

# 光纤激光器光参量啁啾脉冲放大现象\*

李晓莉<sup>1,2</sup>, 石顺祥<sup>1</sup>, 刘红军<sup>2</sup>, 王红英<sup>2</sup>, 赵卫<sup>2</sup>

(1 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

(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)

**摘 要:**实验研究了采用信号光在一块非线性晶体内被同一束泵浦光放大两次的结构来实现光参量啁啾脉冲放大过程中对参量荧光的控制, 实验得到了  $2 \times 10^6$  的双通总增益, 输出总能量为 2 mJ, 信号光能量晃动小于 3% rms, 此时参量荧光仅占输出总能量的 1%. 采用这种放大结构, 提高了短信号光与长泵浦光在时域上的匹配和转换效率, 抑制了参量荧光, 并提高了放大信号光的能量稳定性.

**关键词:**激光放大器; 参量振荡器与放大器; 超快激光; 超快技术

**中图分类号:** TN248.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)04-0667-4

## 0 引言

近年来, 随着强场物理、非线性光学等领域对高功率激光源的需求, 光参量啁啾脉冲放大 (Optical Parametric Chirped Pulse Amplification, OPCPA) 系统得到很大的发展<sup>[1-10]</sup>. OPCPA 的概念是 1992 年 Dubietis 等人提出的, 是结合了光参量放大技术与啁啾脉冲放大系统的一种新技术. 与其他同类的技术相比, OPCPA 具有高单通增益, 宽增益带宽, 放大过程中无增益窄化现象, 高输出光束质量, 低热损耗以及 B 积分, 高信噪比以及低预脉冲等特点, 故已成为代替 CPA 技术产生高功率激光源的一个重要手段.

在 OPCPA 系统中, 目前还存在两个问题有待解决: 一是如何提高泵浦光的能量向信号光与闲频光的转换效率; 二是入射抑制在参量放大过程中参量荧光对放大过程的影响. 提高泵浦光的转换效率, 要使信号光与泵浦光在时域与空域上很好得匹配, 且放大过程在完全相位匹配的条件下, 做到单通增益最大. 目前, 主要采用以下方法来抑制放大过程中参量荧光的产生: 1) 在保证足够输出能量的条件下降低参量增益; 2) 优化信号光与泵浦光的时域和空域的匹配; 3) 在各级放大之间插入空间滤波器<sup>[11-14]</sup>.

本文实验研究了以被动锁模光纤激光器为种子源的双通光参量啁啾脉冲放大器. 实验过程中, 采用信号光在一块非线性晶体内被同一束泵浦光放大两次, 且两次放大过程中信号光与泵浦光均在有效

非线性系数最大的平面内的方法来提高信号光与泵浦光在时域上的匹配来提高转换效率和有效的抑制参量荧光的产生. 实验得到了  $2 \times 10^6$  的双通总增益, 输出总能量为 2 mJ, 信号光能量晃动小于 3% rms, 此时参量荧光仅占输出总能量的 1%.

## 1 实验结构

光参量啁啾脉冲放大实验原理如图 1. 信号源为自行研制的掺镱自启动被动锁模光纤激光器, 重复频率为 3.8 MHz, 中心波长为 1 053 nm, 带宽为 6 nm. 为了实现信号光与泵浦光在时域上的匹配, 掺镱自启动被动锁模光纤激光器省略了一对腔外色散补偿光栅, 此时信号光的输出脉宽为 336 ps 的啁啾脉冲. 信号光经过普克盒选单后成为 10 Hz 的信号光, 然后缩束为直径 2 mm 的光束入射到放大晶体中. 双通光参量啁啾脉冲放大器中的信号光与泵浦光的时域分布如图 2(a). 信号光在  $T_1$  时刻被泵浦光第一次放大, 放大后的信号光被反射镜 1~4 反射回非线性晶体中在  $T_2$  时刻被泵浦光放大第二次. 被第一次放大后的信号光在被反射回非线性晶体时所走的总的光程应该尽量的小, 以很好得实现信号光与泵浦光的在时域上匹配, 即  $T_1$  和  $T_2$  时刻的间隔也应该尽量的小. 双通放大的信号光与泵浦光在空间上的分布如图 2(b). 从图中可以看出, 双通放大的信号光和泵浦光均在泵浦光和光轴所确定的平面内 (在此平面内, 有效非线性系数最大), 在水平方向, 两次信号光的传输位置不完全重合; 在垂直方向上, 两次信号光传输方向完全平行, 这就保证了两通放大的信号光与泵浦光的相位匹配角和非共线角完全相同, 而且同时作用在有效非线性系数最大的平面内. 图 3 给出了利用放大转换方程计算出的在泵浦光强  $350 \text{ mW/cm}^2$  时的参量荧光的产生的灰

\* 国家自然科学基金 (60408002、60678013、60537060) 和陕西自然科学基金 (2004F02) 资助  
Tel: 029-88209243 Email: lxl8201@sohu.com  
收稿日期: 2007-09-16

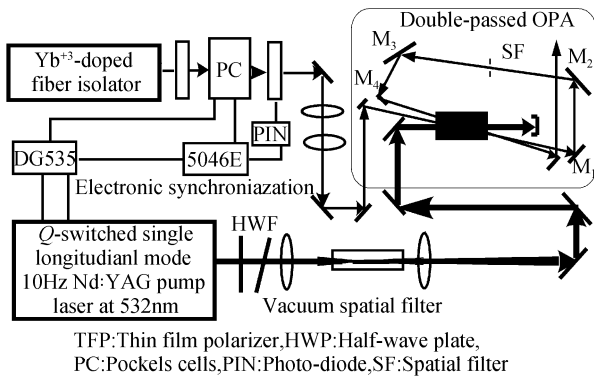


图1 基于掺镱锁模光纤激光器的光参量啁啾脉冲放大实验原理

Fig. 1 Experimental setup of the non-collinear OPCPA laser system based on fiber laser

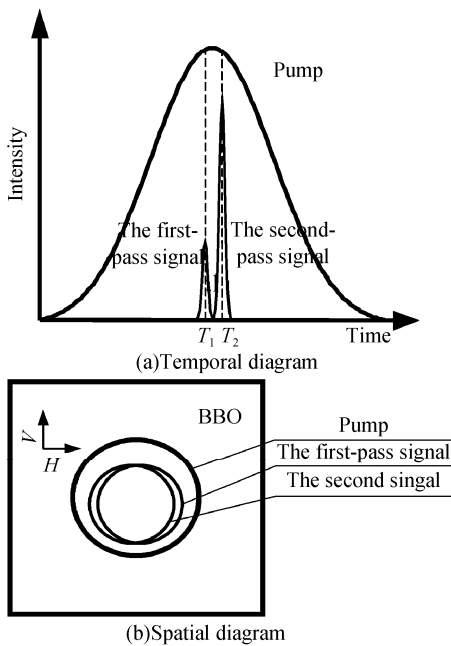


图2 双通光参量啁啾脉冲放大器的两通信号光与泵浦光时域与时空的示意图

Fig. 2 Temporal and spatial diagram of double-pass OPCPA in the second stage

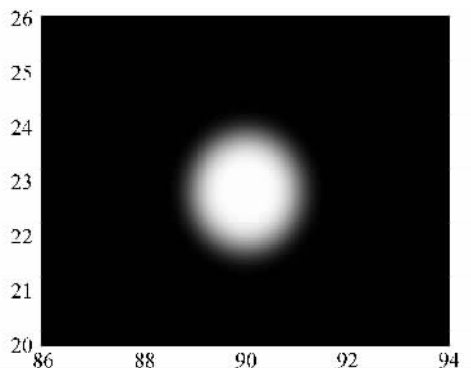


图3 由转换方程计算出的参量荧光的灰度图,  $\phi=22.8^\circ$  ( $\lambda_p=532\text{ nm}$ ,  $\lambda_s=1\ 064\text{ nm}$ )

Fig. 3 ATF of the OPF in the BBO crystal,  $\phi=22.8^\circ$  ( $\lambda_p=532\text{ nm}$ ,  $\lambda_s=1\ 064\text{ nm}$ )

度环. 从图3可以看出,在准相位匹配条件下,参量荧光方向和泵浦光重合的一个发散的锥体,在通常

的参量放大过程中,只有在信号光与泵浦重合的部分,信号光被放大,泵浦光未被利用的地方产生了荧光,而本文中则是利用泵浦光在第一通放大后未被利用的能量进行第二通放大,有效的提高了信号光与泵浦光在时域上的匹配,故有效的抑制了参量荧光的产生.

泵浦光为美国 continuum 公司生产的单纵模调 Q 激光器产生的倍频光,中心波长为 532 nm,脉宽为 6 ns,光斑直径为 8 mm,输出总能量为 800 mJ. 本文采用能量为 150 mJ, 缩束为直径为 3 mm 的光束直接入射到一级放大晶体中去放大信号光,此时,泵浦光的泵浦功率为 350 mW/cm<sup>2</sup>.

实验中晶体采用福建福晶公司生产的 BBO 晶体,该晶体具有高的非线性系数,适用于小信号放大的 OPCPA 系统中. 为了获得高的有效非线性系数,晶体切割角为 22.86°,非共线角为晶体内 0.67°,晶体外为 1.1°以补偿作物寻常光的泵浦光在晶体中的走离,晶体尺寸为 6×6×16 mm<sup>3</sup>. 晶体均安装在一个可以精密调整的三维调整架上,以便调节相位匹配角和非共线角,很好进行参量放大.

实验中,时间的控制均由普克盒和电子脉冲延迟器来控制,此时,信号光与泵浦光之间的时间晃动小于±0.5 ns.

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 放大增益与泵浦光强的关系

本文首先测量了如图4的放大增益与泵浦功率之间的关系. 放大增益定义为输出信号光能量除以输入信号光能量. 基于被动锁模光纤激光器的双通光参量啁啾脉冲放大器的放大增益时通过能量计来测量的. 入射信号能量为 1 nJ,当泵浦光强为 350 mW/cm<sup>2</sup>时,放大信号总增益为~2×10<sup>6</sup>,此时放大信号光能量为 2 mJ,能量晃动小于 3%,此时已经进入饱和放大区.

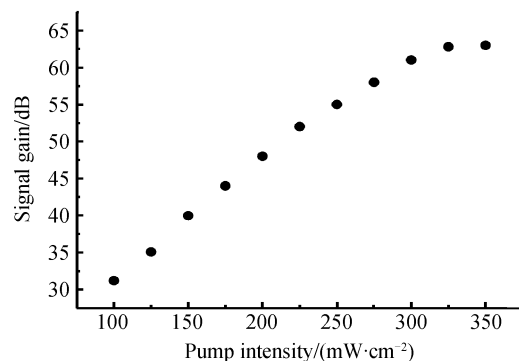


图4 放大信号光增益与泵浦光强之间的关系

Fig. 4 Experimental gain of the amplifier versus the pump pulse intensity

实验过程中发现在 OPCPA 过程中,泵浦光强为  $350 \text{ mW/cm}^2$  时,当信号光被放大到  $2 \text{ mJ}$  时,参量荧光仅占输出信号光的  $1\%$ . 这主要是因为引入了两通放大后,提高了信号光与泵浦光在时域上的匹配,同时在二通放大过程中,信号光已经进入饱和和放大区,其能量有了很大的加强,从而有利于参量荧光的抑制,同时信号光的能量稳定性提高了.

## 2.2 输入输出信号光光谱

图 5 给出了入射信号光,放大信号光达到  $2 \text{ mJ}$  时的光谱以及此时的闲频光光谱. 从图 5 中可以看出,入射光谱(实线)谱宽为  $6 \text{ nm}$ (FWHM),放大信号光(虚线)光谱为  $8 \text{ nm}$ (FWHM),放大信号光光谱比入射信号光光谱平坦,且半高宽宽,同时信号光光谱中心向短波方向移动. 光谱加宽这是由于在二级放大中,信号光已进入到饱和放大区,此时,信号光增益不是很大,但能量有明显增加,此时的信号光光谱会加宽光谱形状明显改好.

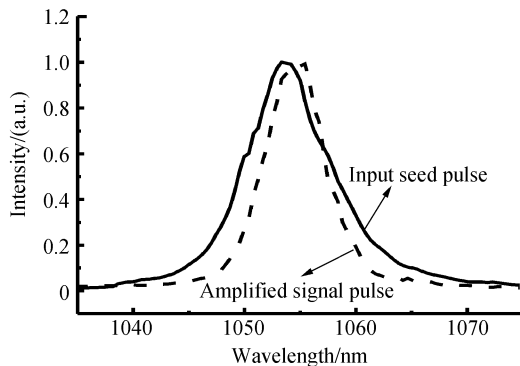


图 5 测量的输入和放大的信号光光谱

Fig. 5 Measured spectra of input seed pulse and amplified signal pulse

## 3 结论

本文实验研究了以掺镱自启动被动锁模光纤激光激光器为种子源,用单纵模调 Q 激光器为泵浦源的非共线双通光参量啁啾脉冲放大器,得到能量为  $2 \text{ mJ}$  的信号光,总增益为  $2 \times 10^6$ ,放大信号光能量晃动小于  $3\%$  rms,荧光仅占总输出能量的  $1\%$ . 实验结果表明:采用光纤激光器为种子源的新型双通光参量啁啾脉冲放大结构具有结构紧凑、成本低、增益大、能量稳定和荧光小等优点,是 PW 和 TW 系统的一个很好的前端.

### 参考文献

[1] DUBIETIS A, JONUŠAUSKAS G, PISKARSKAS A. Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal[J]. *Opt Commun*, 1992, **88**(4-6): 437-440.

[2] ROSS I N, COLLIER J L, MATOUSEK P, *et al.* Generation of terawatt pulses by use of optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(15): 2422-2427.

[3] LIU Hong-jun, ZHAO Wei, YANG Yan-long, *et al.* Matching of both group-velocity and pulse-front for ultrabroadband three-wave-mixing with noncollinear angularly dispersed geometry[J]. *Appl Phys B*, 2006, **82**(4): 585-594.

[4] WITTE S, ZINKSTOK R T, HOGERVORST W, *et al.* Generation of few-cycle terawatt light pulses using optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Opt Express*, 2005, **13**(13): 4903-4908.

[5] XIONG Hong-jun, ZAO Wei, CHEN Guo-fu. The principle and optimized design of a stretcher in OPCPA system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1441-1444.  
熊红军,赵卫,陈国夫.用于 OPCPA 展宽器的原理和优化设计[J]. *光子学报*, 2004, **33**(12): 1441-1444.

[6] LOZHKAREV V V, FREIDMAN G I, GINZBURG V N, *et al.* 200 TW 45 fs laser based on optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(1): 446-454.

[7] KIRIYAMA H, INOUE N, AKAHANE Y, *et al.* Prepulse-free, multi-terawatt, sub-30-fs laser system[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(1): 38-445.

[8] JOVANOVIĆ I, COMASKEY B J, EBBERS C A, *et al.* Optical parametric chirped-pulse amplifier as an alternative to Ti:Sapphire regenerative amplifiers[J]. *Appl Opt*, 2002, **41**(15): 2923-2929.

[9] ZHANG Rui-bao, LIU Hong-jun, YANG Yan-long, *et al.* Research of two-pump optical parametric amplification using photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8): 1137-1141.  
张瑞宝,刘红军,杨延龙,等.双泵浦光子晶体光纤参量放大研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(8): 1137-1141.

[10] WANG Hong-ying, LIU Hong-jun, LI Xiao-li, *et al.* Non-collinear CPOPA seeded by an Yb<sup>3+</sup>-doped self-starting passive mode-locked fiber laser[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(8): 4493-4498.

[11] ZINKSTOK R T, WITTE S, HOGERVORST W, *et al.* High-power parametric amplification of 11.8-fs laser pulses with carrier-envelope phase control[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(1): 78-80.

[12] ISHII N, TURI L, YAKOVLEV V S, *et al.* Multimillijoule chirped parametric amplification of few-cycle pulses[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(5): 567-569.

[13] STEPANENKO Y, RADZEWICZ C. High-gain multipass noncollinear optical parametric chirped pulse amplifier[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **86**(21): 211120-211123.

[14] STEPANENKO Y, RADZEWICZ C. Multipass non-collinear optical parametric amplifier for femtosecond pulses [J]. *Opt Express*, 2006, **14**(2): 779-785.

## Control of Superfluorescence for the Optical Parametric Chirped Pulse Amplifier Based on Fiber Laser

LI Xiao-li<sup>1,2</sup>, SHI Shun-xiang<sup>1</sup>, LIU Hong-jun<sup>2</sup>, WANG Hong-ying<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>2</sup>

(1 School of Technique Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

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

Received date: 2007-09-16

**Abstract:** By using a novel double-pass optical parametric chirped pulse amplifier in a single nonlinear crystal, control of the superfluorescence was studied for the optical parametric chirped pulse amplifier based on fiber laser. Net saturated gain of  $2 \times 10^6$  has been achieved and the superfluorescence is obviously decreased to less than 1% of the total output pulse energy when the signal is amplified to 2 mJ with rms fluctuations of less than 3% which is saturated after the amplifier. By this scheme, the superfluorescence is effectively constrained and the stability of the signal is greatly increased.

**Key words:** Laser amplifiers; Parametric oscillators and amplifiers; Ultrafast lasers; Ultrafast technology



**LI Xiao-li** was born in 1974. She obtained her Master's degree in physics electronics from Xidian university in 2004. Since then, she has been studying for her Ph. D. degree at Xidian University. Her research interests focus on high power laser technology and applications, ultra-fast pulses, cascaded nonlinear processes and all optical signal processing.