

不同抽运波形条件下参量荧光对信噪比的影响

王波鹏^{1,2,3} 栗敬钦^{1,3} 曾小明^{1,3} 周凯南^{1,3} 王晓东^{1,3} 左言磊^{1,3}

王 遣^{1,3} 郭 仪^{1,3} 朱启华^{1,3} 景 峰^{1,3}

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

²中国科学技术大学光学与光学工程系, 安徽 合肥 230026

³中国工程物理研究院等离子体重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 光参量啁啾脉冲放大器(OPCPA)是现阶段最常用的超短超强脉冲放大器之一。参量荧光是 OPCPA 的本征量子噪声,其形成的脉冲底座会大大降低输出信号脉冲的信噪比。采用数值模拟的方法,研究了不同脉宽比和抽运波形条件下参量荧光的演化规律及其对信噪比的影响。计算结果表明,在增益一定的情况下,随着脉宽比的增大,信噪比与效率-带宽积都呈先增大后减小的趋势。存在一个最佳脉宽比,使得两者同时达到最大。脉宽比小于此最佳值时,随着超高斯抽运光波形阶数的增大,信噪比减小而效率-带宽积增大;脉宽比大于此最佳值时,随着超高斯抽运光波形阶数的增大,信噪比增大而效率-带宽积减小。

关键词 激光光学; 荧光; 光参量振荡器与放大器; 超快非线性光学; 脉冲

中图分类号 O437 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0614005

Impact of Optical Parametric Fluorescence on Temporal Contrast for Various Pump Profiles

Wang Bopeng^{1,2,3} Su Jingqin^{1,3} Zeng Xiaoming^{1,3} Zhou Kainan^{1,3} Wang Xiaodong^{1,3}

Zuo Yanlei^{1,3} Wang Xiao^{1,3} Guo Yi^{1,3} Zhu Qihua^{1,3} Jing Feng^{1,3}

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

³Key Laboratory of Science and Technology on Plasma Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The optical parametric chirped-pulse amplifier (OPCPA) is one of the widely utilized amplifiers to boost ultra-short and ultra-intense pulses. The optical parametric fluorescence is the intrinsic quantum noise of OPCPA and the formed pedestal can degrade the temporal contrast of the output signal pulses greatly. Numerical simulation is adopted to study the evolution of the parametric fluorescence and its impact on the temporal contrast under various signal-to-pump duration ratios and various pump profiles. The results indicate that when the gain is fixed, the temporal contrast and the product of conversion efficiency and bandwidth increase firstly and then decrease with the increasing duration ratio. There is an optimal ratio to maximize the temporal contrast and the product simultaneously. When the ratio is lower than the optimal value, the temporal contrast decreases and the product increases with the increasing order of super-Gaussian pump profiles. The temporal contrast increases and the product decreases with the increasing order when the duration ratio is higher than the optimum.

Key words laser optics; fluorescence; optical parametric oscillators and amplifiers; ultrafast nonlinear optics; pulses

OCIS codes 140.3280; 260.2510; 190.4970; 320.7110; 320.5550

收稿日期: 2016-01-11; 收到修改稿日期: 2016-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(61505188)、中国工程物理研究院发展基金(2012A0401019)

作者简介: 王波鹏(1988—),男,博士研究生,主要从事超强超短脉冲等方面的研究。E-mail: wbp@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 景 峰(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事高能激光、超短超强脉冲等方面的研究。

E-mail: jingfeng09@sina.cn(通信联系人)

1 引 言

超强超短脉冲是探索极端条件下物质相互作用的重要工具之一。拍瓦(PW)级超强超短脉冲装置已经建成或正在建设中^[1-8]。这些装置都不同程度地采用了光参量啁啾脉冲放大器(OPCPA)^[9-13],原因在于该类放大器具有高增益、高信噪比、宽带宽、无热加载效应等优点。与 Ti:蓝宝石、Nd:玻璃等增益介质类似,OPCPA 也具有本征的量子噪声——参量荧光^[14]。研究表明,参量荧光起源于真空零点能的量子振荡,在光参量放大器中被高增益的抽运光放大,与主激光一起放大传输,最终在压缩器中形成不可压缩的脉冲底座,降低信噪比,在主脉冲与物质作用前改变物质的物理、化学性质,导致实验失败^[14]。

针对 OPCPA 信噪比的研究包括抽运光自发辐射放大引入的非相干脉冲底座^[15-16]、表面反射引入的预脉冲^[17]以及参量荧光底座^[18-24]等。在参量荧光底座的研究方面,有学者给出了小信号增益情况下的能量、脉宽表达式^[18-20],光谱分布^[21],数值模拟方法^[22-23],能量比与脉宽比的关系^[24],以及一些抑制荧光的方法^[25]。对于 OPCPA 而言,抽运光的时间波形包括高斯型与超高斯型。相对于高斯波形的抽运光,超高斯波形的抽运光更接近平顶脉冲的时间分布,能够在脉宽时间窗口内提供更为均匀的增益,从而得到更宽的增益带宽。因此,对于高能 OPCPA,抽运光多采用超高斯型时间波形。研究不同抽运波形条件下参量荧光对信噪比、效率-带宽积的影响,有助于深化对参量荧光的理解,从而采用合适的抽运波形使得 OPCPA 输出脉冲的信噪比更高。

本文基于截断 Wigner 分布以及三波耦合方程,采用数值模拟的方法,研究了不同抽运波形条件下参量荧光对信噪比以及效率-带宽积的影响。采用文献[22]中的数值方法,利用呈高斯分布的随机数作为参量荧光的输出,结合三波耦合方程,计算得到参量荧光与信号光脉冲的演化规律,分析了不同抽运波形和脉宽比条件下荧光对信噪比以及效率-带宽积的影响。

2 数值模拟

利用截断 Wigner 分布与三波耦合方程^[23],采用随机数模拟的方法,计算不同抽运波形条件下单级 OPCPA 输出的参量荧光底座、效率-带宽积,给出相应的演化规律。分别计算了抽运光超高斯波形阶数为 1、2、5 阶,OPCPA 增益分别为 10^3 、 10^5 、 10^7 和不同脉宽比条件下,OPCPA 输出的参量荧光与信号光。只研究参量荧光对输出信号光脉冲信噪比的影响,后文所提及的信噪比只考虑参量荧光带来的影响。计算参数基于激光聚变研究中心 PW-OPCPA 前端高增益皮秒 OPCPA。抽运光带宽为 2 nm,中心波长为 527 nm,脉宽为 10 ps。信号光种子脉冲能量为 1 nJ,中心波长为 800 nm,带宽为 80 nm,波形为高斯型。非线性晶体为偏硼酸钡(BBO)晶体,采用第 I 类非共线相位匹配,相位匹配角为 24.05° ,非共线角为 2.45° 。初始随机数均值为零,方差正比于参量荧光有效初始强度^[18-19]。为保证计算精度及效率,随机数个数与文献[23]相同,为 50 个。采用分步傅里叶方法进行数值模拟,色散阶数计算到 4 阶,且采用傅里叶变换计算色散,对于非线性作用,采用 4 阶龙格-库塔方法计算。相互作用方程为

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \sum_{j=1}^4 \beta_j^s \frac{\partial^j A_s}{\partial t^j} = -id_{\text{eff}} \frac{8\pi\omega_s^2}{k_s c^2} A_p A_i^* \exp(-\Delta kz), \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_i}{\partial z} + \sum_{j=1}^4 \beta_j^i \frac{\partial^j A_i}{\partial t^j} = -id_{\text{eff}} \frac{8\pi\omega_i^2}{k_i c^2} A_p A_s^* \exp(-\Delta kz), \quad (2)$$

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \sum_{j=1}^4 \beta_j^p \frac{\partial^j A_p}{\partial t^j} = -id_{\text{eff}} \frac{8\pi\omega_p^2}{k_p c^2} A_s A_i \exp(\Delta kz), \quad (3)$$

式中 A_s, A_i, A_p 分别为信号光、闲频光和抽运光的振幅, $\beta_j^s, \beta_j^i, \beta_j^p$ 分别为信号光、闲频光和抽运光第 j 阶的色散常数, $\omega_s, \omega_i, \omega_p$ 分别为信号光、闲频光和抽运光的中心角频率, k_s, k_i, k_p 分别为信号光、闲频光和抽运光的中心波数, d_{eff} 为有效非线性常数, Δk 为波矢失配量, z 为相互作用距离, c 为真空光速。

3 结果与分析

3.1 不同脉宽比条件下主激光与参量荧光演化规律

利用上述模拟程序,得到了不同脉宽比(β)条件下主激光与参量荧光的演化规律。不失一般性,详细分析了初始能量比为 10^5 、抽运波形为高斯型的情况下,主激光与荧光的演化规律,结果如图 1 所示。

在一定的脉宽比条件下,随着放大过程的进行,压缩后的主激光光强先增大后减小,信噪比出现先急速减小、之后增大、再减小的规律。以图 1(c)为例,在相互作用的初始阶段($z < 0.2$ cm),主激光的增益函数为 \cosh^2 ,其新增加的能量相对于初始主激光能量较小,但荧光的增益函数为 \sinh^2 ,是一个从无到有的过程^[18-19,23],新增加的量与荧光初始能量(初始能量为零^[18,23])之比为无穷大,故在此阶段,荧光从无到有,而主激光能量增长较小,信噪比急速下降。在此之后(0.2 cm $< z < 1$ cm),放大过程进入小信号增益阶段。由于增益变大, \sinh^2 与 \cosh^2 近似为指数函数,在此过程中信噪比基本保持不变,且由于 \cosh^2 略大于 \sinh^2 ,故此时期出现信噪比略微增大的现象。随着放大过程的继续进行,饱和放大过程出现,在此阶段(1 cm $< z < 1.5$ cm),主激光的效率-带宽积达到最大,输出光强最大,同时信噪比也出现极大值,其原因在于此过程中荧光能量增长出现停滞,但饱和过程使得主激光达到最大的效率-带宽积,信噪比达到极值。在此之后(1.5 cm $< z < 2$ cm),能量大幅度回流,导致主激光能量快速下降,同时抽运光重新获得能量,使荧光增益变大,最终导致荧光能量出现指数增长,信噪比下降。

随着脉宽比的增大,主激光输出光强呈先增大后减小的规律,且其对应的信噪比亦呈先增大后减小的规律。脉宽比较小时[图 1(a)],主激光与抽运光时域重合面积很小,大部分抽运光并没有被主激光利用,因此

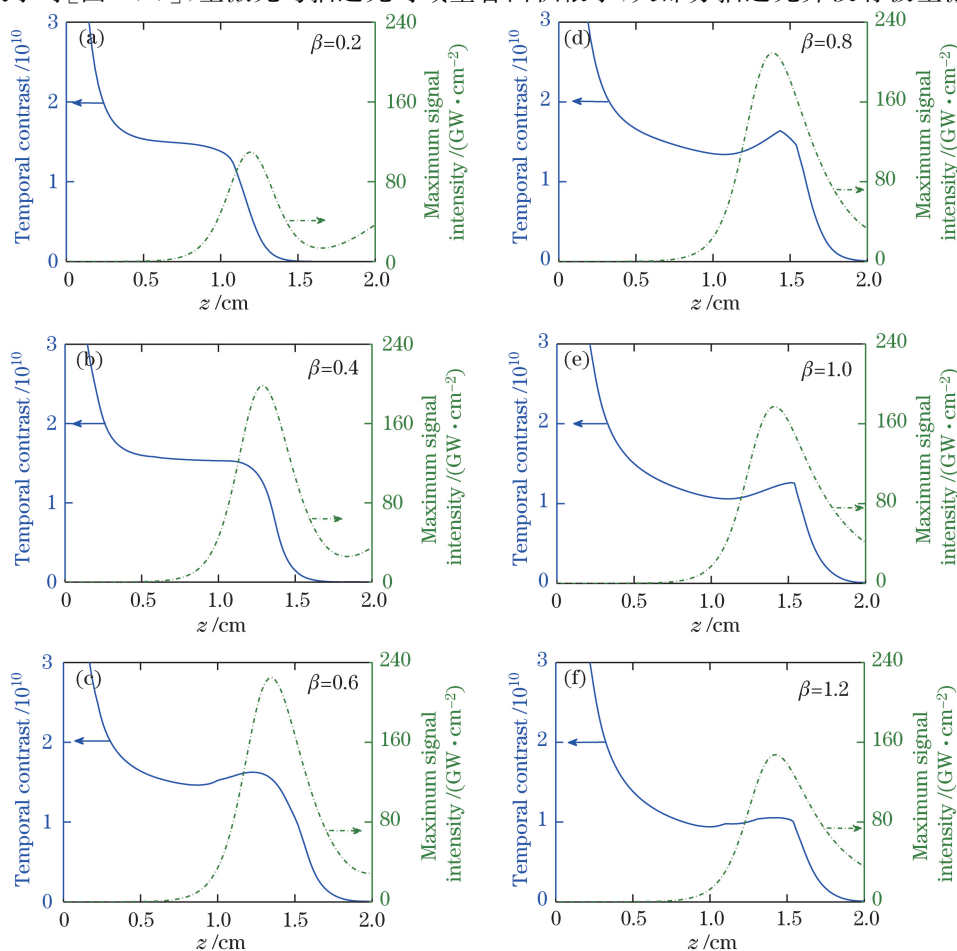


图 1 不同脉宽比条件下输出的压缩后激光光强与信噪比演化

Fig. 1 Evolution of compressed output laser intensity and temporal contrast under various signal-to-pump duration ratios

转换效率较低,最后输出的主激光光强较低。此时,荧光在所有抽运光时间点上都能得到放大,且主激光未与抽运光重合时,由于缺乏主激光的抑制作用,荧光一直呈指数形式放大,故在主激光输出最大光强时,所对应的信噪比很低。随着脉宽比增大[图 1(b)~(d)],主激光与抽运光时域重合面积变大,能量转换效率增大,使得输出的主激光光强增大,同时由于在较大时域窗口内主激光对荧光具有抑制作用,因此主激光输出最大光强时,信噪比也同时达到最大。脉宽比进一步增大时[图 1(e)、(f)],由于主激光是线性啁啾的,其与抽运光时域重合面积越大,增益带宽越小,虽然能量转换效率很高,但是效率-带宽积降低,使得最终输出的主激光光强降低,信噪比降低。

3.2 不同抽运波形条件下参量荧光对信噪比和效率-带宽积的影响

利用上述模拟程序,研究了不同增益、不同抽运波形条件下,参量荧光对信噪比以及效率-带宽积的影响。图 2 中效率-带宽积是指在一定脉宽比情况下输出的最大效率-带宽积,信噪比是指输出最大效率-带宽积时对应的信噪比。与 3.1 节分析类似,效率-带宽积随着脉宽比的增大呈先增大后减小的规律,存在一个最佳脉宽比,使得效率-带宽积最大。随着超高斯型抽运光阶数的增大,效率-带宽积增大。脉宽比小于最佳值时,信噪比随着抽运光阶数的增大而减小;脉宽比大于最佳值时,信噪比随着抽运光阶数的增大而增大。高阶超高斯光的时域分布接近平顶光,所以在其脉宽之内各时域点的光强差别不大,而高斯光两翼呈下降趋势,且荧光呈指数增益,所以在两翼区域增益大幅小于中心处。脉宽比小于最优值时,主激光与抽运光时间重合度小。对高阶超高斯型抽运光而言,其未重合的时间区域所提供的增益与中心增益相差不大,而对高斯型抽运光而言,由于其时间波形两翼呈下降趋势,所以未重合的时间区域所提供的增益比中心增益低得多。故在未重合区域,超高斯光抽运时参量荧光获得的增益远大于其在高斯光抽运情况下获得的增益。因此,脉宽比小于最优值时,信噪比随着抽运光超高斯阶数的增大而减小。脉宽比大于最优值时,由于高斯抽运光波形两翼下降,其提供的增益大幅下降,因此信号光有效增益带宽减小,使最终压缩输出的信号光光强降低,信噪比低于高阶超高斯光。

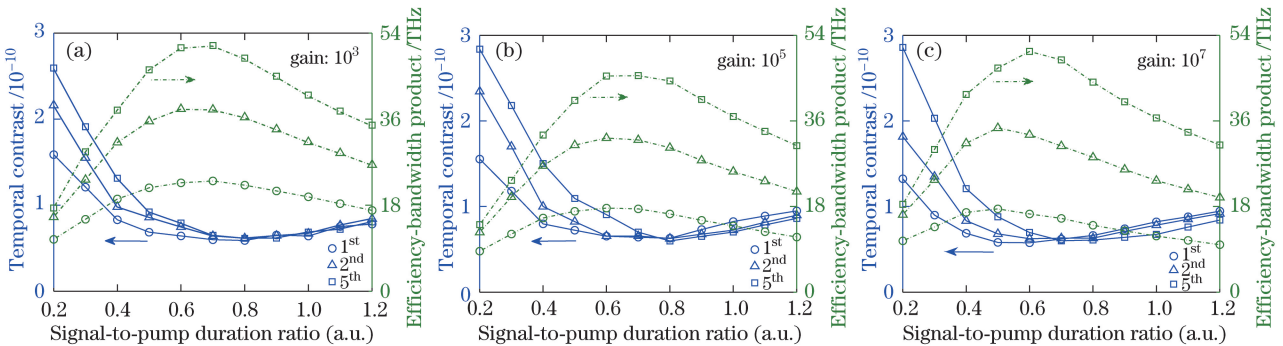


图 2 不同抽运波形条件下效率-带宽积与信噪比的演化

Fig. 2 Evolution of conversion efficiency-bandwidth product and temporal contrast under various pump profiles

对于不同的放大目的,OPCPA 参数与工作点的选择也不同。为了保证较宽的增益带宽而采用较小的脉宽比时,主激光只与抽运光中心区域重合,抽运光两翼未被信号光消耗,此时宜采用高斯波形,利用其两翼下降来降低荧光在此区域的增益,从而提高信噪比。为了保证转换效率较高而采用较大的脉宽比时,主激光与抽运光重合度很高,宜采用高阶的超高斯光来增大信号光有效的增益带宽,并且能抑制两翼荧光,从而得到较高的信噪比。

4 结 论

利用数值模拟的方法,在不同抽运波形条件下,研究了参量荧光对信噪比和效率-带宽积的影响,给出了其演化规律,得到了符合物理图像的结论。计算结果表明,在增益一定的情况下,随着脉宽比的增大,信噪比与效率-带宽积都呈先增大后减小的趋势。存在一个最佳脉宽比,使得两者同时达到最大。脉宽比小于最佳

值时,随着抽运光超高斯阶数的增大,信噪比减小而效率-带宽积增大;脉宽比大于最佳值时,抽运波形阶数的增大使得信噪比增大而效率-带宽积减小。出现上述现象的原因在于高斯光与超高斯光时间波形在两翼处的差别。上述结论能够深化研究者对参量荧光的理解,从而合理采用高斯光或超高斯光作为抽运光,设计信噪比更高的 OPCPA 装置。

参 考 文 献

- Gaul E W, Martinez M, Blakeney J, *et al.*. Demonstration of a 1.1 petawatt laser based on a hybrid optical parametric chirped pulse amplification/mixed Nd:glass amplifier[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(9): 1676-1681.
- Lozhkarev V V, Freidman G I, Ginzburg V N, *et al.*. Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals[J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(6): 421-427.
- Chekhlov O V, Collier J L, Ross I N, *et al.*. 35 J broadband femtosecond optical parametric chirped pulse amplification system[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(24): 3665-3667.
- Exawatt center for extreme light studies (XCELS)[R]. Russia: The Institute of Applied Physics RAS, 2011.
- The ELI-Nuclear Physics Working Groups. Extreme light infrastructure preparatory phase final report[R]. Romania: Extreme Light Infrastructure, 2011.
- The ELI-Nuclear Physics Working Groups. The white book of ELI nuclear physics[R]. Romania: Extreme Light Infrastructure, 2007.
- Hernandez-Gomez C, Collier J L, Canny D, *et al.*. The Vulcan 10 PW OPCPA project[R]. London: Central Laser Facility, 2006.
- Cheriaux G, Giambruno F, Fréneaux A, *et al.*. Apollon-10P: Status and implementation[C]. *Light at Extreme Intensities*, Szeged, 2012, 1462: 78-83.
- Dubietis A, Jonusauskas G, Piskarskas A. Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal[J]. *Optics Communications*, 1992, 88(4): 437-440.
- Ross I N, Matousek P, Towrie M, *et al.*. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers[J]. *Optics Communications*, 1997, 144(1): 125-133.
- Sun Meizhi, Kang Jun, Zhang Yanli, *et al.*. Analysis on phase matching and compression of amplified chirped pulse for various deuteration level DKDP crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1219002.
孙美智, 康俊, 张艳丽, 等. 不同含氧量 DKDP 晶体参量匹配与放大啁啾脉冲压缩特性分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1219002.
- Yan Wei, Zhang Junwei, Wu Wenlong, *et al.*. Design of optical parametric amplification crystal tiling structure and its tiling error compensation[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0716001.
闫威, 张军伟, 吴文龙, 等. 光参量放大晶体拼接机构设计及拼接误差补偿[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0716001.
- Zhang Junwei, Yan Wei, Lin Donghui, *et al.*. Machining error compensation system design of optical parametric amplification crystals tiling[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0116003.
张军伟, 闫威, 林东晖, 等. 光参量放大拼接晶体加工误差补偿系统设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0116003.
- Kleinman D A. Theory of optical parametric noise[J]. *Physical Review*, 1968, 174(3): 1027-1041.
- Ross I N, New G H C, Bates P K. Contrast limitation due to pump noise in an optical parametric chirped pulse amplification system[J]. *Optics Communications*, 2007, 273(1): 510-514.
- Dorrer C. Analysis of pump-induced temporal contrast degradation in optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(12): 3048-3057.
- Wang J, Yuan P, Ma J, *et al.*. Surface-reflection-initiated pulse-contrast degradation in an optical parametric chirped-pulse amplifier[J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15580-15594.
- Wang B P, Zou X B, Feng J. Quantum analysis of optical parametric fluorescence in the optical parametric amplification process[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(7): 075503.
- Homann C, Riedle E. Direct measurement of the effective input noise power of an optical parametric amplifier[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(4): 580-588.
- Dorrer C, Begishev I A, Okishev A V, *et al.*. High-contrast optical-parametric amplifier as a front end of high-power laser systems[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(15): 2143-2145.
- Lu Zonggui, Liu Hongjun, Jing Feng, *et al.*. Theoretical analysis of spectral properties of parametric fluorescence via spontaneous parametric down-conversion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(7): 4689-4696.

- 卢宗贵, 刘红军, 景 峰, 等. 基于自发参量下转换产生参量荧光的光谱分布特性理论分析[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4689-4696.
- 22 Tavella F, Marcinkevicius A, Krausz F. Investigation of the superfluorescence generation in a multiterawatt optical parametric chirped pulse amplifier system[J]. New Journal of Physics, 2006, 8(10): 219.
- 23 Manzoni C, Moses J, Kärtner F X, *et al.*. Excess quantum noise in optical parametric chirped-pulse amplification[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8357-8366.
- 24 Moses J, Manzoni C, Kärtner F X, *et al.*. Temporal optimization of ultrabroadband high-energy OPCPA[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5540-5555.
- 25 Wang J, Ma J G, Wang Y Z, *et al.*. Noise filtering in parametric amplification by dressing the seed beam with spatial chirp[J]. Optics Letters, 2014, 39(8): 2439-2442.