

文章编号: 0258-7025(2006)11-1527-05

光参量啁啾脉冲过饱和放大实现 超短脉冲的频谱整形

邓青华^{1,2}, 彭翰生³, 李明中¹, 隋展¹, 丁磊¹, 王建军¹,

罗亦鸣¹, 唐军¹, 赵润昌¹, 李富全¹, 林宏奂¹, 吕新杰^{1,2}, 王明哲⁴

(中国工程物理研究院¹ 激光聚变研究中心, ² 研究生部, ³ 中国工程物理研究院院部, 四川 绵阳 621900)
⁴ 国防科技大学光电学院, 湖南 长沙 410073

摘要 光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)非线性过程是个可逆过程,信号光增大到最大值时抽运光能量已几乎被耗尽,随即进入过饱和放大阶段,能量会由信号光和闲频光重新回到抽运光中。提出了利用这一过程实现啁啾脉冲频谱整形的一种新方法。通过数值模拟说明了这种啁啾脉冲频谱整形方法的原理。计算结果也表明了通过改变抽运光强、调节相位匹配角、改变抽运脉冲波形能实现对脉冲频谱整形结果的有效控制,甚至可以通过选择适当的抽运光和信号光的同步关系,使放大后输出信号光有一定的频移,这一点可以用来抑制钛宝石饱和放大引起的光谱红移。

关键词 非线性光学;啁啾脉冲;频谱整形;光参量啁啾脉冲放大

中图分类号 O 437 文献标识码 A

Chirped-Pulse Spectrum Shaping Using the Over-Saturating Course in Optical Parametric Chirped Pulse Amplification

DENG Qing-hua^{1,2}, PENG Han-sheng³, LI Ming-zhong¹, SUI Zhan¹, DING Lei¹,
WANG Jian-jun¹, LUO Yi-ming¹, TANG Jun¹, ZHAO Run-chang¹,
LI Fu-quan¹, LIN Hong-huan¹, LÜ Xin-jie^{1,2}, WANG Ming-zhe⁴

¹ Laser Fusion Research Center, ² Postgraduate Department,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

³ Headquarter of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

⁴ Optoelectric Department, National University of Defence Science and Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract The optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA) is a reversible nonlinear course. When the signal reaches its peak density, the pump power has been almost depleted. After this point, the over-saturating OPCPA course begins and the energy from the signal and idler reverses to the pump. A new method of the chirped-pulse spectrum shaping is put forward in this paper based on the above course. The theory of the new spectrum shaping method is explained by simulation. Also by simulation it is shown that by varying the pump intensity or adjusting the phase matching angle or changing the pump waveform, the output of spectrum shaping can be effectively controlled; even when signal and pump pulses are under the proper synchronous conditions, a frequency shift occurs at amplified signal, and the spectrum red-shift induced by Ti:sapphire saturation amplification may be suppressed.

Key words nonlinear optics; chirped pulse; spectrum shaping; optical parametric chirped pulse amplification

收稿日期:2005-11-30;收到修改稿日期:2006-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目。

作者简介:邓青华(1976—),女,中国工程物理研究院激光聚变研究中心博士研究生,主要从事高功率固体激光技术的研究。E-mail:dqhaj@yahoo.com.cn

导师简介:彭翰生(1936—),男,中国工程物理研究院激光聚变研究中心研究员,博士生导师,主要从事等离子体物理和超短激光技术的研究工作。E-mail:penghsh@caep.ac.cn

1 引言

光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术^[1]不但可以实现高增益,而且具有非常宽的增益谱;又因光参量啁啾脉冲放大过程仅在抽运光的脉冲宽度内对信号光有增益,而抽运光脉宽之外的预脉冲等只会因非线性晶体吸收而损耗,所以放大后脉冲信噪比会大大提高;光参量啁啾脉冲放大过程由光波间的非线性耦合来提供增益,不存在储能过程,因而放大介质的热效应很小,放大光束基本上没有热引起的相位畸变;高增益的光参量啁啾脉冲放大使得系统中的光学介质减少,从而降低了介质引起的色散,大大减弱了传统激光器中的B积分问题。基于上述优点,光参量啁啾脉冲放大是新一代超短超强脉冲激光装置的可选技术途径之一;目前在实验上光参量啁啾脉冲放大技术主要还是用来替代大型激光器装置的再生放大,以提高系统的信噪比和克服增益窄化。而以前讨论的利用光参量啁啾脉冲放大来克服超短放大系统的增益窄化问题,只强调了利用光参量啁啾脉冲放大宽的增益带宽^[2]。本文将对利用光参量啁啾脉冲过饱和放大对啁啾脉冲频谱进行整形以进一步克服增益窄化这一新思路进行讨论研究。

啁啾脉冲放大(CPA)技术的应用使超短激光脉冲的聚焦峰值功率密度提高了很多个数量级,目前最高可达 10^{21} W/cm²。但是由于放大过程中的增益窄化等效应,放大后光脉冲的频谱往往会窄化,从而影响脉冲压缩,不能达到人们所期望的脉冲宽度。且当激光饱和放大时,啁啾脉冲的前沿(长波长部分)较后沿(短波长部分)消耗的反转粒子数多,即从放大器抽取的储能更多,导致放大脉冲前沿的光强放大倍数大于后沿,从而使放大脉冲的波形前后不对称,脉冲的频谱产生光谱漂移(即“红移”)。和增益窄化效应不同,这种饱和放大引起的“红移”可能使脉冲光谱增宽,但如果通过正确设计入射脉冲的光谱形状来克服饱和放大过程对光谱的影响,就可以支持更短的脉冲宽度。

为此,人们提出了许多控制脉冲光谱的方法。比如在光路中加入可调谐空气隙标准具或薄膜标准具等,通过调整两平板之间的距离和入射光入射到平板的角度,使透过率随波长而变化,从而实现对光谱的整形,最终达到补偿增益窄化效应的效果。然而,这些方法存在以下缺点:1) 调节比较困难,补偿程度及形状有限,灵活性不够;2) 在放大前用声光

色散滤波器(AOPDF)使光谱中心凹陷^[3],以克服啁啾脉冲放大过程中光谱的增益窄化效应,并以此得到压缩后近变换极限的短脉冲,但声光色散滤波器的口径非常小,且损伤阈值低,这样的器件很难用在光参量啁啾脉冲放大代替再生放大器的系统中,因为若将声光色散滤波器放在光参量啁啾脉冲放大之前,其光谱整形效果会被光参量啁啾脉冲放大过程抹掉;3) 声光色散滤波器口径非常小,损伤阈值低的缺陷使其也不可能放在高增益光参量啁啾脉冲放大之后;4) 以上光谱整形器件放在光路中都是损耗元件,且损耗大(高达30%)。

本文提出的利用光参量啁啾脉冲过饱和放大方法实现脉冲频谱整形这一新方法能将啁啾脉冲放大和脉冲频谱整形结合起来,而且光参量啁啾脉冲过饱和放大具有相位匹配调整、同步调整、抽运光脉冲波形调整等多种控制方法,比较灵活。

2 整形原理

光参量放大一般以J. A. Armstrong等的理论为基础^[4],在平面波近似和慢变振幅近似下,光参量放大过程可用三波耦合波方程来描述^[5]

$$\frac{\partial E_1}{\partial z} + \frac{n_1}{c} \frac{\partial E_1}{\partial t} + \alpha_1 E_1 = -i \frac{\omega_1 d_{\text{eff}}}{n_1 c} \frac{1}{\cos^2 \beta_1} E_2^* E_3 \exp(-i\Delta kz), \quad (1a)$$

$$\frac{\partial E_2}{\partial z} + \frac{n_2}{c} \frac{\partial E_2}{\partial t} + \alpha_2 E_2 = -i \frac{\omega_2 d_{\text{eff}}}{n_2 c} \frac{1}{\cos^2 \beta_2} E_1^* E_3 \exp(-i\Delta kz), \quad (1b)$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial z} + \frac{n_3}{c} \frac{\partial E_3}{\partial t} + \alpha_3 E_3 = -i \frac{\omega_3 d_{\text{eff}}}{n_3 c} \frac{1}{\cos^2 \beta_3} E_1 E_2 \exp(+i\Delta kz), \quad (1c)$$

式中 $E_j, n_j, \alpha_j, \beta_j$ ($j=1,2,3$) 分别代表三波的电场、折射率、损耗系数和光波在非线性和非线性介质中传播时的坡印廷(Poynting)矢量的走离角; c 为真空中光速; Δk 为三波耦合的相位失配量; d_{eff} 代表三波作用下晶体的有效非线性系数。

将方程组(1)中的相速度项 $1/v_p = n/c$ 用群速度项 $1/v_g$ 代替,其中 $v_g = \partial\omega/\partial k$,当参量光脉冲大于100 ps时,忽略群速度失配问题,并忽略吸收损耗,采用运动坐标系

$$r = z, \quad \tau = t - z/v_g, \quad (2)$$

可将(1)式转换为^[5]

$$\frac{\partial E_1}{\partial r} = -i \frac{\omega_1 d_{\text{eff}}}{n_1 c \cos^2 \beta_1} E_2^* E_3 e^{-i\Delta k r}, \quad (3a)$$

$$\frac{\partial E_2}{\partial r} = -i \frac{\omega_2 d_{\text{eff}}}{n_2 c \cos^2 \beta_2} E_1^* E_3 e^{-i\Delta k r}, \quad (3b)$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial r} = -i \frac{\omega_3 d_{\text{eff}}}{n_3 c \cos^2 \beta_3} E_1 E_2 e^{+i\Delta k r}, \quad (3c)$$

利用(3)式,就 BBO 晶体中 I 类相位匹配的光参量啁啾脉冲放大过程进行模拟计算,抽运光波长为 532 nm,信号光波长为 800 nm,相位失配量 $\Delta k = 0$ 。信号光和抽运光强度随晶体长度而变化的曲线如图 1 所示。由图可知,能量在抽运光和信号光中会循环转换。当信号光由小信号放大到一定程度(图中 A 点)后,由于抽运光能量消耗较多,信号光的生长缓慢,进入饱和放大阶段直到信号光能量到达最大值(图中 B 点),此时抽运光能量已几乎被耗尽,接下来就进入过饱和放大阶段,能量会由信号光和闲频光重新回到抽运光中。

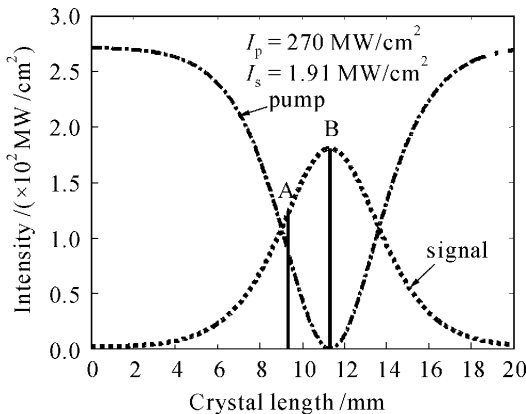


图 1 光参量放大过程中信号光和抽运光的强度变化曲线

Fig. 1 Intensity of signal and pump varying as the length of nonlinear crystal increasing in OPA

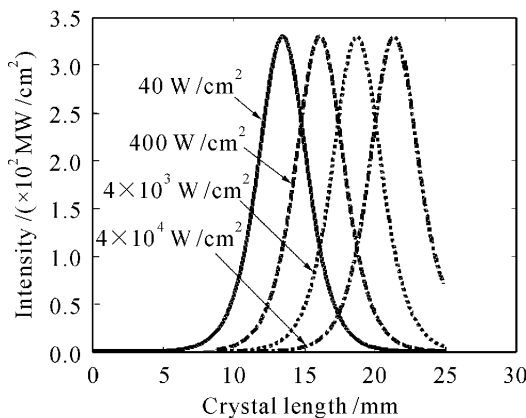


图 2 不同入射信号光强度下光参量放大过程中信号光强度随晶体长度的变化曲线

Fig. 2 Signal intensity in the nonlinear crystal while input signal intensity varying in OPA

图 2 显示了 BBO 晶体内不同初始光强的信号光的光参量放大(OPA)过程。由图 2 可知,在一定的抽运强度 ($I_p = 500 \text{ MW/cm}^2$)下,信号光的初始光强越大,达到最大增益点而后进入过饱和阶段的速度越快,所以晶体的饱和长度越短;初始光强越小,所需的晶体饱和长度越长。

高斯分布啁啾信号脉冲可表示为

$$E_s(t) = E_{s0} \exp[-2\ln 2(1 + jc)(t/T_s)^2] \exp(j\omega t), \quad (4)$$

其功率分布如图 3 所示。由于各频率成分的初始功率不同,那么在相同抽运强度下它们在晶体内进行光参量放大时,各频率成分到达最大增益点时所经历的晶体长度不同。选择合适的晶体长度或适当的抽运强度,都会使初始光强较强的中心频率及附近成分先到达最大增益点而进入过饱和放大阶段,从而使得中心频率及附近成分的强度反而减弱,实现啁啾脉冲的频谱整形。

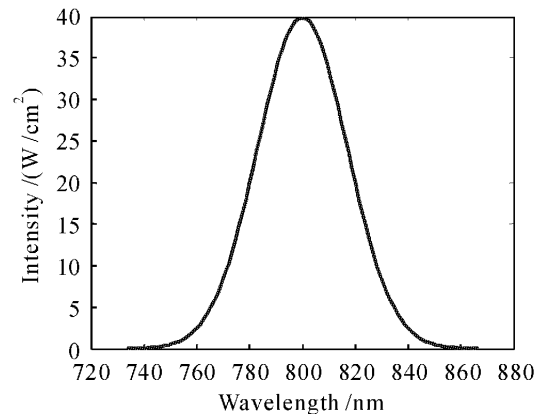


图 3 高斯分布的啁啾脉冲(带宽 40 nm,脉宽 3 ns)

Fig. 3 Chirped Gaussian pulse (bandwidth 40 nm, pulse width 3 ns)

由于晶体加工好后长度固定,相对来讲更容易实现对抽运光强的改变,所以这里就假定晶体长度为固定值 20 mm,而变化抽运光强对啁啾脉冲光参量放大过程进行模拟计算(中心频率 800 nm 处 $\Delta k = 0$),三阶超高斯分布抽运光为

$$E_p(t) = E_{p0} \exp\{-2\ln 2[(t + \Delta t)/T_p]^6\}, \quad (5)$$

不同抽运光能量(抽运脉冲半峰全宽为 5 ns,光斑大小为 3 mm)情况下放大后的信号光频谱分布如图 4 所示。

由图 4 可知,当抽运能量到达一定值时,光参量啁啾脉冲放大过程中会出现过饱和放大现象,从而使光参量啁啾脉冲放大后输出信号光的频谱有了调制,中心凹陷,实现整形;而且随着抽运能量的增大,中心凹陷越来越深,即可通过控制抽运光强度来控

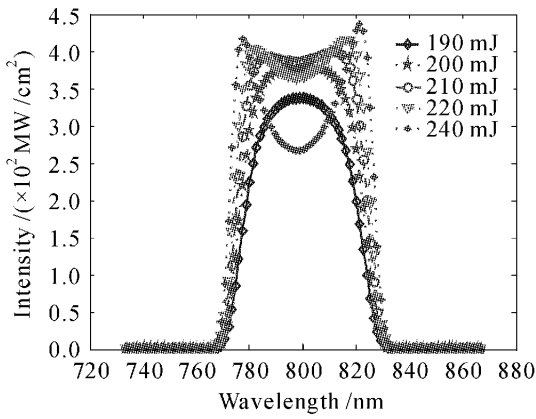


图 4 不同抽运能量下光参量啁啾脉冲放大后的信号光频谱分布

Fig. 4 Spectra of OPCPA signal as pump energy varying

制频谱整形调制深度。

3 光参量啁啾脉冲过饱和放大啁啾脉冲频谱的整形控制

由图 4 可知,可通过控制抽运光强度来调节光参量啁啾脉冲过饱和放大啁啾脉冲频谱的整形深度,这是整形控制方法中的一种。由于光参量啁啾脉冲放大过程与相位匹配、抽运脉冲波形等关系密切,所以也可通过调节相位匹配角、改变抽运脉冲波形进行光参量啁啾脉冲过饱和放大啁啾脉冲频谱的整形控制。

图 5 显示了不同相位匹配角条件下光参量啁啾脉冲放大过程输出信号光的频谱分布情况,图中各线所对应的相位匹配角分别为 23.7655° , 23.8382° , 23.8691° 。由图可见,光参量啁啾脉冲过饱和放大输出啁啾脉冲频谱对相位匹配角是很敏感的,因而也

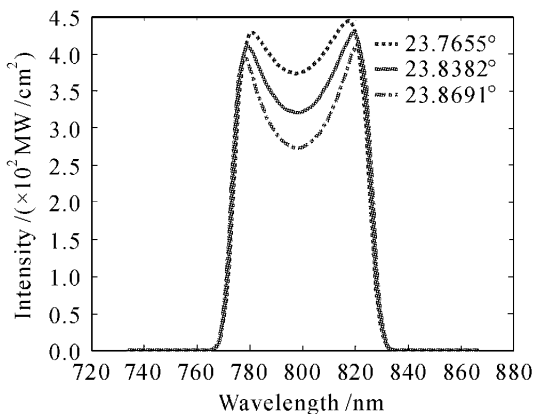


图 5 不同相位匹配角情况下光参量啁啾脉冲放大输出信号光的频谱分布

Fig. 5 Spectra of OPCPA signal under different mismatch conditions

可通过仔细调节相位匹配角来实现频谱的整形控制。

同样,图 6 中分别显示了二阶、三阶、四阶超高速抽运脉冲情况下光参量啁啾脉冲放大过程输出信号光的频谱分布情况,由图可见光参量啁啾脉冲过饱和放大输出啁啾脉冲频谱分布随着抽运脉冲波形变化,因而也可通过改变抽运脉冲波形来实现频谱的整形控制。

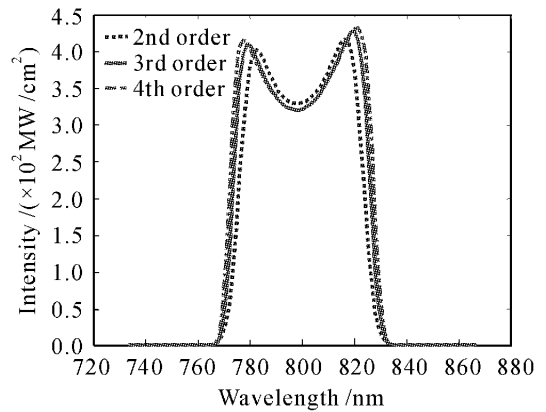


图 6 不同抽运波形情况下光参量啁啾脉冲放大输出信号光的频谱分布

Fig. 6 Spectra of OPCPA signal as pump pulse waveform changing

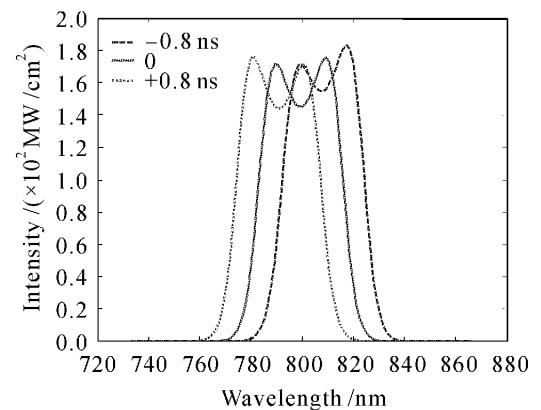


图 7 抽运光和信号光不同同步关系时输出的信号光频谱分布

Fig. 7 Spectra of amplified signal and pump under different synchronous conditions

在光参量啁啾脉冲放大过程中一般要求抽运光和信号光之间精确同步,而图 7 显示了高斯形抽运光与信号光具有不同的同步关系时(模拟计算时取抽运光与信号光间的相对延时分别为 0 ns, -0.8 ns, 0.8 ns),三种同步情况下过饱和放大后信号光的频谱分布相差极大,相互间具有较大频移。因而可以通过选择适当的抽运光和信号光的同步关系,使放大后的信号光有一定的频移,以抑制钛宝石

饱和放大引起的光谱红移现象。

4 结 论

通过对光参量放大过程中信号光强度随晶体长度增加而演化及不同入射信号光强度光参量放大过程和过程进行数值模拟,说明了光参量啁啾脉冲放大过饱和啁啾脉冲频谱整形的原理;接着用数值模拟结果表明通过改变抽运光强、调节相位匹配角、改变抽运脉冲波形,即可实现对脉冲频谱整形结果的有效控制,甚至可以通过选择适当的抽运光和信号光的同步关系,使放大后的信号光有一定的频移,抑制钛宝石饱和放大引起的光谱红移。

参 考 文 献

- 1 L. 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**:125~133
- 2 A. Fragemann, V. Pasiskevicius, F. Laurell. Broadband nondegenerate optical parametric amplification in the mid infrared with periodically poled KTiOPO₄[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(17): 2296~2298
- 3 P. Tournois. Acousto-optic programmable dispersive filter for adaptive compensation of group delaytime dispersion in laser systems [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **140**:245~247
- 4 J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing *et al.*. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric [J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(6):1918~1939
- 5 R. A. Baumgartner, R. L. Byer. Optical parametric amplification [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**(6):432~444

欢迎订阅 2007 年《人工晶体学报》

《人工晶体学报》是由中国硅酸盐学会晶体生长与材料专业委员会和中材人工晶体研究院主办、国内专门刊登人工晶体材料这一高新技术领域研究成果的学术刊物。它以论文和简报等形式报道我国在晶体材料:半导体材料、光电子材料、纳米材料、薄膜材料、超硬材料和高技术陶瓷等在理论研究、生长技术、性能、品质鉴定、原料制备以及应用技术和器件加工等方面的最新科研成果,同时介绍国内外晶体材料的发展动态与学术交流会议及会议信息。刊户覆盖以上各行业的大专院校、科研院所、生产经营单位和省(市)图书馆、政府相关部门。本刊已在美、日、英、俄、德等国家和地区发行。

《人工晶体学报》为中文科技核心期刊,国内各主要科技文献数据库及 EI、CA、INSPEC、AJ 收录源期刊。全文在“万方数据数字化期刊群”及“中国期刊网”上网。

《人工晶体学报》为双月刊,大十六开,每期约 30 万字。2007 年全年定价 300 元,可直接与编辑部联系订阅。

银行汇款方式:

收款单位:北京中材人工晶体有限公司

开户银行:北京工商银行管庄分理处

帐 号:0200006809006830924

电 话:010-65491290

传 真:010-65493320

邮局汇款方式:

邮 编:100018

北京 733 信箱《人工晶体学报》编辑部

网 址:www.jtxb.cn

E-mail:jtxbbjb@126.com