

# 基于单个BBO晶体载波包络相位稳定的高效率光参量放大器\*

尤良芳<sup>1)2)</sup> 令维军<sup>1)2)†</sup> 李可<sup>1)</sup> 张明霞<sup>1)</sup> 左银燕<sup>1)</sup> 王屹山<sup>2)</sup>

1)(天水师范学院激光技术研究所, 天水 741001)

2)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2014年3月17日收到; 2014年5月17日收到修改稿)

基于单个BBO非线性晶体, 利用非共线光参量放大技术, 研究了载波包络相位稳定的高效率可调谐近红外脉冲产生. 以载波包络相位稳定的飞秒激光放大系统产生的白光作为种子光, 注入一个二类匹配的二级光参量放大器, 在1350 nm波段获得抽运-信号光34%的转换效率. 利用 $f-2f$ 光谱相干测量技术, 放大脉冲载波包络相位的抖动30 min内小于137 mrad. 该方法提供了一种简单高效的载波包络相位稳定的红外脉冲产生技术.

**关键词:** 光参量放大, 载波包络相位, 阿秒脉冲

**PACS:** 42.65.Re, 42.65.Yj, 42.60.By

**DOI:** 10.7498/aps.63.214203

## 1 引言

载波包络相位(carrier envelope phase, CEP)稳定的飞秒脉冲在高次谐波和单个阿秒脉冲的产生以及超快时域分辨中具有重要的作用<sup>[1,2]</sup>. 由于电子振荡的有质动力能正比于驱动脉冲波长的平方, 红外波段的周期量级脉冲将是最理想的驱动源<sup>[3,4]</sup>. 掺钛蓝宝石啁啾脉冲放大系统输出脉冲波长在800 nm附近, 为获得红外波段的脉冲必须借助光参量放大(optical parametric amplification, OPA)技术. 目前最常用的两种方案是采用 $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(BBO)晶体非共线参量放大技术(noncollinear optical parametric amplification, NOPA)<sup>[5-8]</sup>和BiB<sub>3</sub>O<sub>6</sub>(BIBO)晶体共线参量放大技术(collinear optical parametric amplification, COPA)<sup>[9,10]</sup>. 为了获得一个CEP稳定的宽带放大飞秒脉冲, 种子光通常采用以下三种办法获得: 1)利用飞秒脉冲聚焦蓝宝石晶体获得单丝超

连续白光<sup>[5]</sup>; 2)利用OPA技术获得载波包络相位稳定的宽带飞秒闲频光脉冲<sup>[7]</sup>; 3)将中空光纤或者蓝宝石晶体产生的超连续白光波长红端和蓝端进行差频获得载波包络相位稳定宽带飞秒脉冲<sup>[8-10]</sup>. 最后将种子光脉冲进行两级或者三级能量放大获得高能量的近红外脉冲.

CEP的控制在于单个阿秒脉冲的产生, 光谱合成及阿秒光谱学等领域是必不可少的<sup>[11-13]</sup>, 通常有主动控制和被动控制两种方法实现CEP的控制<sup>[14,15]</sup>. 总体来说, 主动控制方法产生高能量的CEP稳定的脉冲通过慢环反馈, 可以长时间的控制脉冲的CEP, 但输出波长在800 nm附近. 被动控制方法可以产生高能量的CEP稳定的近红外脉冲, 但是CEP随时间漂移越来越大, 不利于实验的进行. 由于被动过程是一个随机的非线性过程, 因此在被动控制方案中通过慢环控制放大脉冲的CEP十分困难, 目前还没有相关的报道. 因此寻求更为合理可靠的CEP控制方案也是研究的课题之一.

\* 国家自然科学基金(批准号: 60878020, 61465012)、瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(批准号: SKLST201307)和天水师范学院青蓝工程项目资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wjljings@sina.com

本文采用了 CEP 混合控制新方案, 即白光种子脉冲直接由主动控制 CEP 的掺钛蓝宝石放大系统产生, 放大过程采用被动参量放大技术, 在 30 min 的时间内测得 CEP jitter 为 137 mrad. 表明该方案对产生 CEP 稳定的高能量红外脉冲是可行的. 同时, 方案中仅用了一个 BBO 晶体, 通过对光路的创新设计, 在 407  $\mu\text{J}$  抽运下获得了 138  $\mu\text{J}$  的放大信号光, 对应的抽运光到信号光的转换效率为 34%, 据我们所知, 这是 BBO 晶体目前最高的 OPA 转换效率.

## 2 实验装置

图 1 是整个放大系统实验光路示意图. 一个商业化 CEP 主动控制的 3 kHz 的掺钛蓝宝石啁啾脉冲放大系统作为 OPA 的抽运源, 输出脉冲宽度为 25 fs, 输出能量为 510  $\mu\text{J}$ , 中心波长为 800 nm. 通过 2 个分束镜 1 和分束镜 2, 将能量分为三部分: 大约 3  $\mu\text{J}$  的能量聚焦到 2 mm 厚的钛宝石片上, 通过微调光阑, 大约 1  $\mu\text{J}$  的抽运光通过透镜 1 ( $f = 100$  mm) 聚焦到钛宝石上产生了单丝的环状白光, 由于白光直接来自钛宝石放大系统, 所以白光 CEP 是自动控制的. 这种 CEP 稳定的高光束质量的超连续白光为宽带 NOPA 提供了优质的种子源. 通过反射率近 20% 的分束镜 2, 大约 100  $\mu\text{J}$  的能量用来抽运第一级 NOPA (NOPA1), 一个二类匹配的 BBO 晶体作为 NOPA1 的非线性晶体, 晶体厚 3 mm, 口径为 17 mm  $\times$  17 mm, 具有相位匹配角为  $\theta = 28^\circ$ ,  $\phi = 30^\circ$ . 我们引入的信号光和抽运光间的夹角为  $1.7^\circ$ , 为了避免抽运光损伤晶体和抑制超连续荧光, 我们将晶体中的抽运光的直径控制在 4 mm 以内, 对应的抽运强度为 260  $\text{GW}/\text{cm}^2$ . 通过 NOPA1 我们获得了 3  $\mu\text{J}$  的放大信号光.

由 NOPA1 输出的放大信号光进入第二级 NOPA (NOPA2) 之前, 为了与晶体中的抽运光大小实现匹配, 我们采用了一个 1:3 的开普勒望远镜系统对信号光进行了扩束和准直. 经过扩束准直后的一级放大信号光通过 2 个反射镜使光折返回来并且保持与 NOPA1 输出的信号光平行后再次进入同一个 BBO 晶体, 通过 NOPA2 进一步放大能量. 通过分束镜 2, 约 407  $\mu\text{J}$  的能量用来抽运 NOPA2, 通过延迟系统 2, 调节抽运光保持与 NOPA1 抽运光平行, 这样只用一块 BBO 晶体就实现了两级 NOPA, 如图 1 所示. 这种光路结构的优点是晶体

旋转在任何位置时, NOPA1 和 NOPA2 的光谱增益峰值都是一致的, 相对于两块晶体组成的 NOPA, 为实现调谐波长输出, 必须精确的同步旋转两块晶体, 这些很难通过手动去操作, 需要将两块晶体放在同步驱动的精密旋转台上进行, 而这种单晶体方案大大的简化了调谐的麻烦, 仅需手动旋转 BBO 晶体就可以实现整个范围的调谐输出. 我们通过调节透镜 3 ( $f = 500$  mm) 到 BBO 晶体的距离, 实现晶体中信号光和抽运光的空间上有效匹配. 通过 NOPA2, 在 1350 nm 处获得最大的信号光能量为 138  $\mu\text{J}$ , 对应抽运光到信号光的转换效率为 34%.

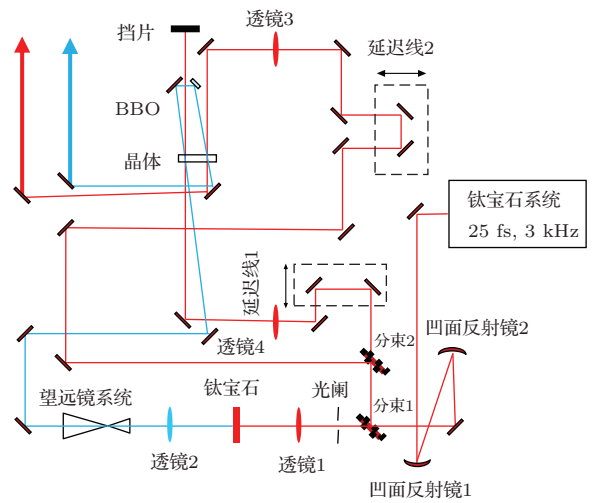


图 1 载波包络相位稳定的光参量放大系统光路示意图

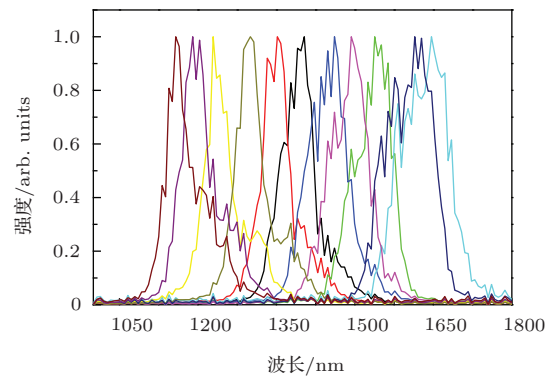


图 2 1100—1700 nm 可调谐输出波长

## 3 结果与讨论

通过旋转 BBO 晶体, 获得了波长在 1100—1700 nm 波段的调谐输出, 见图 2. 在这个调谐范围内, 对二类匹配的 BBO 晶体, 其信号光的相对群速度 (相对于抽运光) 的符号与闲频光的

相对群速度(相对于抽运光)的符号相反,这就意味着能流主要发生在抽运光向信号光和闲频光的方向. 模拟表明<sup>[16]</sup>: 即使晶体长度超出了由于抽运光和信号光导致的群速度失配的对晶体长度的限制(对790 nm的抽运光典型长度为2 mm), 仍然可以增加抽运光能量到信号光和闲频光的转化. 实验中采用厚度为3 mm的二类匹配的BBO晶体, 为获得高的转换效率提供了重要保证. 同时, 高重复频率的3 kHz商业化的掺钛蓝宝石激光放大系统为OPA提供了高光束质量的抽运光和信号光, 加之精密调节抽运光和信号光的空间和时间匹配. 我们在NOPA2中直接获得了抽运光到信号光34%的转换效率.

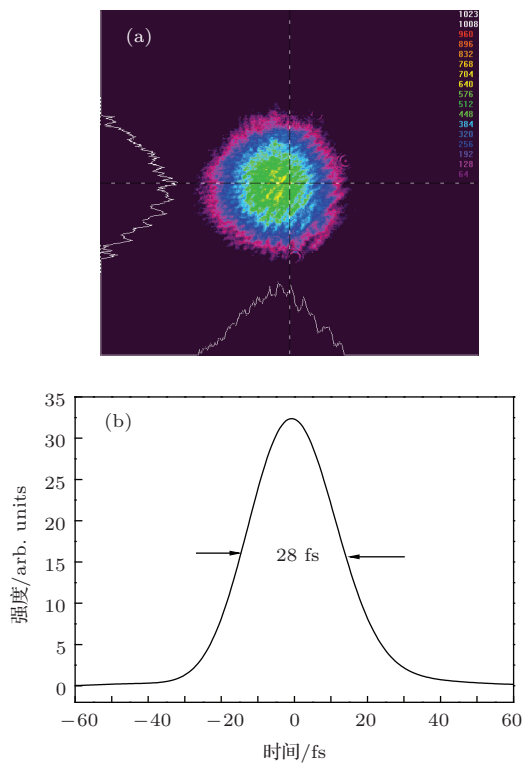


图3 1350 nm放大信号光光束质量(a)及脉冲宽度(b)

为了获得高光束质量的放大信号光, 抑制NOPA2的参量荧光放大是很重要的. 为此我们控制抽运光能流为250 GW/cm<sup>2</sup>, 这个值远小于晶体损伤阈值并且稍低于超连续荧光阈值, 这样可以有效抑制放大信号光中荧光放大. 此时, 如果挡住信号光则几乎测量不到荧光放大的能量. 表明这个抽运能流下不会影响信号光的对比度和光束质量. 图3(a)是用彩色CCD获得的放大信号光的光束质量, 为了考察OPA过程对脉冲宽度的影响, 采用光谱相位相干电场重构法(the spectral phase

interferometer for direct electric field reconstruction, SPIDER)测量了放大光脉冲宽度<sup>[17]</sup>, 在1350 nm处脉冲宽度为28 fs, 如图3(b)所示. 表明在红外波段OPA过程对脉冲的展宽影响很小. 同时我们还考察了输出闲频光的光束质量, 闲频光由于存在空间色散, 所以在不同波段其光束空间分布是不同的, 图4显示了闲频光光束分布随波长的变化情况, 表明在兼并点1600 nm附近, 光束质量最好, 随着波长的增加或减少, 光束分布的空间色散越来越大了.

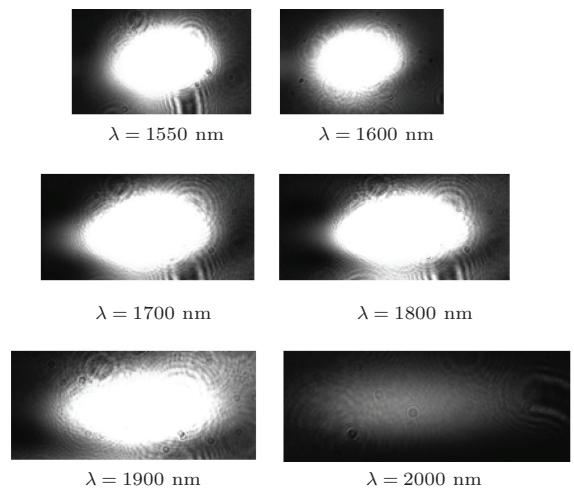


图4 闲频光空间分布随波长变化图

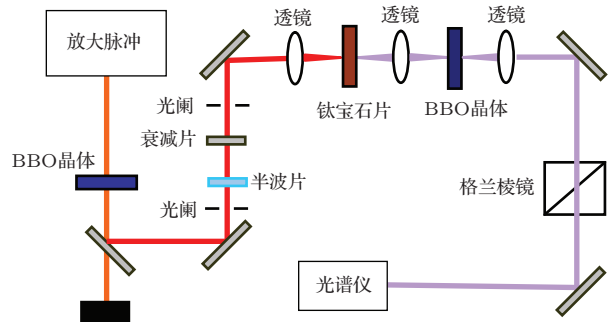


图5  $f-2f$ 光谱相关测量光路

为了考察NOPA过程对CEP的影响, 我们用 $f-2f$ 光谱自相关技术测量了放大后脉冲的相位抖动(CEP jitter), 如图5所示. 从一个CEP主动控制的3 kHz系统输出的脉冲CEP jitter约56 mrad, 经过两级NOPA后, 我们直接在BBO晶体后面测量放大的脉冲CEP jitter, 利用线性傅里叶变换光谱干涉算法, 在30 min的采样中得到放大后脉冲的CEP jitter为137 mrad, 见图6. 表明这种CEP混合控制技术(种子超连续白光CEP主动

控制, 放大过程采用 OPA 被动 CEP 控制技术) 是完全可行的. 在阿秒产生实验中, 往往需要红外脉冲的 CEP 控制达到几个小时, 在许多 CEP 被动控制方案中, 随着时间的增加相位漂移越来越大, 而 CEP 被动控制是一个随机的参量过程, 很难引入慢环反馈去有效控制 CEP 的漂移. 而这种方案可以很容易地引入一个慢环反馈, 得到长期 CEP 稳定的红外脉冲. 这也是这种方案的优点之一.

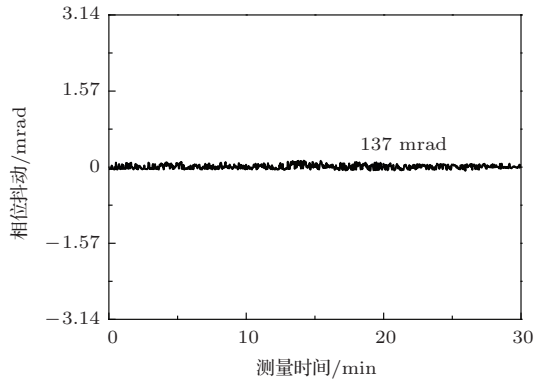


图6 30 min 内测量的系统输出放大脉冲的 CEP jitter

## 4 结 论

基于 CEP 混合控制方案, 结合高效率光参量放大技术, 我们已经实现了可调谐相位稳定的红外飞秒脉冲输出. 整个系统仅用了一个 BBO 晶体就实现了两级参量放大. 大大简化了调谐难度. 整个系统输出调谐波长为 1100—1700 nm, 在第二级参量放大过程中抽运光到信号光的转换效率达到了 34%. 为了实现 CEP 的长期稳定, 下一步将引入一个慢反馈环, 这种 CEP 长期稳定的近红外参量放大器将应用于阿秒脉冲产生的实验中, 其中一个重要方向是利用双色场产生单个孤立的阿秒脉冲实验 [18,19].

感谢魏志义教授有益的讨论和指导, 感谢韩国浦项工大金东恩教授提供了良好的实验条件.

## 参考文献

- [1] Kienberger R, Goulielmakis E, Uiberacker M, Baltuska A, Yakovlev V, Bammer F, Scrinzi A, Westerwalbesloh T, Kleineberg U, Heinzmann U, Drescher M, Krausz F 2004 *Nature* **427** 817
- [2] Sansone G, Benedetti E, Calegari F, Vozzi C, Avaldi L, Flammini R, Poletto L, Villoresi P, Altucci C, Velotta R, Stagira S, De Silvestri S, Nisoli M 2006 *Science* **314** 443
- [3] Vozzi C, Cirimi G, Manzoni C, Benedetti E, Calegari F, Sansone G, Stagira S, Svelto O, De Silvestri S, Nisoli M, Cerullo G 2006 *Optics Express* **14** 10109
- [4] Calegari F, Vozzi C, Negro M, Sansone G, Frassetto F, Poletto L, Villoresi P, Nisoli M, De Silvestri S, Stagira S 2009 *Optics Letters* **34** 3125
- [5] Liu H J, Chen G F, Zhao W, Wang Y S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 105
- [6] Zhang Jing, Zhang Q L, Man J, Zhang D X, Fen B H, Zhang J Y 2012 *Chin. Phys. B* **21** 084211
- [7] Zhang C, Wei P, Huang Y, Leng Y, Zheng Y, Zeng Z, Li R, Xu Z 2009 *Optics Letters* **34** 2730
- [8] Vozzi C, Calegari F, Benedetti E, Gasilov S, Sansone G, Cerullo G, Nisoli M, De Silvestri S, Stagira S 2007 *Optics Letters* **32** 2957
- [9] Silva F, Bates P K, Esteban-Martin A, Ebrahim-Zadeh M, Biegert J 2012 *Optics Letters* **37** 933
- [10] Ghotbi M, Beutler M, Petrov V, Gaydardzhiev A, Noack F 2009 *Optics Letters* **34** 689
- [11] Baltuška A, Udem T, Uiberacker M, Hentschel M, Goulielmakis E, Gohle C, Krausz F 2003 *Nature* **421** 611
- [12] Han H N, Wei Z Y, Cang Y, Zhang J 2003 *Physics* **32** 762 (in Chinese) [韩海年, 魏志义, 苍宇, 张杰 2003 物理 **32** 762]
- [13] Song L W, Li C, Wang D, Xu C H, Len Y X, Li R X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 054206 (in Chinese) [宋立伟, 李闯, 王丁, 许灿华, 冷雨欣, 李儒新 2011 物理学报 **60** 054206]
- [14] Fuji T, Ishii N, Teisset C Y, Gu X, Metzger T, Baltuska A, Forget N, Kaplan D, Galvanauskas A, Krausz F 2006 *Optics Letters* **31** 1103
- [15] Chang Z H 2006 *Appl. Opt.* **45** 8350
- [16] Danielius R, Piskarskas A, Stabinis A, Banfi G P, Di Trapani P, Righini R 1993 *JOSA B* **10** 2222
- [17] Wang P, Wang Z H, Wei Z Y, Zhen J A, Song J H, Zhang J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3004
- [18] Kim B, An J, Yu Y, Cheng Y, Xu Z, Kim D E 2008 *Optics Express* **16** 10331
- [19] Li W, Wang G L, Zhou X X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 123201

# High efficient CEP-stabilized infrared optical parametric amplifier made from a BBO single crystal\*

You Lang-Fang<sup>1)2)</sup> Ling Wei-Jun<sup>1)2)</sup>† Li Ke<sup>1)</sup> Zhang Ming-Xia<sup>1)</sup>  
Zuo Yin-Yan<sup>1)</sup> Wang Yi-Shan<sup>2)</sup>

1) (*Institute of Laser technology, Tianshui Normal University, Tianshui 741001, China*)

2) (*State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

( Received 17 March 2014; revised manuscript received 17 May 2014 )

## Abstract

We demonstrate an efficient tunable phase-stabilized near-infrared optical parametric amplifier (OPA) made from a BBO ( $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) single crystal in this paper. By using the seeded white-light continuum produced by CEP(carrier envelop phase)-stabilized femtosecond laser amplifier system which is seeded into the two stages of a type II OPA system, the pump-to-signal conversion efficiency of 34% can be achieved at 1350 nm. The CEP jitter of amplified pulses measured by an  $f-2f$  interferometer is 137 mrad in 30 minutes. This paper demonstrates a simple, feasible and efficient way to produce tunable femtosecond pulses with CEP control.

**Keywords:** optical parameter amplifier, carrier envelop phase, attosecond pulse

**PACS:** 42.65.Re, 42.65.Yj, 42.60.By

**DOI:** 10.7498/aps.63.214203

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60878020, 61465012), the Open Fund of State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, China (Grant No. SKLST201307), and the Qing Lan'Talent Engineering Funds by Tianshui Normal University.

† Corresponding author. E-mail: [wjlingts@sina.com](mailto:wjlingts@sina.com)