

# 参量荧光脉宽的理论实验研究

王波鹏<sup>1,2,3</sup> 栗敬钦<sup>2,3</sup> 曾小明<sup>2,3</sup> 王晓东<sup>2,3</sup> 王 逍<sup>2,3</sup> 周凯南<sup>2,3</sup>  
郭 仪<sup>2,3</sup> 朱启华<sup>2,3</sup> 景 峰<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学技术大学光学与光学工程系, 安徽 合肥 230026

<sup>2</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

<sup>3</sup>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** 参量荧光是基于光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术的光参量放大器的本征量子噪声。它不具备与主激光相同的时域啁啾特性,在压缩器中形成不可压缩的脉冲底座,降低了激光脉冲的信噪比。在小信号增益情况下,基于解析公式给出了不同抽运波形、不同增益、不同系统带宽和啁啾率情况下参量荧光脉宽的演化规律。结果表明:单级放大器输出荧光脉宽正比于抽运光脉宽;荧光脉宽随着增益的增大而变小;增益一定的情况下,荧光脉宽随着超高斯波形阶数的增大而变大。对OPCPA系统而言,展宽-压缩系统对荧光存在色散展宽的作用,其最终输出荧光脉宽与系统带宽、啁啾率紧密相关。基于拍瓦OPCPA(PW-OPCPA)实验平台进行了相关的验证实验,实验结果与理论具有良好的一致性。

**关键词** 非线性光学;光参量啁啾脉冲放大;光参量放大器;荧光脉宽

**中图分类号** O437 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0519001

## Theoretical and Experimental Study on Parametric Fluorescence Pulse Width

Wang Bopeng<sup>1,2,3</sup> Su Jingqin<sup>2,3</sup> Zeng Xiaoming<sup>2,3</sup> Wang Xiaodong<sup>2,3</sup> Wang Xiao<sup>2,3</sup>  
Zhou Kainan<sup>2,3</sup> Guo Yi<sup>2,3</sup> Zhu Qihua<sup>2,3</sup> Jing Feng<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

<sup>2</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

<sup>3</sup>Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** Parametric fluorescence is the intrinsic quantum noise of optical parametric amplifiers based on optical parametric chirped pulse amplification(OPCPA) technology. It does not have the same temporal chirp characteristics with the main laser, forms an incompressible pulse base in the compressor, and reduces the signal-to-noise ratio of the laser pulse. In the case of small signal gain, the evolution laws of parametric fluorescence pulse width with different pump profiles, gains, system bandwidths and chirp rates are given based on the analytical formula. Results show that the single stage amplifier output fluorescence pulse width is proportional to the pump pulse width, and it decreases with the gain increasing. With a constant gain, the fluorescence pulse width becomes larger with the increase of the super Gaussian wave order. For OPCPA system, the stretch-compression system has the effect of dispersion broadening, so the final output fluorescence pulse width is closely related to the system bandwidth and chirp rate. Based on petawatt OPCPA (PW-OPCPA) experimental platform, the relevant verification experiments are carried out, and the experimental results are in good agreement with the theoretical results.

**收稿日期:** 2015-12-21; **收到修改稿日期:** 2016-01-21

**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,主要从事超短超强激光脉冲方面的研究。E-mail: wbp@mail.ustc.edu.cn

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

E-mail: jingfeng09@sina.cn(通信联系人)

**Key words** nonlinear optics; optical parametric chirped pulse amplification; optical parametric amplifiers; fluorescence pulse width

**OCIS codes** 190.4970; 260.2510; 320.7110; 320.5550

## 1 引 言

光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)<sup>[1-2]</sup>技术是实现数拍瓦(PW)超短超强激光的重要途径之一。由于其具备高增益、宽带宽、高信噪比和无热加载效应等优点,OPCPA技术被广泛运用于各种超短超强激光装置<sup>[3-8]</sup>。基于此种技术的数拍瓦超短超强激光器已经研制成功或正在研制中<sup>[9-13]</sup>。基于该技术的光参量放大器具有一种本征量子噪声——参量荧光(OPF)<sup>[14]</sup>。参量荧光起源于真空量子振荡,在光参量放大器中与主激光一起进行能量放大。由于其不具备与主激光脉冲相同的时域啁啾性质,从而在压缩器中形成不可压缩的脉冲底座,降低了信噪比<sup>[15]</sup>。信噪比是指在一定时域范围内(通常是主激光脉冲前)的最大光强度与主激光光强度的比值,它是衡量超短超强脉冲的重要指标之一。对于低信噪比的脉冲,其前沿预脉冲或者脉冲底座与实验靶丸形成预等离子,从而在主激光到来之前改变了靶丸的物理性质,导致物理实验失败。

针对OPCPA技术信噪比的研究已经很多,包括参量荧光底座<sup>[14-18]</sup>、抽运光放大自发辐射(ASE)引入的非相干脉冲底座<sup>[19-20]</sup>、表面反射引入的前沿预脉冲<sup>[21]</sup>、高阶色散导致的压缩预脉冲等。对于参量荧光的研究,有学者给出了相应的数值模拟方法<sup>[15-16]</sup>、能量表达式<sup>[18]</sup>以及抑制荧光的一些方法<sup>[22]</sup>。由于信噪比是在一定时间范围内的光强度比值,参量荧光的脉宽越短,该时间范围之外的信噪比就越高,所以针对参量荧光脉宽演化规律的研究非常有意义。它能够给出不同条件下系统输出参量荧光的时域范围,确定荧光影响信噪比的时域范围,能够给出优化荧光脉宽以及信噪比的方式。现阶段的研究中,已经给出高斯抽运下单级光参量放大器(OPA)输出的荧光脉宽<sup>[18]</sup>。但是对于高能OPA而言,其抽运时域波形大部分都采用超高斯的平顶脉冲,这样有利于获得更好的带宽-效率积,有利于抑制参量荧光,获得更高的信噪比。对OPCPA系统而言,其最终影响信噪比的荧光脉宽并不是完全由单级OPA确定。作为OPCPA系统的重要组成部分,展宽器、压缩器等一些色散系统对荧光时域脉宽的影响非常显著。

本文在小信号增益情况下,基于荧光的强度表达式引入含时分布的抽运光,给出参量荧光在不同抽运条件下的脉宽表达式。进一步加入展宽-压缩系统色散的影响,给出了整个OPCPA系统输出参量荧光脉宽的表达式。基于此表达式,计算研究了在不同抽运波形、不同增益、不同系统带宽以及啁啾率条件下输出的荧光脉宽及其演化规律。基于激光聚变研究中心的PW-OPCPA平台进行了相应的验证实验,结果表明实验结果与理论分析一致。

## 2 理论分析

### 2.1 参量荧光脉宽在OPA放大器中的演化

基于能流的场量子化与线性化方法,Wang等<sup>[18]</sup>给出了输出荧光强度的表达式

$$I_{\text{opf}} \propto \exp(2\Gamma l), \quad (1)$$

式中 $I_{\text{opf}}$ 是荧光的输出光强, $\Gamma = d_{\text{eff}} \sqrt{8\pi^2 I_p / (\epsilon_0 c n_s n_i n_p \lambda_s \lambda_i)}$ 是增益因子, $l$ 是晶体长度, $d_{\text{eff}}$ 是有效非线性系数, $I_p$ 是抽运光强度, $\epsilon_0$ 是真空介电常数, $c$ 是真空中光速, $n_s$ 、 $n_i$ 、 $n_p$ 分别是信号光、闲频光、抽运光的折射率系数, $\lambda_s$ 、 $\lambda_i$ 分别是信号光、闲频光的中心波长。(1)式表明,在小信号增益情况下,能够满足相位匹配的荧光光子是按照指数形式进行能量增益的。由于 $I_p$ 实际是时域分布的,根据实际的OPA抽运光时间波形,引入高斯和超高斯时间波形

$$I_p = I_{p0} \exp[-(t/t_{p0})^{2m}], \quad (2)$$

式中 $I_{p0}$ 是 $t=0$ 时刻的抽运光强度, $t_{p0} = \Delta t_p / [2(\ln 2)^{1/2m}]$ 是抽运光的脉宽, $\Delta t_p$ 是抽运光的半峰全宽(FWHM), $m$ 是高斯波形的阶数。将(2)式代入(1)式,并根据脉冲强度半峰全宽的定义,得到单级OPA输出荧光的脉宽

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta t_p}{(\ln 2)^{1/2m}} \left\{ -2 \ln \left[ 1 - \frac{\ln 2}{\ln(4G_0)} \right] \right\}^{1/2m}. \quad (3)$$

式中  $G_0$  是  $t=0$  时刻的增益。当  $m=1$  时,便能得到在高斯抽运情况下荧光输出的脉宽公式,(3)式与文献[18]中(26)式相同。由(3)式可见,影响荧光时域脉宽的主要因素有 3 个:抽运光脉宽、超高斯光阶数以及 OPA 增益。在满足相位匹配条件的情况下,不同频率的荧光在每个抽运光的时间和空间点上都能够产生并且得到放大<sup>[18]</sup>。抽运光脉宽越宽时,能够产生和放大荧光的时域宽度也越宽。因此,在抽运光时间波形以及最大增益一定的情况下,荧光的脉宽正比于抽运光的脉宽。

根据(3)式,给出如图 1 所示的单级 OPA 输出荧光脉宽与增益、超高斯波形阶数的关系。根据实际 OPA 的增益范围和抽运时间波形,给出了  $10^2 \sim 10^8$  的大动态范围增益、1~5 阶超高斯抽运光情况下输出的荧光脉宽。对于同一种抽运的时间波形而言,荧光的脉宽随着增益的增大而变小。其原因在于抽运光时域中心处增益最强,随着增益的增大,中心处与附近时域点的增益差别加大。输出荧光强度正比于增益,其中心强度与附近的强度差别变大,由此出现荧光脉宽随着增益增大而变小的演化规律。在相同增益情况下,荧光脉宽随着超高斯抽运光阶数的上升变大,这是由于随着超高斯阶数的上升,抽运光逐渐由高斯光向平顶光转变。抽运光中心处与附近时域点的光强差别变小,中心处与附近时域点的增益差别变小,而荧光强度正比于增益,因此输出荧光脉宽变大。

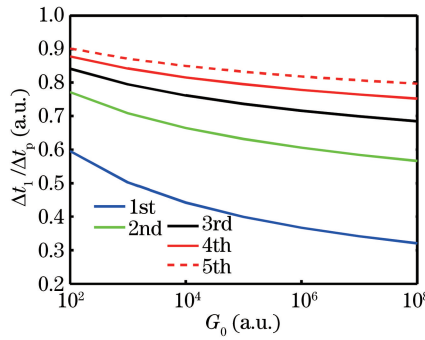


图 1 单级 OPA 输出参量荧光脉宽与增益、超高斯波形阶数的关系

Fig. 1 Single stage OPA output parameter fluorescence pulse width versus gain and super Gaussian wave order

## 2.2 OPCPA 系统输出荧光脉宽

OPCPA 系统组成部分不仅有 OPA 放大级,还有展宽-压缩系统等。展宽器的主要作用是将脉冲进行时域展宽,降低脉冲的峰值功率密度,在低于放大介质损伤阈值的情况下,主激光脉冲进行能量放大。压缩器是与展宽器色散匹配的装置,其作用是对主激光进行时域压缩,形成变换极限的超强超短脉冲。对于 OPCPA 系统,必须考虑展宽-压缩系统对荧光的影响,这里只考察它们对荧光脉宽的影响。

种子脉冲被展宽器进行时域展宽之后,形成的是具有线性啁啾特性的主激光。当主激光在 OPA 放大级中进行能量放大时,参量荧光生成并且与主激光一同放大。在压缩器中,主激光的线性啁啾被补偿得到变换极限脉冲,而荧光由于不具有上述线性啁啾而被色散展宽。这里只考虑线性啁啾带来的影响,因为高阶色散远小于线性啁啾对脉宽的影响。假定啁啾率为  $C$ ,荧光的带宽为  $\Delta\lambda_{\text{opf}}$ ,其被色散展宽所增加的时域长度为

$$\Delta t_2 = C\Delta\lambda_{\text{opf}} \quad (4)$$

忽略高阶色散的影响时,色散展宽所增加的时域长度由 OPCPA 系统最终输出的荧光带宽与啁啾率决定。OPA 直接输出的荧光带宽  $\Delta\lambda_{\text{opf}}$  取决于 OPA 的相位匹配条件,其等于 OPA 的增益带宽。OPCPA 最终输出的荧光不仅取决于  $\Delta\lambda_{\text{opf}}$ ,还取决于系统带通  $\Delta\lambda_{\text{sys}}$ 。当设计的 OPA 增益带宽大于系统带通时,系统的光谱剪切作用使系统输出的荧光带宽等于系统带通;当系统带通大于 OPA 的增益带宽时,系统输出的荧光带宽等于 OPA 的增益带宽。实际设计 OPA 时,通过增益带宽公式可以直接计算出 OPA 增益带宽,将其与设计的系统带通比较,得到 OPCPA 系统输出的荧光带宽。引入  $\Delta\lambda = \min[\Delta\lambda_{\text{sys}}, \Delta\lambda_{\text{opf}}]$  来代替(4)式中的  $\Delta\lambda_{\text{opf}}$ 。基于(4)式,给出在不同啁啾率和带宽情况下的展宽量(见图 2)。由图 2 可知,输出荧光脉宽的展宽量与啁啾率、带宽成正比。结合(3)式与(4)式,得到 OPCPA 系统输出荧光的脉宽

$$\Delta t_{\text{opf}} = \frac{\Delta t_p}{(\ln 2)^{1/2m}} \left\{ -2 \ln \left[ 1 - \frac{\ln 2}{\ln (4G_0)} \right] \right\}^{1/2m} + C\Delta\lambda \quad (5)$$

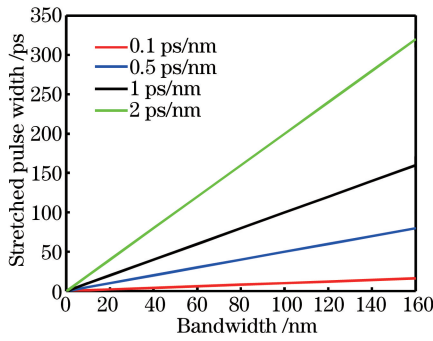


图 2 线性啁啾展宽对荧光脉宽的影响

Fig. 2 Influence of linear chirp broadening on fluorescence pulse widths

(5)式表明,OPCPA 系统最终输出的荧光脉宽取决于增益、抽运时间波形、抽运脉宽、啁啾率、系统带通与荧光带宽的最小值。色散展宽所增加的时间长度取决于啁啾率和荧光带宽,在增益、抽运光脉宽一定的情况下,抽运光时间波形的改变使荧光的时间波形改变,荧光光谱带宽不变。荧光带宽由 OPA 的增益、相位匹配决定,它等于 OPA 的增益带宽。荧光的时间波形与光谱没有线性啁啾特性。因此,在 OPA 传播放大过程中,荧光不会出现由于抽运波形改变而导致光谱剪切的现象,抽运光时间波形的改变并不会改变荧光光谱带宽。值得注意的是:在抽运光时间波形改变之后,为了得到不同的 OPA 能量转化效率及主激光带宽,需要优化主激光与抽运光的脉宽比,进而优化啁啾率,这使得由于色散展宽所增加的时间长度改变。这方面的研究涉及到增益、转化效率、主激光带宽和脉宽比优化,是在不同抽运波形条件下对脉宽比、啁啾率的优化研究。这里不作深入展开,仅着重考察直接影响荧光脉宽的因素及其实验验证,暂不考虑不同抽运时间波形所导致啁啾率的优化问题。

### 3 实验结果

基于激光聚变研究中心的 PW-OPCPA 装置进行了相应的荧光脉宽实验。实验光路示意图如图 3 所示。种子脉冲经过啁啾率为  $-1 \text{ ps/nm}$  的光栅对(光栅密度为  $1500 \text{ mm}^{-1}$ ,入射角为  $65^\circ$ ,光栅间距为  $18 \text{ cm}$ )展宽后,形成脉宽  $60 \text{ ps}$  的主激光,进入第 1 级高增益 OPA 进行能量放大,之后又被啁啾率为  $40 \text{ ps/nm}$  的纳秒 Öffner 展宽器再次时域展宽到  $2.4 \text{ ns}$ ,主激光在第 2 级和第 3 级 OPA 放大级中进行放大,在啁啾率为  $-39 \text{ ps/nm}$  的压缩器中进行时域压缩,形成变换极限脉冲。荧光实验基于第 1 级 OPA 放大级,主要原因是该级 OPA 增益达到  $10^8$ ,所产生的荧光能量最大,经过系统传输能够在压缩器之后测到荧光的时间波形。荧光实验分为 2 部分:第 1 部分基于第 1 级 OPA,挡住主激光,在主激光光路上测量在不同增益下输出的荧光脉宽,验证增益与荧光脉宽的关系,结合本实验与国外已有的实验结果,验证时间波形与荧光脉宽的关系;第 2 部分是限制 Öffner 展宽器的带通,测量不同带宽情况下系统输出荧光的脉宽,验证理论公式的正确性。

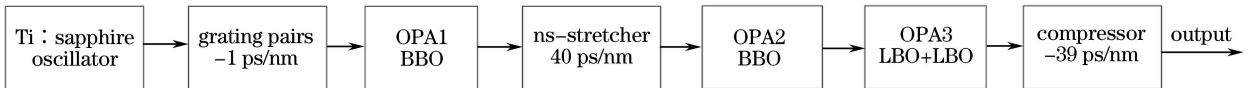


图 3 PW-OPCPA 实验光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of PW-OPCPA experimental light path

#### 3.1 单级 OPA 输出荧光脉宽实验

第 1 级 OPA 由  $1.5 \text{ cm}$  的 BBO 晶体组成,其相位匹配角为  $24.05^\circ$ ,抽运光中心波长为  $527 \text{ nm}$ ,主激光中心波长为  $800 \text{ nm}$ ,非共线角为  $2.45^\circ$ 。抽运光为 2 阶超高斯波形,脉宽为  $200 \text{ ps}$ ,能量为  $15 \text{ mJ}$ ,光斑直径为  $2 \text{ mm}$ 。主激光注入能量为  $1 \text{ nJ}$ ,脉宽为  $60 \text{ ps}$ ,光斑直径为  $5 \text{ mm}$ 。通过降低主激光注入的能量,保证该级 OPA 运行在小信号增益条件。测量了不同抽运能量情况下主激光的输出能量,计算出所对应的小信号增益。挡住主激光,利用一个  $25 \text{ GHz}$  的示波器(WaveMaster825Zi, LeCroy)测量不同抽运能量条件下输出的荧光时间波形,得到荧光的输出脉宽,如图 4 所示。从图 4(b)中可以看到,由(3)式给出的输出荧光脉宽(蓝线)与实验值(红圈)基本

吻合。验证了在 2 阶高斯波形抽运、大动态增益范围情况下实验荧光脉宽与理论相符。结合国外已有的实验<sup>[23]</sup>,在不同抽运波形条件下对输出的荧光脉宽进行了验证。文献[23]中,抽运波形是 1 阶高斯波形,增益为  $1.5 \times 10^5$ ,实验测得的荧光脉宽为 2.1 ps。根据(3)式得到的理论值为 2.34 ps,与实验相符。至此验证了在不同增益、不同抽运时间波形条件下输出荧光脉宽的理论公式,得到了与实验相符的结果。

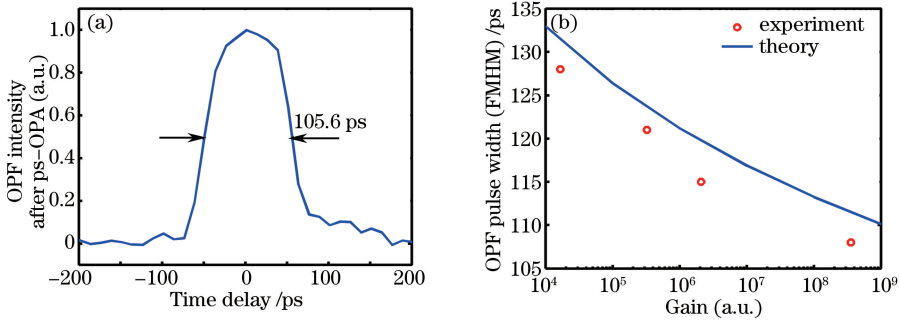


图 4 (a)单级 OPA 输出荧光时间波形(增益为  $3 \times 10^8$ );(b)不同增益下的荧光脉宽

Fig. 4 (a) Single stage OPA output fluorescence time waveform (gain is  $3 \times 10^8$ );

(b) fluorescence pulse widths under different gains

### 3.2 OPCPA 系统输出荧光脉宽实验

第 2 部分是不同系统带通条件下 OPCPA 系统输出荧光脉宽实验。基于第 1 级 OPA,在压缩器之后通过示波器测量荧光的时间波形,得到输出荧光的脉宽。通过遮挡 Öffner 展宽器凹面镜前不同的部分改变展宽器的带通。挡住主激光,在第 1 级 OPA 增益为  $10^8$  条件下分别改变系统带通,得到如图 5 所示的荧光时间波形、光谱以及脉宽与带通的关系。由图 5 可知系统输出的荧光脉宽比单级 OPA 输出的值大,原因在于系统色散对其的展宽。对于主激光,为了得到变换极限脉冲,系统的净色散量为 0。而对于产生于 OPA 放大级的荧光,其系统净色散量并不为 0。实验基于第 1 级 OPA 产生的荧光,它在该级放大级之后的纳秒展宽器、压缩器中传输,净色散量为 1 ps/nm。根据(4)式,该荧光被展宽,展宽量受到系统带宽与荧光带宽的双重限制。PW-OPCPA 系统带宽为 60 nm,在不限带通的情况下系统输出荧光脉宽的理论值为 175 ps,而实验值为 170 ps。在限制系统带宽为 30 nm 时,荧光输出时间波形、光谱如图 5(a)、(b)所示,脉宽为 130.2 ps,而理论值为 142 ps。由图 5(c)可见,系统输出的荧光脉宽与系统带宽呈正比关系。考虑到实验中系统存在的高阶色散及不同波长衰减系数所带来的误差,认为理论与实验基本吻合。综合关于时间波形、增益和带通的实验,验证了(5)式的正确性,基本确定了 OPCPA 系统输出荧光脉宽的公式及其影响因素。

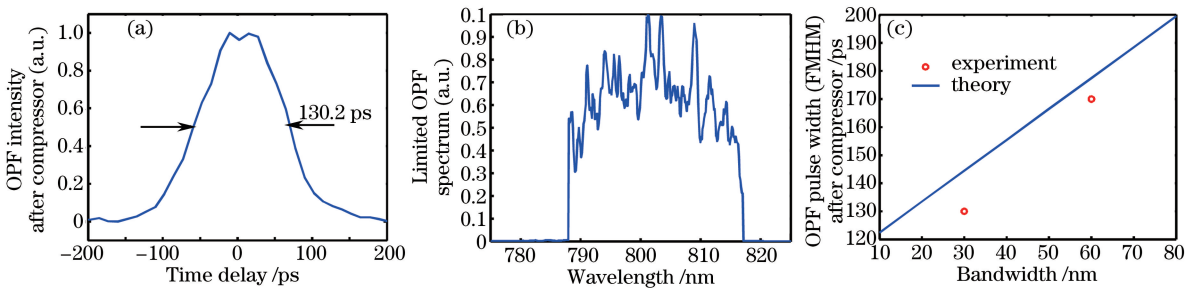


图 5 (a)OPCPA 系统输出参量荧光脉宽、(b)相应的光谱以及(c)荧光与系统带宽关系

Fig. 5 (a) OPF pulse width from an OPCPA system, (b) its spectrum and (c) relationship between the output

OPF pulse width and the system bandwidth

## 4 结 论

给出了参量荧光脉宽在 OPCPA 系统传输的公式,研究了在小信号增益时,不同抽运时间波形、增益、带宽以及啁啾率条件下系统输出的荧光脉宽。研究发现:荧光脉宽与抽运光脉宽成正比;输出荧光脉宽随着增益的变大而变窄;在增益一定的情况下,当超高斯抽运光阶数增大时荧光脉宽变宽。这主要是时域增益曲线

变化造成的。对于 OPCPA 系统而言,除了上述增益与抽运时间波形对荧光脉宽产生的影响外,啾啾率与系统带宽也对荧光脉宽产生重要的影响。单级 OPA 产生的荧光在其后的传输过程中,由于剩余系统净色散量不为 0 而被展宽,其展宽量与带宽、啾啾率呈正比关系。基于 PW-OPCPA 装置对上述理论研究进行了实验验证,得到了与理论相吻合的结果。

## 参 考 文 献

- 1 Dubietis A, Jonusauskas 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, Matousek P. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers[J]. *Opt Commun*, 1997, 144(1-3): 125-133.
- 3 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]. *Appl Opt*, 2010, 49(9): 1676-1681.
- 4 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 Phys Lett*, 2007, 4(6): 421-427.
- 5 Chekhlov O V, Collier J L, Ross I N, *et al.*. 35 J broadband femtosecond optical parametric chirped pulse amplification system[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(24): 3665-3667.
- 6 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. 不同含氘量 DKDP 晶体参量匹配与放大啾啾脉冲压缩特性分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1219002.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 Institute of Applied Physics. Exawatt center for extreme light studies (XCELS)[R]. Russian: The Institute of Applied Physics RAS, 2011.
- 10 Extreme light infrastructure preparatory phase-PP-final report[R]. Romania: Extreme Light Infrastructure, 2011.
- 11 The white book of ELI nuclear physics[R]. Romania: The ELI-Nuclear Physics Working Groups, 2007.
- 12 Hernandez-Gomez C, Collier J L, Canny D, *et al.*. The Vulcan 10 PW OPCPA project[R]. London: Laser Science and Development, 2006.
- 13 Cheriaux G, Giamb Bruno F, Fréneaux A, *et al.*. Apollon-10 PW: Status and implementation[C]. *Light at Extreme Intensities*, 2011, 1462: 78-83.
- 14 Kleinman D A. Theory of optical parametric noise[J]. *Phys Rev*, 1968, 174(3): 1027-1041.
- 15 Tavella F, Marcinkevicius A, Krausz F. Investigation of the superfluorescence and signal amplification in an ultrabroadband multiterawatt optical parametric chirped pulse amplifier system[J]. *New J Phys*, 2006, 8(10): 219.
- 16 Cristian M, Jeffrey M, Kartner F X, *et al.*. Excess quantum noise in optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *Opt Express*, 2011, 19(9): 8357-8366.
- 17 Homann C, Riedle E. Direct measurement of the effective input noise power of an optical parametric amplifier[J]. *Laser Photon Rev*, 2013, 7(4): 580-588.
- 18 Wang Bopeng, Zou Xubo, Feng Jing. Quantum analysis of optical parametric fluorescence in the optical parametric amplification process[J]. *J Opt*, 2015, 17(7): 075503.
- 19 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]. *Opt Commun*, 2007, 273(2): 510-514.
- 20 Dorrer C. Analysis of pump-induced temporal contrast degradation in optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24(12): 3048-3057.
- 21 Wang J, Yuan P, Ma J, *et al.*. Surface-reflection-initiated pulse-contrast degradation in an optical parametric chirped-pulse amplifier[J]. *Opt Express*, 2013, 21(13): 15580-15594.
- 22 Wang Jing, Ma Jingui, Wang Yongzhi, *et al.*. Noise filtering in parametric amplification by dressing the seed beam with spatial chirp[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(8): 2439-2442.
- 23 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]. *Opt Lett*, 2007, 32(15): 2143-2145.