

接近单周期量级的两级非共线光参量放大

王艳海

河北科技大学理学院, 河北 石家庄 050018

摘要 提出了一种新的两级非共线相位匹配光参量放大方案, 两级光参量放大分别采用不同的相位匹配条件, 充分利用非线性晶体的相位匹配能力和增益光谱范围, 可以实现增益带宽接近一个倍频程的光参量放大。并以 4.5 mm 厚的偏硼酸钡(BBO)晶体和波长为 532 nm、强度为 5 GW/cm² 的抽运光源为例进行了模拟计算, 结果表明, 该方案可以实现波长范围在 710~1190 nm、增益带宽为 480 nm 的信号光放大, 信号光光谱宽度达到 0.75 个倍频程, 再压缩后傅里叶限脉冲的时间宽度约为 5 fs, 约等于 1.6 倍的光振荡周期。计算了光参量放大过程中的相位畸变, 以及该相位畸变对再压缩后信号光脉冲时间波形的影响。研究结果可以为实现周期量级光参量放大的设计提供理论依据。

关键词 超快激光; 周期量级光参量放大; 增益带宽; 相位匹配

中图分类号 O437.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0819002

Two-Stage Noncollinear Optical Parametric Amplification Approaching Single Cycle

Wang Yanhai

School of Science, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China

Abstract A new two-stage noncollinear phase-matching optical parametric amplification (OPA) scheme, which can make full use of the phase-matching capability and the spectral gain range of specific nonlinear crystal to amplify neighboring spectral components of the seed by using individual phase-matching geometry in two-stage OPAs, is proposed to achieve a gain bandwidth close to one octave bandwidth. Numerical simulations are performed, in the case of a 4.5 mm-thick β -BaB₂O₄ (BBO) crystal and a laser pump source with wavelength of 532 nm and intensity of 5 GW/cm². The results show that this scheme allows for an amplification of 480 nm spectral width spanning from 710 nm to 1190 nm corresponding to 0.75 octave bandwidth with a Fourier limited pulse duration of 5 fs, which equals to 1.6 times of the period of light oscillation. The phase distortions from parametric gain process and its impact on the temporal profile of the recompressed signal pulse are calculated. Results presented are capable of providing a theoretical basis for the design of optical parametric amplification system allowing for the generation of single-cycle pulse.

Key words ultrafast laser; few-cycle optical parametric amplification; gain bandwidth; phase matching

OCIS codes 190.4223; 190.4410; 190.4975; 190.7110; 320.7090

1 引 言

数个周期量级的超短超强激光脉冲技术开创了诸多新的强场物理研究领域, 推动了相关学科的交叉融合, 在激光粒子加速、阿秒物理、强辐射源等领域有着广泛应用^[1]。光学超快变化的光电场可以对原子层级电子进行操控和追踪, 实现极紫外、单阿秒脉冲的可控产生与测量, 以及原子层级电子动力学的实时观测等^[2]。这些实验的开展依赖于产生相位可控的、超高强度、高对比度和数个周期量级的激光系统的成功研制, 进一步的实验需要激光脉冲的时间宽度接近或达到周期量级, 因此, 能够产生和放大周期量级脉冲的激光系统成为超短超强激光技术领域研究的热点问题。周期量级激光脉冲的产生一般采用超连续谱产生技术, 其放大需要极大

收稿日期: 15-02-04; 收到修改稿日期: 2015-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(11247011)、河北科技大学博士科研启动基金

作者简介: 王艳海(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事超快非线性光学方面的研究。E-mail: wangyanhai@hotmail.com

的增益带宽,目前只能采用光参量放大(OPA)^[3-5]。周期量级非共线光参量放大系统(NOPA)的成功运行,需要解决以下技术难题:在很宽的光谱带宽内实现脉冲展宽和压缩时的精确相位控制,优化相位匹配条件,高质量的皮秒级抽运激光光源^[6-7]。正是存在上述困难,近红外波段数个周期、太瓦量级的激光脉冲最近才得到验证^[3,8]。OPA系统可采用双光束或多光束抽运,与单光束抽运相比,双光束或多光束抽运可以通过各自的相位匹配几何结构来放大种子光相邻的光谱范围,从而可以实现更宽信号光光谱的放大,有多个研究组已经展开了相关理论和实验研究,文献[9-10]从实验上证实了多光束抽运OPA的合并效应,放大后信号光的转换效率和时间特性不受抽运光束数的影响;文献[11-13]从实验上证实了在 ϕ 平面内采用非共线双光束抽运可以显著增加OPA的增益带宽;文献[14]从理论上提出了一种双抽运光共线相位匹配但啁啾相反的OPA方案。

但是单色场双光束抽运对OPA增益带宽的增加,受制于相位匹配的限制,不能充分利用参量晶体的光谱增益范围。通过理论和数值模拟研究发现,采用波长为532 nm、厚度均为4.5 mm BBO晶体的两级非共线相位匹配OPA,分别采用不同的相位匹配角和非共线角,能够实现中心波长为960 nm、半峰全宽约为480 nm的信号光放大,信号光的光谱宽度达到0.75个倍频程,再压缩后信号光的时间宽度接近周期量级,约为1.6倍的光振荡周期。

2 两级光参量放大原理分析

根据文献[15]的研究结果,采用如图1所示的非共线相位匹配结构,OPA对抽运光有着极大的接收角,图中虚线为晶体光轴方向, \mathbf{k} 为波矢量,其下标p,s和i分别代表抽运光、信号光和闲置光。 θ 为相位匹配角, α 为非共线角。 α 不等于零时为非共线相位匹配模式,当 $\alpha=0$ 时,非共线结构就转化为共线相位匹配模式^[16-20]。

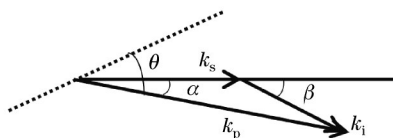


图1 单轴晶体中参量放大允许较大抽运光发散角的非共线相位匹配结构

Fig.1 Noncollinear phase matching configuration allowing for a larger pump divergence angle in OPA process with uniaxial crystal

为了获取较高的参量转换效率,OPA过程必须满足能量守恒和波矢量的相位匹配,即

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (1)$$

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i, \quad (2)$$

式中 ω 为角频率。OPA的增益和转换效率取决于相位失配量

$$\Delta\varphi = \Delta\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = (\mathbf{k}_p - \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i) \cdot \mathbf{r}, \quad (3)$$

当达到完全相位匹配($\Delta\mathbf{k}=0$)时,OPA转换效率最高,这可以通过改变抽运光(e光)与光轴的夹角 θ (相位匹配角)和非共线角 α 实现。但这只是针对信号光特定波长的,对应的波长称为相位匹配波长,信号光其他波长处 $\Delta\mathbf{k} \neq 0$,但是可以通过优化相位匹配结构,使得在匹配波长两侧有限光谱范围内 $\Delta\mathbf{k}$ 仍然较小,这些波长仍然能够获得较高的增益。非共线OPA中导致增益减小的是 $\Delta\mathbf{k}$ 在信号光方向的分量,给定相位匹配参数,可以计算出这一分量为

$$\Delta\mathbf{k} = k_p \cos \alpha - k_s - k_i \cos \beta. \quad (4)$$

用来计算增益带宽的小信号增益公式为^[18]

$$G_s = \left[1 + \frac{\Gamma^2}{g^2} \sinh^2(gL) \right], \quad (5)$$

式中 L 为晶体长度, Γ^2 和 g 分别为

$$\Gamma^2 = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 I_p}{n_i n_s n_p \lambda_i \lambda_s \varepsilon_0 c_0}, \quad g = \sqrt{\Gamma^2 - \left(\frac{\Delta\mathbf{k}}{2} \right)^2}, \quad (6)$$

式中 ε_0, c_0 分别为真空电容率和真空中的光速, d_{eff} 为晶体的有效非线性系数, I_p 为抽运光强度, n_i, n_s, n_p 分别为闲置光、信号光和抽运光在晶体中的折射率, λ_i, λ_s 分别为闲置光和信号光匹配波长。在小信号增益和输入信号光强度远小于抽运光强度的条件下,输出信号光的相位为^[13,21]

$$\phi_s = \phi_s(0) - \frac{\Delta k L}{2} + \arctan\left\{\frac{\Delta k}{2g} \times \tanh(gL)\right\}. \quad (7)$$

根据文献[15–17]中的 OPA 非共线相位匹配和增益带宽的理论模型和计算方法,可以得出满足 OPA 极大增益带宽和极大晶体接收角的相位匹配方案。再由(4)~(5)式计算出不同相位匹配结构下的光谱增益范围,合理选择双级光参量放大中的相位匹配参数,使得两级参量作用分别放大信号光的不同光谱成分,得到最大的增益带宽。利用(7)式计算两级光参量作用中信号光的相位畸变。

3 超宽带两级光参量放大方案

以 BBO 晶体 I 类相位匹配为例,根据文献[15]的方法计算相位匹配结构和参数,分别确定两级光参量放大的相位匹配参数,实现最大的增益带宽。计算中两级参量放大 BBO 晶体长度均取为 4.5 mm,抽运光波长为 532 nm,强度为 5 GW/cm²左右。

3.1 BBO 晶体光参量放大相位匹配参数计算

在上述晶体参数和抽运光波长给定的条件下,光参量放大信号增益和相位匹配波长随匹配角的关系如图 2 所示,其中图 2(a)为近共线相位匹配,图 2(b)为非共线相位匹配。合理选取相位匹配角和非共线角,兼顾增益和带宽,可以获得 3 种取得极大带宽的相位匹配工作条件,对应相位匹配角和增益见图 2(a)和(b)中虚线,相位匹配参数如表 1 所示,对应增益光谱分布见图 3。从图 3 中可以看出采用三种不同相位匹配结构的 OPA 增益谱相互重叠,利用这一规律可以采用两级或三级 OPA 来分别放大信号光的不同光谱成分,以便获取更大的 OPA 增益带宽,也可以如文献[11,13]中采用的单级双光束抽运 OPA 增加信号光带宽。但是,根据 BBO 晶体的色散特性,很难在其较大的光谱增益范围内,同时实现双光束抽运的相位匹配,增加的信号光带宽也极为有限。而采用多级 OPA 则不受这一限制,各级 OPA 可以采用不同的相位匹配条件,充分利用晶体的光谱增益范围来增加信号光带宽。

采用如图 1 所示的非共线相位匹配结构,第一级 OPA 采用 NOPA-I 近共线相位匹配,非共线角为 $\alpha_1 = 0.579^\circ$ (为了使得抽运光 I 与信号光分开), $\theta = \theta_{pm1} = 22.79^\circ$ 。第二级 OPA 采用 NOPA-II 相位匹配,使得 k_p 和 k_s 的夹角 $\alpha_2 = 2.33^\circ$, $\theta = \theta_{pm2} = 23.80^\circ$ 。这样就可以充分利用 BBO 晶体的光谱增益范围,获取最大的增益带宽,见图 3。合理选择抽运光强度,使 $I_{p1} = 4.8 \text{ GW/cm}^2$, $I_{p2} = 5.3 \text{ GW/cm}^2$,使得双光束抽运放大的信号光的光谱更加平坦,如图 4 所示,两级 OPA 放大的信号光带宽可以达到 $\Delta\lambda_{FWHM} = 480 \text{ nm}$,见图 4 中的点划线。两级 OPA 方案的信号光增益带宽比文献[13]中单级双光束抽运 OPA 方案的要大 150 nm 左右。根据信号光增益带宽的倍频程数计算公式 $N = \text{lb}(\lambda_{\max}/\lambda_{\min})^{[22]}$,其中 $\lambda_{\max} = \lambda_0 + \Delta\lambda_{FWHM}/2$, $\lambda_{\min} = \lambda_0 - \Delta\lambda_{FWHM}/2$,则放大后信号光带宽的倍频程数为 $N = \text{lb}(1190/710) \approx 0.75$,接近一个倍频程。

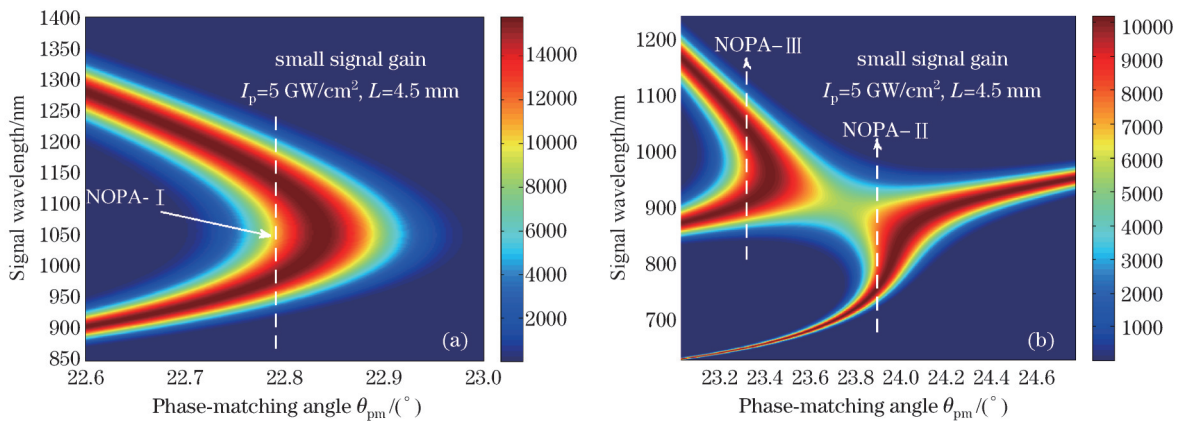


图 2 信号光的光谱增益随抽运光相位匹配角偏移的变化。(a)近共线相位匹配;(b)非共线相位匹配
Fig.2 Gain spectrum of signal as a function of deviation of pump phase-matching angle. (a) Nearly collinear phase matching; (b) noncollinear phase matching

表 1 BBO 晶体的 I 类相位匹配的参量放大特性

Table 1 Characteristics of type-I parametric amplification processes in a BBO crystal

Parametric process	λ_p /nm	λ_s /nm	λ_i /nm	θ /($^\circ$)	α /($^\circ$)	β /($^\circ$)	d_{eff} (pm/V)	$\Delta\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Gain}}$ /nm
NOPA-I	532	1056	1072	22.79	0.579	1.17	0.228	240
NOPA-II	532	829	1485	23.83	2.36	6.72	0.228	250
NOPA-III	532	950	1209	23.35	1.90	4.32	0.228	210

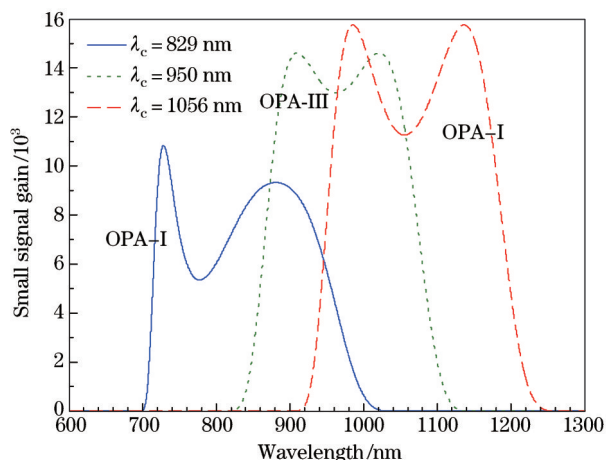


图 3 BBO 晶体中 I 类相位匹配参量放大的增益光谱

Fig.3 Gain spectrum of type-I BBO OPA

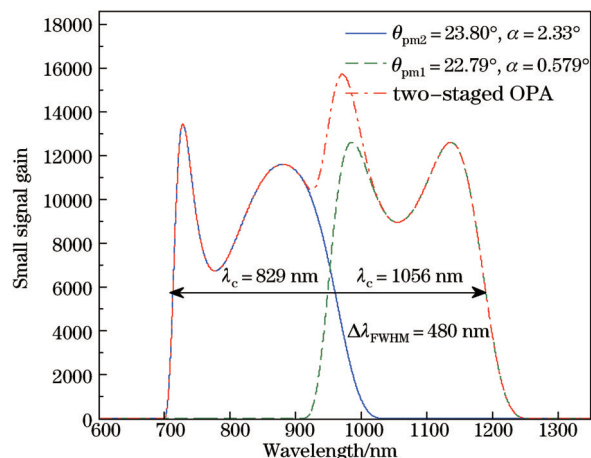


图 4 两级非共线光参量放大信号光光谱增益

Fig.4 Signal gain spectrum for two-stage noncollinear OPA

3.2 两级 OPA 的信号光的相位畸变和再压缩问题

光参量放大过程由于相位失配导致的信号光相位畸变[包括相位失配和参量放大导致的相位畸变,根据(7)式计算],如图5所示,其中实线对应只有NOPA-I放大时的相位畸变,短划线对应只有NOPA-II放大时的相位畸变。点线为两级OPA在小信号增益下导致的总相位畸变。再压缩后傅里叶变换限脉冲如图6中实线所示,脉冲时间宽度约为5 fs,脉冲时间宽度内的周期循环数目可由公式 $M = t_{\text{FWHM}}/T$ 计算,其中 $T = \lambda_c/c = 3.2 \text{ fs}$ 为信号光载波振荡周期,则 $M \approx 1.6$ 。考虑到相位畸变后,脉冲的时域波形为图6中的短划线所示,再压缩后脉冲波形较为复杂,主脉冲时间宽度约为5.2 fs。在实际的光参量放大系统中,信号光的相位管理和补偿非常重要^[12],包括种子激光产生过程(通常采用超连续谱产生技术)、光参量放大过程(包括相位失配、晶体中的传输色散、自相位调制)等产生的相位畸变,因此,对信号光相位的精确计算、测量和补偿至关重要,这关系到是否能把放大后的信号光再压缩回傅里叶变换限脉冲。

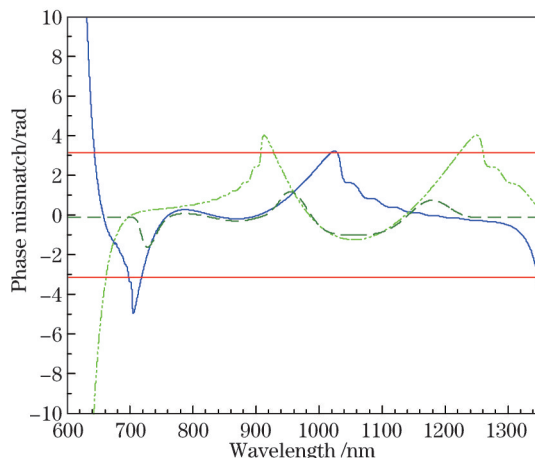


图 5 两级参量放大中信号光的相位

Fig.5 Signal phase distortion of two-stage OPA

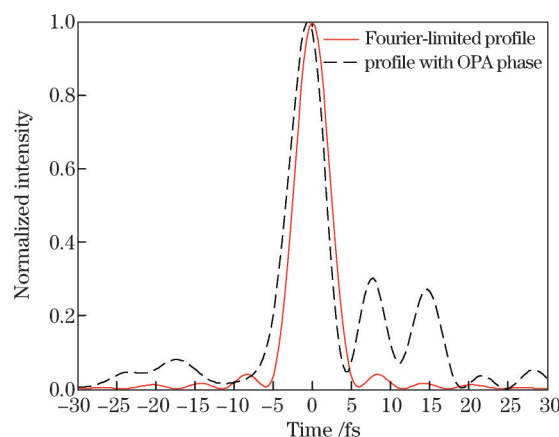


图6 再压缩信号光时域波形,实线对应傅里叶变换限脉冲,虚线对应存在相位畸变时的脉冲

Fig.6 Temporal profile of recompressed signal pulse, solid line corresponding to Fourier-transform-limited pulse, dotted line corresponding to pulse with distorted phase

4 结 论

讨论了采用两级非共线 OPA 实现准周期量级光参量放大的技术方案,利用该方案,采用波长为 532 nm、强度为 5 GW/cm^2 的抽运光,两级 BBO 晶体长度均为 4.5 mm,可以实现增益不小于 10^4 、带宽约为 480 nm、中心波长为 960 nm 的信号光输出,信号光增益带宽约为 0.75 倍的倍频程,再压缩后信号光脉冲的傅里叶变换限脉宽为 5 fs,包含 1.6 个光振荡周期。本文提出的两级 OPA 实现不同的相位匹配结构参数,充分利用了 BBO 晶体的较大的相位匹配范围,而且可以调整两级 OPA 的抽运光强度,调整信号光不同波长范围的增益,确保实现较大的带宽,增加了系统的灵活性。采用本文提出的两级或多级 OPA 方案,提高抽运光强度,减小晶体厚度,可以进一步增加 OPA 增益带宽,达到一个倍频程的激光脉冲放大。另外,结合频域光参量放大技术^[23]和脉冲合成技术^[24],该方案放大的信号光脉冲的光谱和闲置光的光谱可以连接成有望超过一个倍频程带宽的激光脉冲,实现周期量级较大能量的激光脉冲输出,为超强强场激光物理研究提供更加优越的激光脉冲光源。

参 考 文 献

- 1 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(6): 721-729.
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 721-729.
- 2 F Krausz, M Ivanov. Attosecond physics[J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(1): 163.
- 3 J Rothhardt, S Demmler, S Hädrich, *et al.*. Octave-spanning OPCPA system delivering CEP-stable few-cycle pulses and 22 W of average power at 1 MHz repetition rate[J]. Opt Express, 2012, 20(10): 10870-10878.
- 4 J Darginavičius, D Majus, V Jukna, *et al.*. Ultrabroadband supercontinuum and third-harmonic generation in bulk solids with two optical-cycle carrier-envelope phase-stable pulses at $2 \mu\text{m}$ [J]. Opt Express, 2013, 21(21): 25210-25220.
- 5 A Harth, M Schultze, T Lang, *et al.*. Two-color pumped OPCPA system emitting spectra spanning 1.5 octaves from VIS to NIR[J]. Opt Express, 2012, 20(3): 3076-3081.
- 6 Peng Yujie, Pan Xue, Wang Jiangfeng, *et al.*. Research of high stability high performance picosecond pump laser for optical parametric amplification[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802009.
彭宇杰, 潘雪, 王江峰, 等. 高稳定高性能皮秒光参量放大器抽运源研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 802009.
- 7 Li Xiang, Wang Jiangfeng, Li Xuechun, *et al.*. Laser diode pumped cryogenic cooled Yb: YAG regenerative amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102010.
李响, 王江峰, 李学春, 等. 激光二极管抽运低温 Yb:YAG 再生放大器[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102010.
- 8 D Herrmann, L Veisz, R Tautz, *et al.*. Generation of sub-three-cycle, 16 TW light pulses by using noncollinear optical parametric chirped-pulse amplification[J]. Opt Lett, 2009, 34(16): 2459-2461.
- 9 A Dubietis, R Danielius, G Tamošauskas, *et al.*. Combining effect in a multiple-beam-pumped optical parametric amplifier[J]. JOSA B, 1998, 15(3): 1135-1139.

- 10 Y Li, Y Huang, J Wang, *et al.*. Two-beam pumped infrared femtosecond nondegenerate optical parametric amplifier[J]. *Opt Commun*, 2013, 289: 131–135.
- 11 E Žeromskis, A Dubietis, G Tamošauskas, *et al.*. Gain bandwidth broadening of the continuum-seeded optical parametric amplifier by use of two pump beams[J]. *Opt commun*, 2002, 203(3): 435–440.
- 12 D Herrmann, C Homann, R Tautz, *et al.*. Approaching the full octave: noncollinear optical parametric chirped pulse amplification with two-color pumping[J]. *Opt Express*, 2010, 18(18): 18752–18762.
- 13 D Herrmann, R Tautz, F Tavella, *et al.*. Investigation of two-beam-pumped noncollinear optical parametric chirped-pulse amplification for the generation of few-cycle light pulses[J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 4170–4183.
- 14 Z Hong, Q Zhang, P Lan, *et al.*. Generation of few-cycle infrared pulses from a degenerate dual-pump OPCPA[J]. *Opt Express*, 2014, 22(5): 5544–5557.
- 15 Wang Yanhai, Zhang Fuling, Liu Guocai, *et al.*. Analysis and optimization of phase-matching configuration in ultrabroad band optical parametric amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0802010.
王艳海, 张福领, 刘国才, 等. 超宽带光参量放大器中相位匹配结构的分析和优化[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 802010.
- 16 D N Schimpf, J Rothhardt, J Limpert, *et al.*. Theoretical analysis of the gain bandwidth for noncollinear parametric amplification of ultrafast pulses[J]. *Journal of the Optical Society of America B—Optical Physics*, 2007, 24(11): 2837–2846.
- 17 R Dabu. Very broad gain bandwidth parametric amplification in nonlinear crystals at critical wavelength degeneracy[J]. *Opt Express*, 2010, 18(11): 11689–11699.
- 18 G Cerullo, S De Silvestri. Ultrafast optical parametric amplifiers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(1): 1–18.
- 19 S Witte, K S Eikema. Ultrafast optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *IEEE*, 2012, 18(1): 296–307.
- 20 Liu Tao, Jia Huibin, Xiang Hongyin, *et al.*. Bandwidth investigation of optical parametric amplifier in different noncollinear geometries[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0502011.
刘 涛, 贾惠彬, 项洪印, 等. 基于不同非共线结构的光参量放大器的带宽特性研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 502011.
- 21 I N Ross, P Matousek, G H C New, *et al.*. Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Journal of the Optical Society of America B—Optical Physics*, 2002, 19(12): 2945–2956.
- 22 A P Piskarskas, A P Stabinis, V Pyragaitė. Ultrabroad bandwidth of optical parametric amplifiers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, 46(7): 1031–1038.
- 23 B E Schmidt, N Thiré, M Boivin. *et al.*. Frequency domain optical parametric amplification[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3643.
- 24 M T Hassan, A Wirth, I Grguras, *et al.*. Invited Article: Attosecond photonics: Synthesis and control of light transients[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(11): 111301.

栏目编辑: 宋梅梅