

文章编号 : 0253-2239(2001)10-1224-04

BBO-I 非共线光学参变啁啾脉冲放大增益带宽的实验研究*

杨晓东 徐至展 张正泉 彭家辉 冷雨星 王建安 金石绮

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学开放研究实验室, 上海 201800)

摘要: 以纳秒级调 Q 倍频的 Nd:YAG 激光器为抽运源、以自锁模钛宝石激光器输出并经光栅展宽的 800 nm 啁啾脉冲为信号光, 实验研究了其宽带 BBO-I 非共线相位匹配光学参变啁啾脉冲放大(OPCPA)的增益谱。研究结果表明, 非共线夹角的变化对 BBO-I 非共线相位匹配光学参变啁啾脉冲放大的增益谱有很大的影响。

关键词: 光学参变啁啾脉冲放大(OPCPA); 非共线夹角; 增益带宽

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

1 引言

进入 90 年代以来, 基于啁啾脉冲放大(CPA)的超短脉冲激光放大技术在台式钛宝石超强超短激光技术领域的应用给激光技术的发展带来了一次革命性的推动。但是受啁啾脉冲放大过程的增益窄化效应和钛宝石晶体生长尺寸的限制^[1,2], 台式钛宝石啁啾脉冲放大超强超短激光系统要进一步提高输出峰值功率已面临极大的困难。近年来, 国际上提出了一种全新的超强超短激光放大技术——光学参变啁啾脉冲放大(OPCPA)^[3]。这种技术不仅具有啁啾脉冲放大技术高增益的优点, 而且还具有光学参变放大(OPA)技术宽增益带的优点, 避免了放大过程的增益窄化。另外光学参变啁啾脉冲放大系统所采用的放大介质即非线性晶体的尺寸可以生长得很大(如 KDP 晶体的尺寸可以达到 30 cm 以上^[3])。在 Akira 等人报道的非共线光学参变放大实验中, 放大带宽达到了 2000 cm⁻¹^[4]。Cerullo 等人利用倍频钛宝石激光器抽运的 BBO-I 非共线光学参变放大, 产生了短至 7.2 fs 的超短脉冲输出^[5]。Ross 等人给出了一个光学参变啁啾脉冲放大激光系统方案设计, 其理论模拟结果表明, 利用三级光学参变啁啾脉冲放大器, 放大介质总长不到 5 cm, 就可以得到 4 × 10¹¹ 的小信号放大增益^[3]。另外, 光学参变啁啾脉冲放大过程中, 只在抽运光脉冲宽度的时间窗口内具有放大效应, 因此光学参变放大可以大大降低

激光脉冲的预脉冲。此外, 光学参变啁啾脉冲放大过程具有很低的 B 积分累积效应和较小的热畸变, 因此, 光学参变啁啾脉冲放大将完全可以替代现有的钛宝石再生放大器和多通放大器, 从而大大提高台式超强超短激光系统的峰值输出功率和激光的聚焦功率密度。

本文报道了我们在光学参变啁啾脉冲放大研究过程中的实验研究结果。实验中采用调 Q 倍频 YAG 激光器抽运的 BBO-I 非共线相位匹配光学参变放大, 对中心波长为 800 nm、光谱宽度(FWHM)为 36 nm 的啁啾脉冲进行了光学参变啁啾脉冲放大实验。研究结果表明, BBO-I 非共线光学参变啁啾脉冲放大(NOPCA)完全可以支撑大于 36 nm 的增益带宽, 且光学参变放大的非共线角即抽运光-信号光夹角对非共线光学参变啁啾脉冲放大的增益带宽影响非常明显。

2 理论分析

光学参变放大信号光的放大增益可以通过数值求解耦合波方程得到。假设在光学参变放大过程中不考虑抽运光衰减、光在晶体中的损耗以及群速度失配, 信号光的强度增益 G 可表示为^[6]:

$$G = 1 + (\gamma L)^2 (\sinh A / A)^2, \quad (1)$$

其中,

$$A = [(\gamma L)^2 - B^2]^{1/2},$$

$$B = \Delta k L / 2,$$

$$\gamma = 4\pi d_{\text{eff}} [I_p / (2\epsilon_0 n_p n_s n_i c \lambda_s \lambda_i)]^{1/2},$$

这里的 γ 为有效增益系数, 下标 s, i 和 p 分别表示

* 中国科学院知识创新重大项目经费资助课题。

收稿日期 2000-05-17; 收到修改稿日期 2000-09-07

信号光、闲散光和抽运光。 L 代表晶体的长度, I_p 为抽运光光强, d_{eff} 为晶体的有效非线性系数, $\Delta k = |\Delta k|$ 为光学参变放大过程的相位失配。

考虑 BBO 第一类非共线相位匹配, 对上述公式进行数值求解, 可以得出光学参变放大增益谱。

图 1 为 BBO-I 非共线光学参变啁啾脉冲放大在不同非共线夹角 α 下的增益光谱分布。这里采用 532 nm 光作为抽运光, 脉冲宽度为 6 ns, 信号光中心波长为 800 nm, 晶体长度为 13.5 mm, 抽运光光强为 200 MW/cm²。

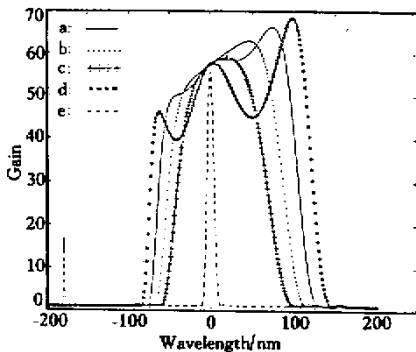


Fig.1 The OPA gain against the wavelength in BBO-I NOPCA configuration calculated for pump wavelength of 532 nm with pulse duration of 6 ns, pump intensity of 200 MW/cm², the signal centering at 800 nm, the crystal length of 13.5 mm and at (a) $\alpha = 41.5$ mrad, (b) $\alpha = 42$ mrad, (c) $\alpha = 42.5$ mrad, (d) $\alpha = 41$ mrad and (e) $\alpha = 30$ mrad

从图 1 中可以明显看出, 光学参变放大的非共线角 α 对信号光的增益谱的影响非常显著。图 1 中曲线 a 中的 α 为 41.5 mrad, 对应的增益带宽 (FWHM) 约为 180 nm。图 1 中曲线 b 和曲线 c 中的 α 则分别为 42 mrad 和 42.5 mrad, 从这两个图中的增益曲线可以看出, 它们的增益谱比曲线 a 中的增益谱具有更好的对称性, 更接近高斯分布, 但是它们的光谱宽度分别下降到 130 nm 和 115 nm。理论计算表明, 当 α 进一步减小时, 对应的增益带宽会更窄。图 1 曲线 d 中的 α 为 41 mrad, 这时光学参变放大在大约 210 nm 的光谱宽度范围内都具有较高的增益, 但是在增益谱上产生了严重的调制, 调制幅度超过了最大值的 50%。增益谱的这种严重调制对随后的脉冲压缩是极为不利的。理论计算还发现, 当 α 进一步减小时, 增益谱上的调制现象更加严重, 最后导致增益谱发生分裂, 如图 1 中曲线 e 所示, 当 α 减小到 28 mrad 时, 增益谱分裂为两部分, 增益带宽则变窄到约 3 nm~4 nm。因此, 在这种参

数条件下的非共线光学参变啁啾脉冲放大过程中, 应该选择 $\alpha = 41.5$ mrad 作为最佳非共线角。

3 实验研究及结果

实验装置如图 2 所示。

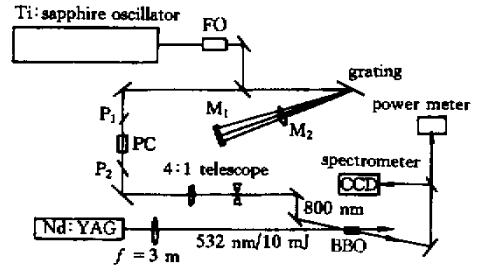


Fig. 2 Schematic of the experimental arrangement of BBO-I NOPCA. FO: Faraday Oscillator; M_1 ($R = 120$ cm) and M_2 ($R = -60$ cm) are spherical reflectors; PC: poekels cell; P_1 and P_2 : polarizers

用 8 W 氙离子激光器抽运的自锁模钛宝石激光器作为种子信号源, 中心波长为 800 nm, 输出脉冲的宽度约为 30 fs, 重复频率为 80 MHz, 光谱宽度约为 36 nm。该飞秒脉冲首先经过一个全反射式光栅展宽器进行脉冲展宽, 该脉冲展宽器包括两个共心放置的球面反射镜, 其中一个为凹面反射镜 (曲率半径 $R = -60$ cm), 另一个为凸面反射镜 (曲率半径 $R = 120$ cm) 光栅采用 1200 l/mm 的全息镀金光栅。该展宽器将钛宝石振荡器输出的飞秒脉冲展宽为 300 ps 左右的啁啾脉冲。然后利用一个普克尔盒单脉冲选择器从 80 MHz 的脉冲列中选出重复频率为 10 Hz 的脉冲, 并通过一个 4:1 的望远成像系统将光束进行缩孔后入射到非共线光学参变啁啾脉冲放大晶体上, 作为非共线光学参变啁啾脉冲放大的信号脉冲。实验中的抽运光来自一个倍频调 Q 输出的 Nd:YAG 激光器, 其重复频率为 10 Hz, 抽运光脉冲的能量为 10 mJ, 脉冲宽度为 6 ns (FWHM), 一个焦距为 $f = 3$ m 的会聚透镜将抽运光会聚到晶体上, 为避免抽运光对晶体造成破坏, 晶体放置于会聚光束焦点前面约 50 cm 处。抽运光的光强约为 200 MW/cm²。抽运光与信号光之间的时间抖动小于 1 ns, 确保晶体中信号光始终在抽运光的时间包络内。实验采用 BBO (CASIX) 晶体作为非共线光学参变啁啾脉冲放大介质, 晶体尺寸为 4 mm × 4 mm × 13.5 mm, 两个端面对 800 nm 和 532 nm 光镀增透膜。光学参变放大工作在 BBO 第一类 ($e \rightarrow o + o$) 非共线相位匹配条件下, 信号光与抽运光的夹

角为 41.5 mrad。放大后的信号光经分束后,分别用能量计和 CCD 光谱仪监测其能量和输出光谱,本实验中所用的光谱仪已经经过了定标校正,本文中给出的光谱曲线均为光谱的相对强度值。

图 3 为输入信号光的光谱测试曲线,其光谱宽度约为 36 nm。在非共线夹角 α 为 41.5 mrad,即最佳理论计算角时,我们成功地对信号脉冲进行了放大,放大增益为 55(与理论值 60 倍接近)。光谱测试显示,放大后的光谱宽度仍然约为 36 nm,如图 4 所示。与输入信号光光谱进行比较,放大过程没有出现光谱畸变。

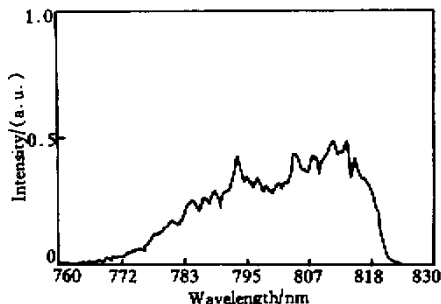


Fig. 3 The measured input signal spectrum (FWHM : 36 nm)

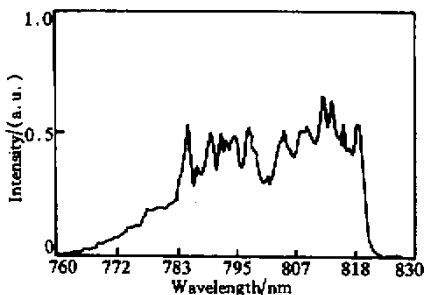


Fig. 4 The measured amplified signal spectra of BBO-I NOPCA with noncollinear angle $\alpha = 41.5$ mrad

为了与前面的理论计算结果比较,我们保持其他条件不变,改变非共线光学参变啁啾脉冲放大过程的非共线角 α ,并测量其放大光谱。当 α 增大 1 mrad 左右时,实验中并未发现光谱有明显变化,这是由于本实验中的信号光谱宽度(36nm)远小于光学参变放大支撑带宽的理论计算值(约 180 nm)。减小 α 角,放大信号光谱也未见明显变化;但当 α 角减小约 1 mrad,即 $\alpha = 41$ mrad 时,发现光谱开始产生畸变,如图 5 所示。继续减小 α 角,光谱开始变窄,当 α 角减小到约 30 mrad 时,放大信号光的带宽变窄到只有约 3 nm~4 nm,如图 6 所示。

在 Cerullo 等人的报道中指出,当非共线角变化 $\pm 0.5^\circ$ (± 8.7 mrad) 时,放大信号光的光谱带宽未

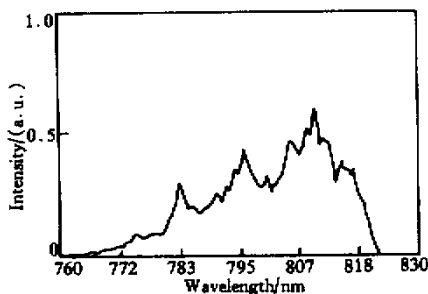


Fig. 5 The measured amplified signal spectra of BBO-I NOPCA with noncollinear angle $\alpha = 41$ mrad

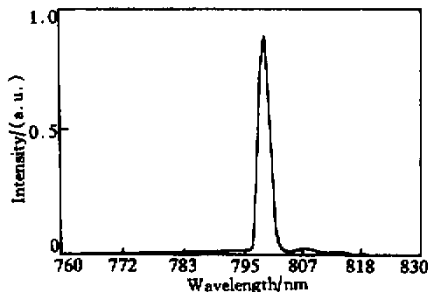


Fig. 6 The measured amplified signal spectra of BBO-I NOPCA with noncollinear angle $\alpha = 30$ mrad

见明显变窄^[7]。这是由于 Cerullo 等人的实验是采用飞秒脉冲作为抽运光,因此其抽运光光强可以达到几十 GW/cm^2 ,这样光学参变放大所用的晶体的厚度可以薄到只有 1 mm~3 mm,因此,其光学参变放大带宽远宽于我们所采用的纳秒光抽运的光学参变放大的带宽。然而飞秒脉冲抽运的光学参变放大中,由于抽运光的能量很低,最后得到的信号光能量一般只能到几百微焦耳的量级。而纳秒激光脉冲的能量可以达到几百甚至几千焦耳。因此可以采用大口径的非线性晶体作为光学参变放大介质,使输出激光脉冲的峰值功率达到 TW(10^{12} W)甚至 PW(10^{15} W)量级,从而创造极端超强超快光场条件,为强光学科学技术的重大前沿课题与许多相关的重要高技术应用与交叉学科领域的研究提供有力的实验工具。

结论 从实验上研究了以纳秒级调 Q 倍频的 Nd:YAG 激光器输出的 532 nm 激光脉冲为抽运光、以自锁模钛宝石激光器输出并经光栅对展宽的 800 nm 啁啾脉冲为信号光的宽带 BBO 第一类非共线光学参变啁啾脉冲放大。实验表明,在非共线光学参变啁啾脉冲放大过程中,改变非共线夹角,不仅会改变放大过程的增益谱宽,而且对增益谱的形状也会产生很大的影响。因此,在非共线宽带非共线

光学参变啁啾脉冲放大过程中,必须选择最佳的非共线夹角,从而得到最大的增益带宽,同时保持激光脉冲有较为理想的光谱形状。

参 考 文 献

- [1] Backus S, Durfee III C G, Murnae M M *et al.*. High power ultrafast lasers. *Review of Scientific Instruments*, 1998, **69**(3):1207~1223
- [2] 杨晓东, 张正泉, 徐至展. 钛宝石再生放大器实验研究. *光学学报*, 1998, **18**(9):1170~1173
- [3] Ross I N, Matousek P, Towrie M *et al.*. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers. *Opt. Commun.*, 1997, **144**(1):125~133
- [4] Akira S, Takayoshi K. Noncollinearly phase-matched femtosecond optical parametric amplification with a 2000 cm^{-1} bandwidth. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(2):147~149
- [5] Cerullo G, Nisoli M, Stagira S *et al.*. Sub-8-fs pulses from an ultrabroadband optical parametric amplifier in the visible. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(11):1283~1285
- [6] Sutherland R L. *Handbook of Nonlinear Optics*. New York: Marcel Dekker, 1996. 121~147
- [7] Cerullo G, Nisoli M, Silvestri S D. Generation of 11 fs pulses tunable across the visible by optical parametric amplification. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(25):3616~3618

Experimental Study on Bandwidth of BBO-I Noncollinear Optical Parametric Chirped Pulse Amplifier

Yang Xiaodong Xu Zhizhan Zhang Zhengquan Peng Jiahui Leng Yuxin
Wang Jian'an Jin Shiqi

(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 17 May 2000; revised 7 September 2000)

Abstract: BBO-I noncollinear optics parametric chirped pulse amplification pumped by a Q-switched and frequency-doubled Nd:YAG laser is studied experimentally. The signal is a chirped pulse at wavelength of 800 nm, which is obtained from a self-mode-locked Ti:sapphire laser and then is stretched by a grating pairs. The result shows that variation of the noncollinear angle can affect the gain spectrum significantly.

Key words: optics parametric chirped pulse amplification (OPCPA); noncollinear angle; gain bandwidth