

OPCPA 系统中参量荧光的研究进展

王波鹏 粟敬钦 曾小明 左言磊 温 静 朱启华

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术是有望实现大型超高功率超短脉冲激光装置的关键技术。但是,参量荧光仍然是影响超短脉冲信噪比的重要因素。回顾了近半个世纪以来关于 OPCPA 系统中参量荧光的理论和实验研究,就其产生的机理进行了讨论,总结出影响其空间模式和光谱分布特性的参量。在此基础上,分别从注入信号光能量、饱和与过饱和放大等方面总结了参量荧光的抑制方式。通过上述方法能够有效提高 OPCPA 系统的信噪比,从而为高质量物理实验提供条件。

关键词 非线性光学; 超短超高功率脉冲; 光参量啁啾脉冲放大; 参量荧光; 量子噪声

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.080019

Progress in Research of Parametric Fluorescence in OPCPA System

Wang Bopeng Su Jingqin Zeng Xiaoming Zuo Yanlei Wen Jing Zhu Qihua

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA) is the most promising key technology to achieve the large ultra-high power and ultrashort pulse laser system. However, parametric fluorescence is still an important factor affecting the temporal contrast of the system. We review the theoretical and experimental research of the parametric fluorescence, discuss the mechanism of its generation and point out the parameters which affect the spatial-temporal pattern and spectrum distribution. Based on that, we summarize the suppression of parametric fluorescence in the aspects of the input energy and the saturated or over-saturated amplification. Temporal contrast of the OPCPA system can be improved by the means mentioned above, and it satisfies the requirements of high quality physical experiments.

Key words nonlinear optics; ultrashort and ultra-high power pulse; optical parametric chirped pulse amplification; parametric fluorescence; quantum noise

OCIS codes 190.4410; 290.2500

1 引 言

高稳定性、高信噪比(SNR)拍瓦级的超短超强脉冲激光装置是探索在极端物理条件下光和物质相互作用的重要手段,已成为实现激光快点火^[1],电子加速器^[2-3]等物理实验的重要途径。由于具有高增益、宽带宽、高峰值功率、高光束质量、高信噪比等特点,光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术成为研制拍瓦级超短超强脉冲激光装置的重要方式。OPCPA 是在非线性晶体中,利用较高频率的强脉冲抽运啁啾展宽的较低频率的信号脉冲,发生光参量放大过程,使得信号脉冲被放大,再对啁啾信号脉冲进行压缩,从而得到超短超强脉冲激光。OPCPA 技术不断发展^[4-7],基于 OPCPA 技术的超强超短脉冲激光装置已经建成^[8-14]并且不断升级。虽然基于这种技术的装置表现出高信噪比特性,但是与理论值仍有较大差别^[15],其中一个重要的影响因素就是参量荧光。它起源于真空零点量子振荡^[16],在高功率密度光抽运非线性晶体,并且满足能量匹配和动量匹配的情况下,抽运光子存在自发分裂为信号光子和闲频光子的概率,从而在即使没有种子光注入

收稿日期: 2013-01-10; **收到修改稿日期**: 2013-03-09; **网络出版日期**: 2013-06-04

作者简介: 王波鹏(1988—),男,硕士研究生,主要从事高功率激光放大技术方面的研究。E-mail: wbp@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 粟敬钦(1973—),男,研究员,硕士生导师,主要从事高功率激光系统方面的研究。

E-mail: sujingqin@hotmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

时,也会产生特定谱宽、空间模式的光输出^[17]。在光参量啁啾放大过程中,虽然在特定方向上参量荧光与种子激光的频率、偏振态相同,但是这种光呈现出热光光子分布的特性^[18],并且在种子激光放大过程中,也由于光学参量过程而被放大,从而显著影响激光装置的信噪比。

本文回顾关于参量荧光的理论和实验研究,在量子力学和经典等效近似情况下,就其产生的机理进行讨论,总结影响出其空间模式和时间分布的参量以及抑制的方式。

2 参量荧光的理论描述

早在1961年,Louisell等^[16]利用量子力学对参量荧光的产生作出了预言,首先指出其产生于真空零点量子振荡,亦即即使在只有强抽运光场输入的情况下,也会有光输出。这在理论上指出了光参量产生(OPG)、光参量振荡(OPO)以及光参量放大(OPA)的可能。两年之后Gordon等^[19]又通过量子力学对参量荧光的相干性进行了分析,在不同的初量子态输出情况下,得到了参量荧光是非相干的结论,并且得到了在经典理论方式下的等效描述方式。之后Magde等^[17,20-22]分别基于量子理论和经典等效描述方式对影响参量荧光输出特性的参量进行研究,得到了与实验事实基本吻合的理论预测。下面简要介绍量子描述理论和经典等效描述并且指出影响参量荧光的参量。

2.1 量子力学对参量荧光的预言

下面就Louisell关于参量荧光的量子处理进行简单的论述。简单考虑两个模式的耦合情况,亦即相互作用的频率满足匹配关系, ($\omega_p = \omega_s + \omega_i$), 下数 p, s 和 i 分别代表抽运光、信号光和闲频光。

系统相互作用哈密顿量为

$$H(t) = \hbar\omega_s a^\dagger a + \hbar\omega_i b^\dagger b - \hbar\kappa [a^\dagger b^\dagger \exp(-i\omega_p t) + ab \exp(i\omega_p t)], \quad (1)$$

式中 a^\dagger 为频率为 ω_s 的光子产生算符, b^\dagger 为频率为 ω_i 的光子产生算符, a 和 b 分别代表相对应的湮灭算符。可以看到(1)式中后两项代表着抽运光与信号光以及闲频光之间的耦合关系。

再利用海森堡算符运动方程可以得到各个频率产生和湮灭算符的表达式:

$$\begin{cases} a(t) = \exp(-i\omega_s t) [\cos \hbar\kappa t a + i \sin \hbar\kappa t b^\dagger] \\ b^\dagger(t) = \exp(i\omega_i t) [\cos \hbar\kappa t b^\dagger - i \sin \hbar\kappa t a] \end{cases} \quad (2)$$

然后利用粒子数算符得到在初始真空态情况下的光子数输出:

$$\langle 0, 0 | N_s(t) = a^\dagger a | 0, 0 \rangle = \sin^2 \hbar^2 \kappa t. \quad (3)$$

从(3)式可以看到,即使在没有初始信号光或者闲频光注入时,也会有信号光的输出,这起源于真空零点量子振荡。上述的量子力学处理方式预言了参量荧光的产生机理,但是并没有考虑实际晶体中存在的色散、各向异性、多模耦合振荡等情况,所以并不能很好地预测参量荧光的空间以及功率输出。

2.2 经典等效描述

Gordon等^[19]通过量子力学方式考察了参量荧光的相干性,提出了在经典理论基础上等效近似地描述这一过程的方法:在各个模式中引入一个满足选择条件的闲频光子,用以耦合抽运光在经典差频条件下产生信号参量荧光。这个思想的提出使得利用经典理论描述这个量子问题成为可能,它为后来的研究者在具体实验研究中提供了计算参量荧光输出功率、模式分布的近似方式。

1968年,Kleinman^[22]在考虑晶体各向异性和色散的影响下,通过量子力学方式得到了参量荧光转换的概率分布 R :

$$R = \kappa P_p |f(\mathbf{k} + \mathbf{j})|^2 \delta(\omega_p - \omega_s - \omega_i), \quad (4)$$

式中 κ 是常量, P_p 是抽运光功率, $f(\mathbf{k} + \mathbf{j})$ 是抽运光波前在动量空间的表象。从(4)式中可以得知,如果参量荧光过程要发生,就必须满足频率匹配条件。

再利用经典等效求解参量荧光输出功率 P_s 。在抽运光平面波近似的条件下,得到的荧光输出功率为

$$P_s = \sum_k \sum_j R \hbar \omega_s \propto \frac{\sin^2 [(1/2)\Delta k l]}{[(1/2)\Delta k]^2}. \quad (5)$$

从(5)式中可以看到相位匹配对参量荧光的输出功率有很大的影响。在相干长度 $l_c = \pi/\Delta k$ 之外,输出功率急剧下降。

从上面的分析中,可以看出影响参量荧光产生和放大的两个关键因素是相位匹配和频率匹配,下面就这两个方面结合一些实验,对参量荧光的空间模式和光谱分布特性进行讨论。

3 空间和光谱分布特性

由于参量荧光的产生是在高功率密度光抽运非线性晶体时自发形成的,并没有 OPO 中谐振腔对于光模式的选择,所以只要能够满足频率匹配和相位匹配就能够形成参量荧光。下面就这两个选择条件进行分析,得到参量荧光的空间和光谱分布特性。

假定在满足频率匹配的情况下,分析它们的相位匹配关系是有效分析放大过程选择条件的一个重要途径。如图 1 所示,在非共线相位匹配时,分别在两个正交坐标上进行参量分解,得到

$$\begin{cases} \Delta k_{\parallel} = k_p \cos \alpha - k_i \cos \Omega - k_s \\ \Delta k_{\perp} = k_p \sin \alpha - k_i \sin \Omega \end{cases} \quad (6)$$

可以看到在不同的非共线角、不同的抽运光与光轴夹角的情况下,相位失配程度的大小不一,能够实现参量发射的波长不同。对于这个问题多位学者进行了深入的研究。

1967 年, Magde 等^[17]利用连续 Ar⁺ 离子激光器,在兆瓦量级实现了参量荧光输出实验。实验中,调谐抽运脉冲入射 ADP 晶体角度 θ ,参量荧光的光谱分布与入射偏离角 $\Delta\theta$ 呈现出二次曲线关系,波长可调谐范围为 440~1600 nm。

1968 年, Byer 等^[20]采用 Ar⁺ 离子激光器,通过调节 LiNbO₃ 晶体的温度,得到了 530~700 nm 的波长调谐范围,且晶体温度与波长几乎成线性关系。

1995 年, Trapani 等^[24]对飞秒脉冲抽运 BBO 晶体产生的参量荧光空间分布做了详细的研究。实验中采用第 II 类相位匹配方式,在改变抽运脉冲波矢方向与晶体光轴夹角的情况下,参量荧光以抽运光传播方向为中心,成不同大小的环形对称性分布,如图 2 所示^[23]。在对其空间角分布与参量荧光强度的测量中,发现参量荧光的发生不仅要满足频率匹配和相位匹配,而且只有在较小的走离角、群速度基本匹配的情况下才能发生,这对于研究参量荧光形成具有重要的意义。

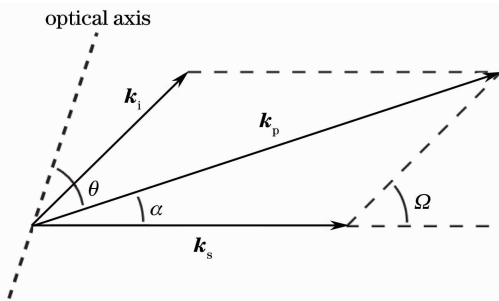


图 1 抽运光、信号光和闲频光的相位匹配关系
Fig. 1 Phase matching among the pump, signal and idler light

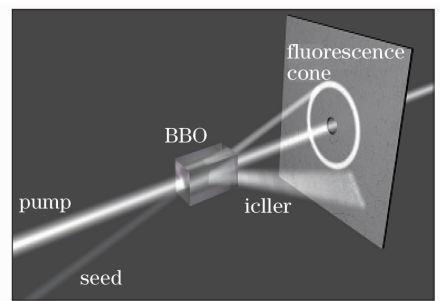


图 2 环状参量荧光示意图^[23]
Fig. 2 Sketch of the ring-type parametric fluorescence^[23]

2000 年, Devaux 等^[25]在小信号增益的近似条件下,利用归一化的参量增益方程即放大传输方程,对参量荧光的光谱强度与角分布进行了研究。在简并第 I 类相位匹配情况下,通过改变抽运光脉冲与晶体光轴的夹角 ϕ_p ,分别测量不同角分布下参量荧光的光谱强度分布,并以完全相位匹配方向的强度为基准作归一化处理。其理论预言的不同 ϕ_p 情况下参量荧光的角分布和强度分布与实验结果基本吻合。

上述研究表明,通过不同方式调节相位匹配,可以达到波长调谐的作用,并且在不同的调节方式下作用效果近似,但是效率却有很大的不同。合理选择调节方式,可以更好地调节输出波长、空间模式分布,以至于可以在某些频率段上抑制参量荧光。

4 OPCPA 系统中参量荧光的抑制方式

由于参量荧光和信号光在晶体中传播时遵循同样的放大规律,所以它们之间存在着竞争,但是它们的空

间模式、时间分布、初始注入能量的不同使得最终放大之后的能量空间、时间分布不同,利用这些方面的差别,我们可以采取一些有效的抑制参量荧光的方式,从而使得系统的信噪比得到较大的提升。

OPCPA 系统中,在种子信号光被高功率密度的抽运光放大的同时也伴随着参量荧光的放大。在几乎与抽运脉冲脉宽相同的时间尺度上,参量荧光产生并放大,形成一个不能压缩的底座,影响信号脉冲的信噪比^[21]。同时,在空间中,由于参量荧光具有高阶空间模式分布,使得在抽运光某些空间部分中没有信号光竞争,从而使得参量荧光得到放大,降低了系统的信噪比。再者,由于抽运光能量起伏的存在,一般的 OPCPA 系统中都采用饱和放大的方式使得信号光光谱放大获得更高的稳定性。这种饱和放大方式使得能量从信号光回流至抽运光中,然而对于参量荧光而言并没有出现饱和继而继续被放大,这可能降低系统的信噪比。所以抑制参量荧光成为提高系统信噪比的一个重要方式。基于前面的讨论,将分别从参量荧光空间分布、信号种子光能量注入和信号脉冲饱和放大三个方面介绍参量荧光的抑制方式。

4.1 利用空间分布滤除参量荧光

相位匹配条件很大程度上影响着参量过程的空间分布和波长分布,而由于信号激光和参量荧光在初始的空间模式分布上的不同,所以在输出时存在很大的差别^[26]。对于信号激光而言,其空间分布大多采用超高斯分布或者高斯分布,且在放大过程中,在相位失配较小的情况下,由于能量流动而引起的相位畸变很小,同时由于相位失配较小,所以信号光波矢只能在特定范围内存在,故而在放大之后基本能够保持与输入相位相同的分布和相同的波前分布^[27-28]。所以对于光参量放大过程,信号激光波前基本保持为输入状态。但是对于参量荧光而言情况并非如此。利用经典等效近似的方式,在给每个热分布的闲频光模式加上一个初始光子之后,由于缺乏对相位以及波矢的限制,所以只要能够基本满足频率匹配和相位匹配的闲频光子就能够通过差频过程产生相应的参量荧光。故而我们可以说参量荧光是在确定系统中能够满足两个选择条件的、最大带宽的、多空间模式热光的集合。所以在随后的放大过程中,必然存在与信号激光相同空间、波长模式分布的参量荧光,当然也存在更高阶的空间模式以及在这些空间模式上分布的波长的光。利用空间模式分布的不同可以滤除后一部分的参量荧光,从而有效抑制参量荧光在级联 OPA 当中的放大,增加信号光对抽运光的利用率,这对于级联 OPCPA 系统紧凑化具有重要的意义。

基于第 2 节的讨论,我们知道改变抽运光波矢与晶体光轴的夹角能够有效调节参量荧光的空间分布,在不同的空间频率上分布着相应特定的波长。而对于信号光而言,在合适的非共线角下,仍然能够在设计带宽之内形成相位匹配。所以可以适当调节抽运光波矢与光轴的夹角,在基本不影响信号激光增益或者影响较小的情况下,增加参量荧光与信号激光空间模式上的差别,从而利用紧凑型空间滤波器或者让其传输足够距离^[29],使得与信号激光不同空间模式的参量荧光被滤除。

4.2 信号种子光能量注入的影响

在光参量放大过程中,信号光的增益不仅取决于抽运光功率密度、相位失配量、有效非线性系数等一些参数,而且也取决于初始信号光的功率密度^[29]。由于需要满足一定的发散度(相位匹配)以及尽可能最大限度地提取能量(脉宽匹配),信号光功率密度的选择方式通常是由改变注入信号光能量来完成的。在相同的抽运光功率密度下,增加注入信号光能量会使得转换率呈现出先增长后下降的趋势。这是由于在参量放大过程中,晶体的吸收、散射以及端面反射等因素造成信号光存在一定程度的损耗,并且在小信号增益时,信号光对于抽运光能量的提取十分有限,所以合理提高注入光能量能够使得能量转化效率得到提升;但是如果注入能量过大,使得参量放大出现饱和,这时信号光并不能被放大,反而可能出现能量的减少或者不能有效提取抽运光能量。所以选择一个合适的注入信号光能量是影响能量有效提取的重要因素。

对于起源于真空零点量子振荡的参量荧光而言,有效分配到各个模式中的初始能量是非常低的。在参量放大的过程中,信号激光和参量荧光发生竞争,不同信号光初始注入能量会对系统的信噪比产生影响。Tavella 等^[30]对此进行了研究,发现随着初始注入系统的信号光能量的增加,信噪比线性增加(图 3),但是在注入能量大于 10 nJ 之后,由于产生信号光的宽带振荡器时间窗口的限制,信噪比不能够无限制地提升。如果采用带宽更宽的脉冲,那么进一步合理提升注入能量是能够进一步提升信噪比的。

Wang 等^[31]也在这方面进行了实验研究。在他们的实验中,利用信号脉冲脉宽远小于抽运脉冲脉宽的方式,让信号脉冲多次通过同一抽运脉冲(图 4),这相当于不同能量信号光注入。在参量荧光被放大相同倍

数时,分别测量被放大后的信号光和参量荧光能量之比,得到了随着注入能量增加,信噪比提高的结果。

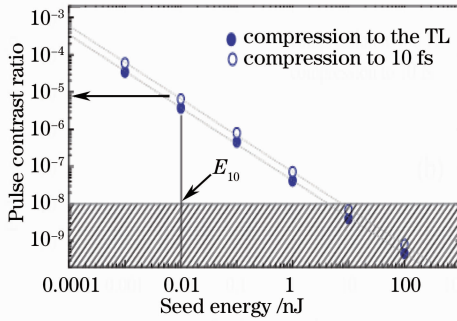


图 3 OPCPA 信噪比与种子光能量关系

Fig. 3 Relation between the SNR of OPCPA and the energy of the seed light

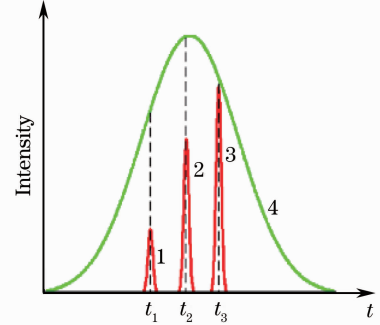


图 4 信号脉冲三次被同一抽运脉冲放大

Fig. 4 Signal pulse amplified by the same pump pulse for three times

4.3 饱和放大对参量荧光的影响

在 OPCPA 系统中,由于抽运光自身的能量起伏,使得被放大的信号光也带有起伏和调制。一般在实验中都采用饱和放大技术^[32],使得信号光光谱得到所设计的放大,并且减小抽运光的能量起伏对信号光的影响。但是这带来了一个问题,亦即在饱和放大过程中信号光发生能量回流,使得信号光能量降低,但是对于参量荧光而言并不存在饱和放大,从而可能影响信噪比。

对于这个问题,Tavella 等^[30]进行了实验和理论分析。他们利用三级 OPA 系统,通过调节抽运光的功率密度,实现了信号光的从非饱和放大到饱和放大的过程(图 5),其中 theory¹ 是没有考虑信号光抑制情况下的模拟结果,而 theory² 考虑了信号光的抑制最后比较了非饱和放大与饱和放大之后系统的信噪比。他们发现在实验中信噪比并没有下降很多(图 6)。

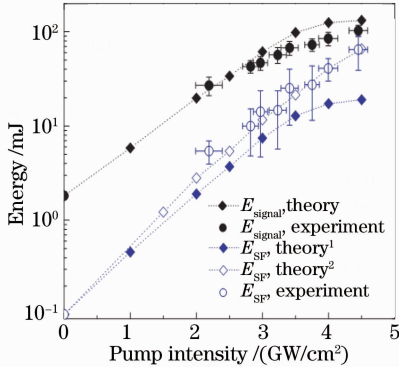


图 5 非饱和放大到饱和放大

Fig. 5 From non-saturation to saturation region

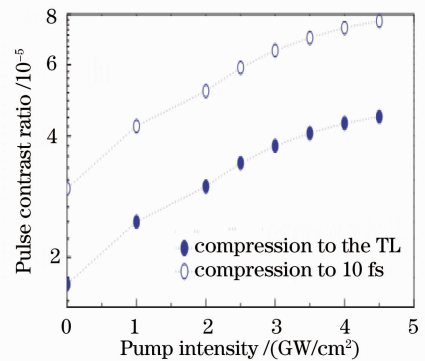


图 6 不同抽运功率密度下的信噪比

Fig. 6 SNR under various power densities of the pump pulse

Manzoni 等^[33]对此做了深入的分析。他们指出在从非饱和放大到饱和放大的过程中,存在初始放大区、饱和区与过度饱和区。这里需要指出的是,他们所称的初始放大区其实是小信号增益区,饱和区是抽运光明显衰减、信号光能量极大增加的区域,而过度饱和区则是上面所说的饱和区。从图 7 和图 8 中可以看到随着放大距离的增加,信噪比呈现了先略微降低、之后迅速升高、再迅速降低的趋势。在这个过程中存在一个临界点,即饱和放大和过度饱和放大的分界点,又是信噪比由高到低的分界点。其原因是由于参量荧光在此过程中一直都处于饱和放大,而信号光经历了由大能量的提取(饱和放大区)转变成能量回流(过度饱和区)的过程。

关于这个问题,上述两种结论有所差别,其原因在于他们在实验中为达到信号光的饱和放大所改变的参量不同。在 Tavella 等^[30]的实验中,通过改变抽运光的功率密度使得信号光的放大发生转变,从图 3 中可以看到,抽运光的功率密度只是使得这种转变刚刚发生。而 Manzoni 等^[33]所采用的物理量是光在其中传播时

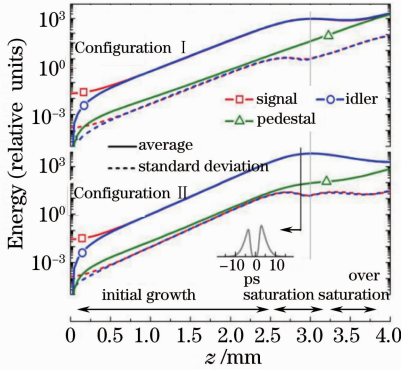


图7 信号光能量与放大距离关系

Fig. 7 Relation between the length of amplification and the energy of signal light

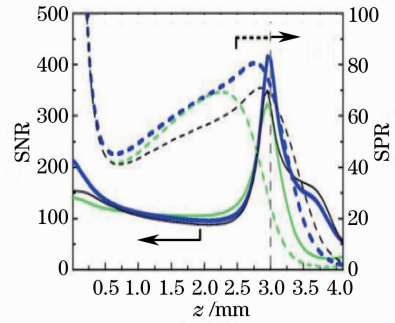


图8 信噪比、信号荧光功率比(SPR)与放大距离关系

Fig. 8 Relation between the length of amplification and the SNR/SPR (power ratio of signal to fluorescence)

的距离,可以看到抽运光的功率密度远远大于 Tavella 等的实验,其原因在于在刚进入过度饱和区域,信号光能量就有量级上的下降(图7)。他们所关注的物理量不同,得到的结论有所不同但是并不矛盾。而从他们的研究中可以看到,在过度饱和放大时,抽运脉冲的功率密度的影响与传播长度的影响是不同的。

5 结 论

本文回顾了 OPCPA 系统中参量荧光的研究进展。对参量荧光的产生机理和描述方式进行了概括,指出了影响其空间和波长分布的重要因素——相位匹配和频率匹配。根据参量荧光的空间、时间分布以及其与信号光的竞争等特性,总结了抑制参量荧光的方式可以从紧凑型空间滤波器、适当增大注入信号光能量、适当的饱和放大等方面着手。通过上述方式抑制参量荧光,能够有效提高 OPCPA 系统的信噪比,从而为高质量物理实验创造有利条件。

参 考 文 献

- 1 T T Ditmire, J Zweiback, V P Yanovsky, *et al.*. Nuclear fusion from explosions of femtosecond laser-heated deuterium clusters[J]. *Nature*, 1999, 398(6727): 489–492.
- 2 W P Leemans, B Nagler, A J Gonsalves, *et al.*. GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator[J]. *Nature Phys.*, 2006, 2(10): 696–699.
- 3 V Malka, J Faure, Y A Gauduel, *et al.*. Principles and applications of compact laser-plasma accelerators[J]. *Nature Phys.*, 2008, 4(6): 447–453.
- 4 Qu Yexi, Pan Xue, Huang Wenfa, *et al.*. 1030 nm picosecond level optical parametric chirped pulse amplification pump[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0802003.
瞿叶玺, 潘雪, 黄文发, 等. 1030 nm 皮秒级光参量啁啾脉冲放大抽运源[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0802003.
- 5 Wang Nannan, Sun Meizhi, Xu Tingting, *et al.*. Analysis of optical parametric chirped pulse amplification spectrum and conversion efficiency resulting from time characteristics of signal pulse based on YCOB crystal[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0502013.
王楠楠, 孙美智, 徐婷婷, 等. 基于 YCOB 晶体分析信号光脉冲时间特性对光参量啁啾脉冲放大光谱和转换效率的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0502013.
- 6 Wang Xiangfeng, Dai Yaping, Wang Tao, *et al.*. Optimization design of 1J level optical parametric chirped pulse amplification system[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0702009.
王翔峰, 戴亚平, 王韬, 等. 焦耳级光参量啁啾脉冲放大系统的优化设计[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0702009.
- 7 Pan Xue, Li Xuechun, Wang Jiangfeng, *et al.*. Study on stability of arbitrary spectral shaping using optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0102004.
潘雪, 李学春, 王江峰, 等. 利用光参量啁啾脉冲放大进行任意光谱整形方案的稳定性分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0102004.
- 8 A Baltuska, T Fuji, T Kobayashi, *et al.*. Visible pulse compression to 4 fs by optical parametric amplification and programmable dispersion control[J]. *J Opt Lett*, 2002, 27(5): 306–308.
- 9 X Gu, G Marcus, Y Deng, *et al.*. Generation of carrier-envelope-phase-stable 2-cycle 740- μ J pulses at 2.1- μ m carrier wavelength[J]. *Opt Express*, 2009, 17(1): 62–69.

- 10 J Moses, S W Huang, K H Hong, *et al.*. Highly stable ultrabroadband mid-IR optical parametric chirped-pulse amplifier optimized for superfluorescence suppression[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(11): 1639–1641.
- 11 O D Mücke, S Ališauskas, A J Verhoef, *et al.*. Self-compression of millijoule 1.5 μm pulses[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(16): 2498–2500.
- 12 E W Gaul, M Martinez, J Blakeney, *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.
- 13 Jiang Yongliang, Leng Yuxin, Zhao Baozhen, *et al.*. High and stable conversion efficiency obtaining in single-stage multi-crystal optical parametric chirped pulse amplification system[J]. *Chin Phys Lett*, 2005, 22(11): 2840–2842.
- 14 Gao Yanxia, Zhao Gaiqing. Optical parametric amplification in periodically poled LiNbO₃ for high energy perawatt laser system front end[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(8): 1092–1095.
高艳霞, 赵改清. 用于高能拍瓦激光系统前端的周期极化 LiNbO₃光参量放大[J]. *中国激光*, 2007, 34(8): 1092–1095.
- 15 I N Ross, P Matousek, M Towrie, *et al.*. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers[J]. *Opt Commun*, 1997, 144(1-3): 125–133.
- 16 W H Louisell, A Yariv, A E Siegman. Quantum fluctuations and noise in parametric processes I [J]. *Phys Rev*, 1961, 124(6): 1645–1654.
- 17 Douglas Magde, Herbert Mahr. Study in ammonium dihydrogen phosphate of spontaneous parametric interaction tunable from 4400 to 16000 Å[J]. *Phys Rev Lett*, 1967, 18(21): 905–907.
- 18 Michael Vasilyev, Sang-Kyung Choi, Prem Kumar, *et al.*. Investigation of the photon statistics of parametric fluorescence in a traveling-wave parametric amplifier by means of self-homodyne tomography[J]. *Opt Lett*, 1998, 23(17): 1393–1395.
- 19 J P Gordon, W H Louisell, L R Walker. Quantum fluctuations and noise in parametric processes II [J]. *Phys Rev*, 1963, 129(1): 481–485.
- 20 R L Byer, S H Harris. Power and bandwidth of spontaneous parametric emission [J]. *Phys Rev*, 1968, 168(3): 1064–1068.
- 21 T G Giallorenzi, C L Tang. Quantum theory of spontaneous parametric scattering of intense light[J]. *Phys Rev*, 1968, 166(2): 225–236.
- 22 D A Kleinman. Theory of optical parametric noise[J]. *Phys Rev*, 1968, 174(3): 1027–1041.
- 23 Stefan Michiel Witte. Terawatt-Intensity Few-Cycle Laser Pulses: Optical Parametric Chirped Pulse Amplification and Frequency Comb Spectroscopy[D]. Amsterdam: Vrije Universiteit, 2007. 5–6.
- 24 P Di Trapani, A Andreoni, G P Banfi, *et al.*. Group-velocity self-matching of femtosecond pulses in noncollinear parametric generation[J]. *Phys Rev A*, 1995, 51(4): 3164–3167.
- 25 F Devaux, E Lantz. Spatial and temporal properties of parametric fluorescence around degeneracy in a type I LBO crystal [J]. *Eur Phys J D*, 2000, 8(1): 117–124.
- 26 R Butkus, R Danielius, A Dubietis, *et al.*. Progress in chirped pulse optical parametric amplifiers[J]. *Appl Phys B*, 2004, 79(6): 693–700.
- 27 J Moses, S W Huang, K H Hong, *et al.*. Highly stable ultrabroadband mid-IR optical parametric chirped-pulse amplifier optimized for superfluorescence suppression[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(11): 1639–1641.
- 28 J A Armstrong, N Blgemeerden, *et al.*. Interactions between light waves in a Nonlinear Dielectric[J]. *Phys Rev*, 1962, 127(6): 1918–1939.
- 29 Igor Jovanovic, Curtis G Brown, Christopher A Ebberts, *et al.*. Generation of high-contrast millijoule pulses by optical parametric chirped-pulse amplification in periodically poled KTiOPO₄[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(9): 1036–1038.
- 30 F Tavella, A Marcinkevicius, F Krausz. 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.
- 31 Hongying Wang, Hongjun Liu, Wei Zhao. Compact and efficient triple-pass optical parametric chirped pulse amplification [J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2009, 11(6): 065205.
- 32 Deng Qinghua, Peng Hansheng, Li Mingzhong, *et al.*. Chirped pulse spectrum shaping using the over-saturating course in optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(11): 1527–1531.
邓清华, 彭翰生, 李明中, 等. 光参量啁啾脉冲过饱和放大实现超短脉冲的频谱整形[J]. *中国激光*, 2006, 33(11): 1527–1531.
- 33 Cristian Manzoni, Jeffrey Moses, Franz X Kärtner, *et al.*. Excess quantum noise in optical parametric chirped-pulse amplification[J]. *Opt Express*, 2011, 19(9): 8357–8366.