

文章编号: 0253-2239(2007)08-1481-4

# 用于宽带啁啾脉冲光参量放大系统精确同步的新方法\*

高艳霞<sup>1</sup> 赵改清<sup>1</sup> 徐世祥<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 深圳大学物理科学学院应用物理系, 深圳 518060  
<sup>2</sup> 华东师范大学光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 基于非共线光参量放大, 以波长 800 nm 飞秒激光的倍频光为抽运光, 以激光二极管 640 nm 连续波激光为信号光, 产生了与 800 nm 飞秒激光精确同步的无直流本底的 1064 nm 脉冲光。实验结果显示该 1064 nm 的光脉冲在脉冲能量和空间光束质量上均可作为 1064 nm 波长脉冲放大器的种子光。仅通过一级简单紧凑的非共线参量放大就可实现光周期量级的光参量啁啾脉冲放大系统的抽运激光和种子光的精确同步。

**关键词:** 非线性光学; 非共线光参量放大; 光参量啁啾脉冲放大; 时间同步

中图分类号: O437 文献标识码: A

## A Novel All-Optical Accurate Synchronization for Broadband Optical Parametric Chirped Pulse Amplification

Gao Yanxia<sup>1</sup> Zhao Gaiqing<sup>1</sup> Xu Shixiang<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Applied Physics, School of Physics, University of Shenzhen, Shenzhen 518060  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062)

**Abstract:** The generation of direct current background-free pulses at 1064 nm that are accurately synchronized with femtosecond pulses at 800 nm is reported by use of a continuous-wave diode laser seeded noncollinear optical parametric amplification pumped by frequency-doubled femtosecond laser at 800 nm. The experimental results show that the laser pulses are quite qualified as the seed pulses of the pulsed laser amplification operating at 1064 nm due to their high pulse energy and spatial beam quality. An accurate all-optical synchronization is realized between pump and signal beams in an optical parametric chirped pulse amplification system just through a single-stage compact noncollinear optical parametric amplifier.

**Key words:** nonlinear optics; noncollinear optical parametric amplification; optical parametric chirped pulse amplification; temporal synchronization

## 1 引言

啁啾脉冲放大技术的出现将高功率激光系统输出水平推上了拍瓦的台阶<sup>[1]</sup>。然而, 由于增益压窄效应的限制, 啁啾脉冲放大技术在光周期量级的超短脉冲放大中遇到了难以逾越的障碍。光参量啁啾脉冲放大技术因其超宽的增益带宽成为代替啁啾脉冲放大技术产生超强超短激光的一种新技术<sup>[2~8]</sup>。在现有的光周期量级参量啁啾脉冲放大系统中, 其宽带信号光来自于中心波长在 800 nm 附近的钛宝石激光

器<sup>[7]</sup>, 而抽运光则选用波长在 1064 nm/1053 nm 的掺钕介质激光系统的倍频光, 以利用掺钕介质激光可获得较高单脉冲能量的优势。为了获得光参量啁啾脉冲放大系统的稳定输出, 抽运光和信号光间的时间同步非常重要。传统的电子控制技术可将来自两个独立的激光器系统的抽运光和信号光同步精确到 100 ps 左右<sup>[9]</sup>。如用锁腔和精密电子控制技术相结合, 则同步精度可达 2 ps 左右<sup>[10]</sup>。在抽运脉宽为几个皮秒的场合, 该技术可将抽运光和信号光间的时

\* 国家 863 计划(2006AA804207)资助课题。

作者简介: 高艳霞(1972—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事超短脉冲传输及转换的理论和应用研究。

E-mail: gyx@szu.edu.cn

收稿日期: 2007-02-05; 收到修改稿日期: 2007-04-10

间抖动降到 100 fs<sup>[11]</sup>。这些方案的缺陷是难以长时间地维持高精度的脉冲同步。近年来,全光学方法实现时间同步技术<sup>[11~14]</sup>的出现可将同步精度推进飞秒。

最近以氦氖激光器产生的 632.8 nm 连续光作为信号光,以 794 nm 附近激光器的倍频光为抽运光,利用一级非共线光参量放大,直接实现了与钛宝石飞秒激光同步的无直流本底的 1064 nm 脉冲光<sup>[15]</sup>。该方案的特点是同步结构非常简单,然而氦氖激光低的输出功率使经一级参量放大后得到的 1064 nm(宽带约 15 nm)脉冲能量仅为亚纳焦量级。对于有窄带要求的抽运脉冲来说,有效的脉冲能量只有几十皮焦。如果将这种脉冲作为放大种子显得有些勉强。而且几十毫瓦的氦氖激光器体积较大,对环境变化较为敏感。本文用中心波长为 640 nm 的半导体激光器取代氦氖激光器,有效地实现了文献 15 的同步方案,而且将产生的 1064 nm 脉冲光能量提高了 25 倍,结构也更加紧凑。

## 2 实验装置

在光参量放大过程中,对于 640 nm 的信号光,为了得到 1064 nm 的光脉冲,其抽运脉冲波长应在 400 nm 处。图 1 为实验装置图,其中 400 nm 的飞秒激光脉冲来源于 1 kHz 的钛宝石啁啾脉冲再生放大激光系统输出光的二次谐波,带宽为 6 nm,相应的倍频效率为 35%。其输出偏振由半波片控制。该脉冲的能量约为 180  $\mu$ J,脉冲宽度约 50 fs。该飞秒脉冲串经半波片后被宽带凹面反射镜(曲率半径为 1 m)聚焦到 2 mm 厚的 I 类相位匹配的  $\beta$ -BBO 晶体上。

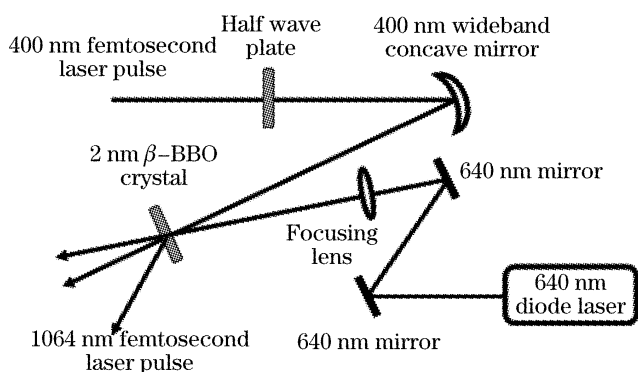


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

这里所用的连续波线偏振输出半导体激光器的中心波长为 640 nm,输出功率达 500 mW,其功率稳定性为  $\pm 1\%$ 。该连续激光经两面高反镜后也被

焦距为 300 mm 的凸透镜聚焦到 2 mm 厚的 I 类相位匹配的  $\beta$ -BBO 晶体上。通过适当的光学调节与 400 nm 的宽带光脉冲在  $\beta$ -BBO 参量晶体上重合,在满足相位匹配的条件下发生非线性光参量放大,产生了中心波长在 1064 nm 处的光脉冲。由于是非共线参量放大,该闲频光脉冲无直流本底。从实验设计可看出,由于信号光是连续的,所以它与抽运光之间不需要任何同步装置,闲频光与抽运光之间是同步的,因而与抽运光的基波光脉冲,宽带脉冲与 800 nm 飞秒光脉冲也同步。

## 3 实验结果及讨论

实验中 400 nm 的抽运光为水平偏振,而连续的 640 nm 信号光为垂直偏振。经过优化调整后,发现当抽运光在空气中的入射角约为  $13.1^\circ$ 、抽运光和信号光在空气中的夹角大约为  $10^\circ$  时,闲频光较强,此时闲频光和抽运光之间的夹角大约为  $11.9^\circ$ 。

非共线光参量放大器抽运光的光谱,如图 2(a)所示,抽运光的中心波长在 400 nm 附近,带宽为 9.6 nm。图 2(b)是放大后信号光的频谱,信号光的带宽较窄,与从半导体激光器直接输出的激光没有区别。这是因为经非共线参量放大器后,尽管信号光和闲频光都被放大,但由于半导体激光器输出的连续光与  $\beta$ -BBO 作用时间特别短(百飞秒量级),而抽运脉冲时间间隔为 1 ms,也就是说,640 nm 激光被放大部分和未放大部分的时间比约为  $5 \times 10^{-10}$  量

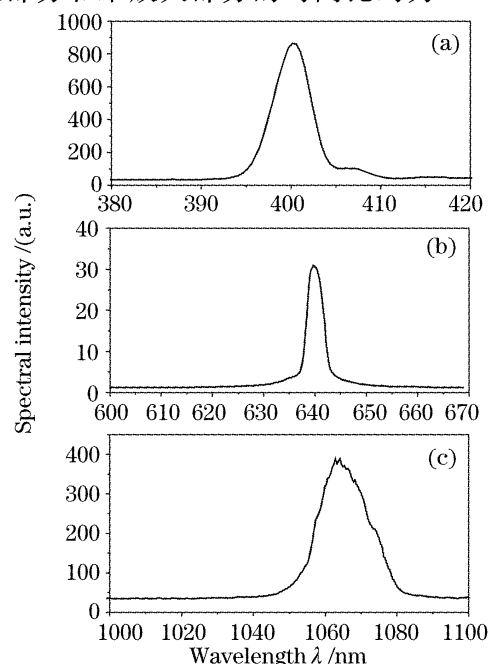


图 2 非共线参量放大器中测到的光谱图

Fig. 2 Measured spectra in noncollinear parametric amplifier

级( $\sim 5 \times 10^{-13} : 10^{-3}$ )。按照理论估算,当抽运强度为  $40 \text{ GW/cm}^2$  时,参量增益约为  $5 \times 10^5$ ,所以放大后信号光中后每秒内脉冲光和连续本底能量比约  $5 \times 10^{-4} : 1$ ,可见光谱仪测到的光谱成分绝大部分仍然是连续光,其光谱有明显连续光谱特性。图 2(c) 是非共线参量放大器的闲频光光谱,它的中心波长在  $1064 \text{ nm}$  处,其光谱相当宽,约为  $15 \text{ nm}$ ,显示出明显的脉冲光谱特性。这主要得益于非共线参量放大。这项特征使得它很适合作为脉冲放大系统的种子。在该装置中,抽运光脉冲和连续的信号光在晶体上的光斑直径分别约为  $0.5 \text{ mm}$  和  $0.18 \text{ mm}$ 。当抽运光脉冲能量为  $180 \mu\text{J}$ ,信号光的功率为  $500 \text{ mW}$  时,测到的闲频光的脉冲能量为  $17 \text{ nJ}$ 。

作为光参量啁啾脉冲的抽运脉冲,为提高参量放大效率和减少抽运光本身对信号光光谱的影响,窄带是比较理想的。对于光谱宽度为  $15 \text{ nm}$  脉冲能量为  $17 \text{ nJ}$  的  $1064 \text{ nm}$  光脉冲,在中心波长附近  $0.5 \text{ nm}$  光谱范围内,有效脉冲能量应在  $1 \text{ nJ}$  量级左右。从脉冲能量来讲,作为  $1064 \text{ nm}$  激光放大的种子已经足够。

实验发现闲频光脉冲的空间分布呈椭圆状,而且存在空间啁啾,为此我们对其不同空间点的光谱特性进行测量,如图 3 所示。B、D 两点是沿闲频光传输方向的两个点,而 A、B、C 是垂直于闲频光传输方向的三个点。其中 O 和 D、O 和 B、A 和 B、B 和 C

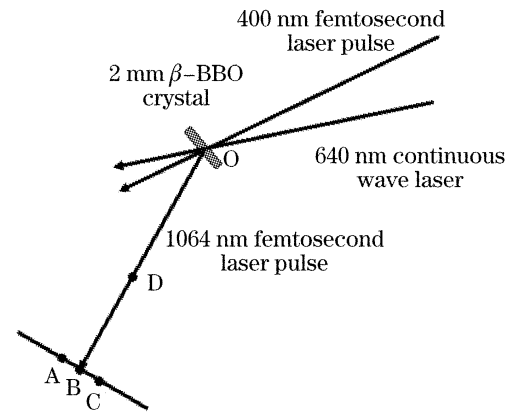


图 3 测量闲频光脉冲空间啁啾特性

Fig. 3 Scheme to measure pulse spatial chirp of idler light. The distances between the crystal and the detector points are  $55, 103, 2.5$  and  $2.5 \text{ cm}$ . The measured spectra are shown in Fig. 4. The results show that the center wavelengths at points B and D are consistent, which is in line with theoretical predictions. The spectral line widths at these two points are also similar, which may be due to two reasons: first, in this experiment, compared with the divergence angle of a Gaussian beam, the angle of dispersion caused by phase matching is relatively small; second, the resolution limit of the spectrometer is also a possible factor. Because according to theoretical analysis, the spectral line width at point B should be narrower than at point D. The measured center wavelengths at points A, B, and C are significantly different, being  $1068 \text{ nm}, 1064 \text{ nm}$  and  $1060 \text{ nm}$ . This indicates a clear spatial chirp characteristic, which is due to the broadband nature of the pump light and the narrowband nature of the signal light during the non-collinear parametric amplification process. The phase matching requirement for different frequency components of the idler light corresponds to different propagation directions. According to the measurement results

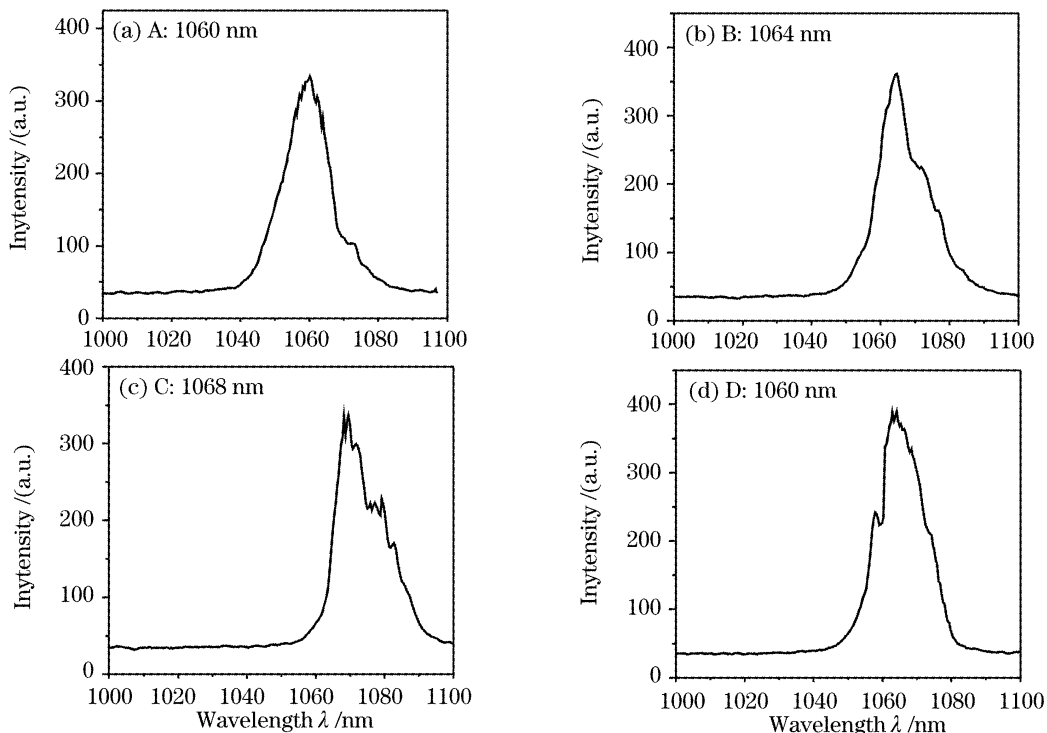


图 4 图 3 不同空间位置测得的闲频光光谱

Fig. 4 Measured idler light spectra at different positions in Fig. 3

果可知,闲频光的空间啁啾约为  $5.3 \times 10^{-4}$  rad/nm。假定闲频光在此处的束腰半径与信号光相同,则闲频光在晶体上的聚焦光斑大小也为 0.18 mm。可估算出闲频光的发散角约为  $2.2 \times 10^{-3}$  rad。在掺 Nd 介质的激光放大链中,激光的增益线宽一般均小于 1 nm,而光参量啁啾脉冲放大系统中也不需要宽带增益,所以闲频光经掺 Nd 介质的激光放大链后由空间啁啾引起的发散角将远小于高斯光束传输的衍射角。因此,这些 1064 nm 的闲频光脉冲有足够高的光束质量充当光参量啁啾脉冲放大系统中抽运激光放大链的种子光。由于它们与宽带 800 nm 飞秒激光可实现被动式精确同步(无需电子同步控制系统),所以本文提供了一种用全光手段解决光参量啁啾脉冲放大系统中抽运光和信号光时间同步的方法。

## 4 结 论

通过以钛宝石飞秒激光倍频光为抽运光以连续波 640 nm 半导体激光为信号光的非共线光参量放大,将钛宝石飞秒激光倍频光的部分能量转移到闲频光 1064 nm 的光脉冲上。由于采用非共线参量放大结构,闲频光脉冲无直流本底。对空间光束质量和脉冲能量测量表明该闲频光脉冲完全可以作为 1064 nm 脉冲激光放大器的种子。将该 1064 nm 的脉冲光经进一步放大,既可作为整个光参量啁啾脉冲放大系统抽运光的种子光,从而实现光参量啁啾脉冲放大系统抽运光和信号光的全光学同步。与用 He-Ne 激光作为连续信号光的方案比较,本方案有下列优势:首先 1064 nm 闲频光脉冲能量得到大幅提高,高达 17 nJ,这主要得益于 640 nm 半导体激光器的高功率输出。所得到的 1064 nm 光脉冲已经具备足够的脉冲能量,这意味着无需经过二级参量放大,就可作为后续放大的种子。其次,半导体激光器结构紧凑,而且输出特性对外界环境温度变化不如高功率 He-Ne 激光器那样敏感。最后,无需将钛宝石飞秒激光中心波长调到 794 nm。该研究为光周期量级的光参量啁啾脉冲放大系统的时间同步

问题提供有益的技术参考。

## 参 考 文 献

- 1 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*. Petawatt laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3): 160~162
- 2 Yang Xiaodong, Xu Zhizhan, Leng Yuxin *et al.*. Multiterawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(13): 1135~1137
- 3 Igor Jovanovic, Brian J. Comaskey, Christopher A. Ebbers *et al.*. Optical parametric chirped-pulse amplifier as an alternative to Ti:sapphire regenerative amplifiers[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(15): 2923~2929
- 4 P. Schlup, J. Biegert, C. P. Hauri *et al.*. Design of a sub-13-fs, multi-gigawatt chirped pulse optical parametric amplification system[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(3): 285~288
- 5 Igor Jovanovic, Curtis G. Brown, Christopher A. Ebbers *et al.*. Generation of high-contrast millijoule pulses by optical parametric chirped-pulse amplification in periodically poled KTiOPO<sub>4</sub> [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(9): 1036~1038
- 6 Yu-xin Leng, Xiao-dong Yang, Hai-he Lu *et al.*. Temporal synchronization in optical parametric chirped pulse amplification laser system[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(12): 2994~2997
- 7 Sterling Backus, Charles G. Durfee III, Margaret M. Murnane *et al.*. High power ultrafast lasers[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, **69**(3): 1207~1223
- 8 Giulio Cerullo, Sandro De Silvestri. Ultrafast optical parametric amplifiers[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(1): 1~18
- 9 Ian N. Ross, John L. Collier, Pavel Matousek *et al.*. Generation of terawatt pulses by use of optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(15): 2422~2427
- 10 J. V. Rudd, R. J. Law, T. S. Luk *et al.*. High-power optical parametric chirped-pulse amplifier system with a 1.55  $\mu\text{m}$  signal and a 1.064  $\mu\text{m}$  pump[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(15): 1974~1976
- 11 S. Witte, R. Th. Zinkstok, W. Hogervorst *et al.*. Generation of few-cycle terawatt light pulses using optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(13): 4903~4908
- 12 Leng Yuxin, Lin Lihuang, Yang Xiaodong *et al.*. Regenerative amplifier with continuously variable pulse duration used in an optical parametric chirped-pulse amplification laser system for synchronous pumping[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(3): 862~866
- 13 C. Teisset, N. Ishii, T. Fuji *et al.*. Soliton-based pump-seed synchronization for few-cycle OPCPA [J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(17): 6550~6557
- 14 H. Zeng, J. Wu, H. Xu *et al.*. Generation of accurately synchronized pump source for optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **799**(12): 837~839
- 15 Xu Shixiang, Zhai Hui, Wu Kun *et al.*. Accurate all-optical synchronization of 1064 nm pulses with 794 nm femtosecond pulses for optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(6): 2487~2496