 的放大。

YCOB 为双轴非线性晶体，选择 xoz 主平面作为非线性过程发生面，因为这一面的有效非线性系数相对来说比较高。根据计算，对于波长为 526.5 nm 的抽运光和中心波长为 808 nm 的信号光，非共线角为 $\alpha = 2.763^\circ$ ，相位匹配角为 $\theta = 26.5^\circ$ ， $\phi = 0^\circ$ ，此时的有效非线性系数为 $d_{\text{eff}} = 0.914 \text{ pm/V}^{[16]}$ 。选用的 YCOB 晶体的尺寸为 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。计算过程中采用的抽运光中心波长为 526.5 nm，能量为 45 J，时间半峰全宽 (FWHM) 为 3 ns，光斑直径为 60 mm，其时间波形为 10 阶超高斯脉冲；信号光中心波长为 808 nm，能量为 500 mJ，时间 FWHM 为 1.2 ns (展宽后)，光谱 FWHM 为 36 nm，光斑直径为 50 mm。为形成对比，取不同阶高斯型信号光脉冲，分别计算放大后光谱和转换效率，如图 2 所示。由图 2 可知，高斯型脉冲级次越高，其波形越接近方波。相同频谱 FWHM 下，一阶高斯型的底座比较宽，这是影响 OPCPA 效率的关键因素。

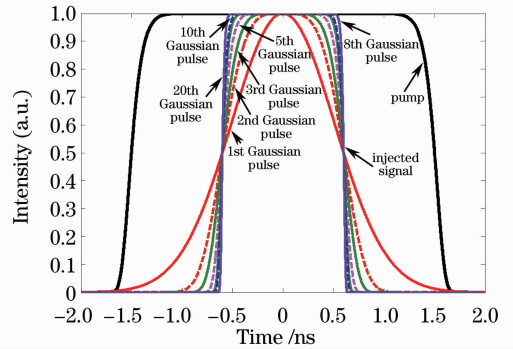


图 2 输入抽运光为 10 阶超高斯脉冲，信号光为不同阶次的高斯脉冲

Fig. 2 Pump pulse input as ten order Gaussian type and signal pulse as different order Gaussian type

3.1 信号光时间特性对放大光谱的影响

在晶体长度相同、抽运光波形和能量相同的条件下，通过对相同时间 FWHM、不同阶次的高斯脉冲输入进行模拟计算发现，阶数越高，谱宽展宽越小。图 3 给出了不同时间特性的信号光放大后光谱的分布。如图所示，在相同的抽运情况下，1 阶高斯型脉冲光谱的 FWHM 在放大后得以展宽，由初始的 36 nm 展宽为放大后的 61 nm，2 阶超高斯脉冲频谱展宽为 47 nm。5 阶和 5 阶以上的高斯脉冲光

谱不再展宽,保持初始的 36 nm 不变。

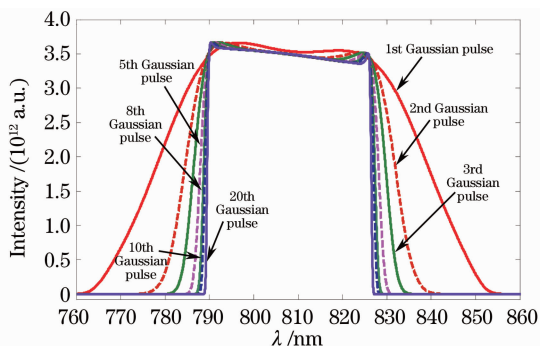


图 3 各阶信号光在相同抽运光下,输出脉冲的光谱

Fig. 3 Spectra of output pulse with the same pump pulse

在接近饱和放大的情况下,当信号光中间相位完全匹配部分放大到一定的程度,相对应局部时间内抽运光会消耗很大,使得高斯光束的两侧放大的速率比中间快,信号光底座抬高,进而使得 FWHM 增加,频谱得到展宽。输出脉冲的频谱越宽,可压缩的脉宽极限就越短,这对提高超短脉冲的峰值功率有重大意义。

3.2 信号光时间特性对转换效率的影响

图 4 给出了当信号光为不同阶次的高斯型波形时,OPCPA 的转换效率和晶体长度的关系。由图可以看出,当信号光时间波形为 1 阶高斯型脉冲时,转换效率最高,可达到 32%;当信号光时间波形为 2 阶高斯型脉冲时,转换效率为 25%左右;随着高斯脉冲阶次的增加,转换效率也降低,当信号光时间波形为 8 阶和 8 阶以上超高阶型脉冲时,转换效率基本不再变化,约为 19%。可以看出,对于不同阶次的信号光输入,高斯脉冲的转换效率约为 5 阶以上超高阶脉冲的 1.7 倍,高效率的转换效率对于 OPCPA 来说至关重要。

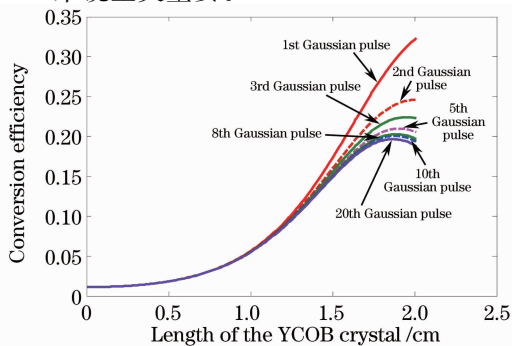


图 4 各阶高斯脉冲在相同抽运光下,转换效率和晶体的长度关系

Fig. 4 Relation between conversion efficiency and the length of crystal, with the same pump pulse

由于 1 阶高斯脉冲底座较宽,使得放大过程中信号光和抽运光更充分地耦合,抽运光中更多的能量转换到信号光中,因此低阶次的高斯脉冲在三波耦合过程中效率更高。

3.3 两级 OPCPA 放大系统的模拟计算

为了更好地说明 1 阶高斯脉冲光的输入导致频谱展宽的情况,对一套完整的 OPCPA 系统进行了模拟。实验光路图包括两级 OPCPA 放大系统。第一级 OPCPA 为预放大系统,包括两个 YCOB 晶体,尺寸分别为 5 mm×5 mm×25 mm 和 5 mm×5 mm×23 mm,抽运光为 150 mJ,光斑直径为 3 mm,脉冲宽度为 3 ns,时间分布为 10 阶超高阶型,信号光为 600 pJ,1 阶高斯分布,频谱 FWHM 为 36 nm;第二级 OPCPA 为功率放大系统,包含一个 YCOB 晶体,尺寸为 60 mm×60 mm×23 mm。抽运光为 60 J,光斑直径为 50 mm,时间分布为 10 阶超高阶脉冲,信号光经过第一级放大后再经过扩束,使光斑大小和抽运光的匹配,如图 5 所示。

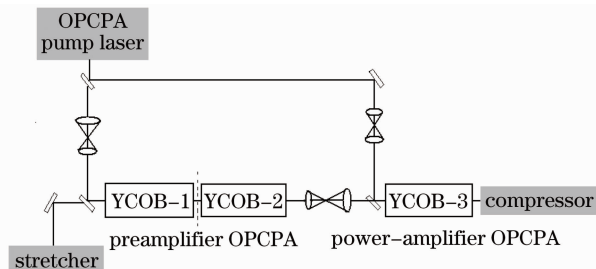


图 5 两级 OPCPA 放大装置简图

Fig. 5 Device of two-stage amplification

由于在第一级 OPCPA 中,晶体的长度非常长,在强的峰值功率抽运下,信号光得到饱和放大,使得增益带宽最大化。在完全相位匹配的中心波段已经出现回流,在频谱图上产生凹陷(如图 6 中绿线所示,彩图请见网络电子版)。这一级 OPCPA 提供了非常大的增益,达到 10^7 的放大倍数。模拟结果显示,谱宽为 36 nm、时间波形为 1 阶高斯型的信号脉冲输入,经过第一级 OPCPA 饱和放大后,谱宽展宽为 70 nm;第二级放大为功率放大,在放大过程中弥补了第一级放大导致的频谱凹陷问题,产生平顶频谱,谱宽为 81 nm,转换效率可达 36%,输出能量为 21.8 J,如图 6 所示。

光谱展宽后,脉宽可以压得更短,可获得更高峰值功率的输出脉冲。对 36 nm 的信号光光谱和 81 nm 的放大光谱所对应的能压缩的最短脉宽进行了计算对比。图 7 给出了放大前后脉冲光谱对应的理论极限脉宽。模拟结果显示,放大后的光谱可压

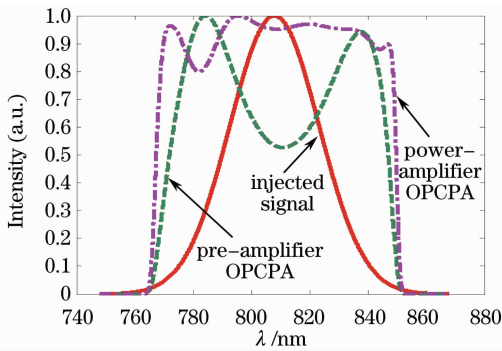


图 6 1 阶高斯型信号光频谱与一级放大、二级放大后输出脉冲的频谱比较

Fig. 6 Comparison between signal spectrum as one order Gaussian type and output pulse spectrum after the first and the second amplification

缩的脉宽更窄,为 25.7 fs;而对应于 36 nm 的种子光光谱,可以压缩到 45.7 fs。在傅里叶变换限下,激光脉冲的脉宽和谱宽的乘积为一常数,激光脉冲光谱宽度的增加,会使得压缩后的超短脉冲脉宽减小,从而提高超短脉冲激光系统的输出功率。

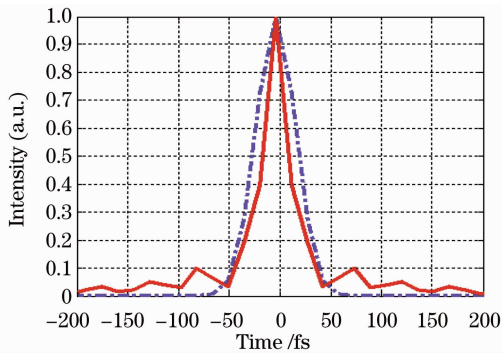


图 7 36 nm 的信号光光谱(紫色虚线)和 81 nm 的放大光谱(红色实线)所对应的能压缩的最短脉宽

Fig. 7 Compressed shortest pulsewidth corresponding to the 36 nm signal spectrum (purple dotted line) and 81 nm amplified spectrum (red continuous line)

4 结 论

基于 YCOB 晶体中非共线相位匹配的工作方式,从三波耦合方程出发,数值模拟计算了信号光时间特性不同对 OPCPA 放大光谱和转换效率的影响。在晶体长度、抽运光的能量和波形相同的情况下,分别计算了信号光脉冲时间波形为不同阶次的高斯脉冲时,放大后光谱和转换效率的变化。计算结果表明,当信号光的时间波形为 1 阶高斯型脉冲时,放大后的光谱得到了由 32 nm 到 67 nm 的展宽,且转换效率达到了 32%;而随着高斯型信号光

时间波形阶次的增加,光谱的放大逐渐趋于无变化,转换效率也基本不变,约 19%。最后,对包含两级 OPA 的 OPCPA 系统进行了模拟计算,结果更好地说明了信号光时间波形对 OPCPA 输出频谱和转换效率的影响。

参 考 文 献

- 1 A. Dubietis, G. Jonusauskas, A. Piskarskas. Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal [J]. *Opt. Commun.*, 1992, **88**(4-6): 437~440
- 2 Lin Lihuang, Xu Zhizhan, Li Ruxin *et al.*. 10 Hz, 23 TW Ti:sapphire laser device [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(z1): 134~136
- 林礼煌, 徐至展, 李儒新 等. 10 Hz, 23 TW 掺钛蓝宝石激光装置 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(z1): 134~136
- 3 B. Stuart, M. Perry, J. Miller *et al.*. 125-TW Ti:sapphire/Nd:glass laser system [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(4): 242~244
- 4 L. J. Waxer, V. Bagnoud, I. A. Begishev *et al.*. High-conversion-efficiency optical parametric chirped-pulse amplification system using spatiotemporally shaped pump pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1245~1247
- 5 Huang Xiaojun, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng *et al.*. 100 TW ultra-short and ultra-intense Ti:sapphire laser device [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11): 1685~1688
- 黄小军, 彭翰生, 魏晓峰 等. 100 TW 级超短超强钛宝石激光装置 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(11): 1685~1688
- 6 Xiaoming Lu, Xiaoyan Liang, Yuxin Leng *et al.*. Improvement of the large aperture Ti:sapphire amplifiers in the petawatt femtosecond laser system at SIOM [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(10): 1008~1009
- 7 Zhizhan Xu, Xiaodong Yang, Yuxin Leng *et al.*. High-power output from a compact OPCPA laser system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(1): 24~27
- 8 V. V. Lozhkarev, G. I. Freidman, V. V. Ginzburg *et al.*. 200 TW 45 fs laser based on optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(1): 446~454
- 9 D. Herrmann, R. Tautz, L. Veisz *et al.*. Generation of sub-three-cycle, 16-TW light pulses through noncollinear OPCPA [C]. *Frontier in Optics*, San Jase, California, 2009, FTuK3
- 10 Zeng Shuguang, Zhang Bin, Li Xianhua *et al.*. A new method using chirp-matching OPCPA scheme for improving signal-to-noise ratio of ultrashort laser pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0719001
- 曾曙光, 张彬, 李现华 等. 提升超短脉冲激光信噪比的啁啾匹配光参变啁啾脉冲放大新方法 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0719001
- 11 Fuling Zhang, Yanhai Wang, Meizhi Sun *et al.*. Numerical simulations of the impact of wavefront phase distortions of pump on the beam quality of OPA [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(2): 217~220
- 12 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
- 13 V. V. Lozhkarev, G. I. Freidman, V. V. Ginzburg *et al.*. Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(6): 421~427
- 14 Liu Jun, Wei Xiaofeng, Huang Xiaojun *et al.*. Study and comparison on properties of optical parametric chirped pulse amplification of BBO, LBO and KDP [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6): 555~558

- 刘 军, 魏晓峰, 黄小军 等. BBO, LBO, KDP 晶体光参量啁啾脉冲放大特性的比较研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(6): 555~558
- 15 M. Iwai, T. Kobayashi, H. Furuya *et al.*. Crystal growth and optical characterization of rare-earth (Re) calcium oxyborate $\text{ReCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ (Re=Y or Gd) as new nonlinear optical material [J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part2 Lett.*, 1997, **36** (11B): 276~279
- 16 Meizhi Sun, Lailin Ji, Qunyu Bi *et al.*. Analysis of ultra-broadband high-energy optical parametric chirped-pulse amplifier based on YCOB crystal[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9** (10): 101901
- 17 Wang Xiangfeng, Dai Yaping, Wang Tao *et al.*. Optimization design of 1 J-level optical parametric chirped-pulse amplification system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702009
王翔峰, 戴亚平, 王 韬 等. 焦耳级光参量啁啾脉冲放大系统的优化设计[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0702009
- 18 Z. M. Liao, I. Jovanovic, C. A. Ebbers *et al.*. Energy and average power scalable optical parametric chirped-pulse amplification in yttrium calcium oxyborate[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1277~1279
- 19 E. W. Gaul, M. Martinez, J. Blakeney *et al.*. Demonstration of a 1.1 petawatt laser based on a hybrid optical parametric chirped pulse amplification/mixed Nd:glass amplifier[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(9): 1676~1681
- 20 C. A. Ebbers, A. J. Bayramian, R. W. Campbell *et al.*. High average power frequency conversion with large aperture YCOB [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, Nara Japan, 2008, WD3
- 21 L. J. Waxer, V. Bagnoud, I. A. Begishev *et al.*. High-conversion-efficiency optical parametric chirped-pulse amplification system using spatiotemporally shaped pump pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1245~1247
- 22 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
- 23 Fan Qikang, Wu Cunkai, Mao Shaoqing. *Nonlinear Optics*[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing Company, 1989
范琦康, 吴存恺, 毛少卿. 非线性光学[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989
- 24 T. Wilhelm, J. Piel, E. Riedle *et al.*. Sub-20-fs pulses tunable across the visible from a blue-pumped single-pass noncollinear parametric converter[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(19): 1494~1496
- 25 Ma Zairu, Feng Guoying, Chen Jianguo *et al.*. Effect on contrast of femtosecond laser by pump pulse width and type[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(4): 571~576
马再如, 冯国英, 陈建国 等. 泵浦光波形和脉宽对飞秒激光对比度的影响[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(4): 571~576

栏目编辑: 李文喆