

文章编号: 1001-4322(2007)08-1279-04

周期极化 LiNbO₃ 脉冲走离效应分析*

高艳霞, 赵改清, 吴景清

(深圳大学 物理科学学院 应用物理系, 广东 深圳 518060)

摘 要: 建立了包含高阶群速色散的 OPCPA 数值模拟程序,并以准相位匹配的周期极化的 LiNbO₃ (PPLN) 参量放大器为例,在信号光是中心波长 1 053 nm,脉宽 100 fs 的飞秒脉冲经展宽器展宽 800 ps 的啁啾脉冲,输入能量约 0.6 nJ,泵浦光波长 527 nm,脉宽 3 ns,初始输入泵浦光强 300 MW/cm²,PPLN 晶体的非共线角 1.49°,极化周期 9.7 μm 的条件下,对 OPCPA 过程前级的高阶群速色散引起的走离效应对泵浦光、信号光频谱和脉冲形状的影响等具体特性进行了数值模拟。结果表明:在合适的晶体长度下,高阶群速色散对参量转换效率的影响不大,但它对输出信号光的时间波形和频谱有较大影响,会引起脉冲时间形状畸变和频谱漂移。

关键词: OPCPA; 走离效应; 准相位匹配; 高阶群速色散
中图分类号: O437 **文献标识码:** A

光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)是获得超高功率、超高脉冲对比度和高光束质量的激光脉冲的有效途径。大型激光装置中,如大阪大学激光工程研究所、英国卢瑟福实验室、美国 Rochester 大学激光力能学实验室、德国的 PHELIX 计划和法国的 PHEBUS 激光装置,均采用了光参量啁啾脉冲放大技术^[1-5],我国开始研制的高能拍瓦激光系统也可能在前端放大采用 OPCPA 技术方案。为得到高的参量转换效率,相位匹配和群速匹配条件是非常重要的。事实上,严格实现两匹配条件是比较困难的,限制了 OPCPA 实际放大效率。为此提出了准相位匹配的概念,其核心是构造一个周期结构^[6,8]。准相位匹配可大大提高相互作用长度,从而使光参量转换效率得到有效地改善。尽管利用准相位匹配晶体,选择合适的输入角度,可尽最大可能满足群速度匹配,但由于高阶群速度色散的存在,在放大过程中群速失配仍然存在。另外,在高强度的光参量过程中,高阶非线性效应也会引起高阶啁啾相位。这些都会影响参量放大的光谱、线形和脉冲对比度。本文对高能拍瓦激光系统前端光参量啁啾脉冲放大介质周期极化 LiNbO₃ (PPLN) 中走离效应进行详细的分析,包括光参量放大过程中高阶群速色散引起的走离效应对泵浦光、信号光频谱和脉冲形状的影响等,为设计高能拍瓦激光系统前端的 OPCPA 系统提供了有益的参考。

1 理论分析

在拍瓦激光系统前端 OPCPA 系统中,在保证参量放大谱宽的前提下,利用准相位匹配的非线性介质充分提高放大效率是比较有竞争力的技术手段之一。通常人们利用一种超晶格结构材料实现准相位匹配。在这种超晶格结构中,参量过程的非线性系数变得与超晶格的细致结构有关,可表示为^[9]: $d_m = (1/m) \sin(mD)$ d_{eff} ,其中, d_{eff} 为晶体最大非线性耦合系数, D 为与晶格结构有关的量, m 为准相位匹配阶数,通常准相位匹配有效非线性系数对一阶 ($m = 1$) 有最大值^[9],本文的数值模拟均针对 $m = 1$ 进行。

LiNbO₃ 晶体以其高的非线性转换系数在非线性光学领域得到广泛应用。本次模拟的超晶格以具有层状铁电区结构的 LiNbO₃ 晶体为基本介质^[10],具体包括两个长度相等的基本单元 A、B,它们的极化矢量方向相反(反平行 180°),其结构如图 1 所示。

准相位匹配条件下,考虑到二阶和三阶群速度色散并忽略介质吸收时,三波耦合方程可以写为^[11]

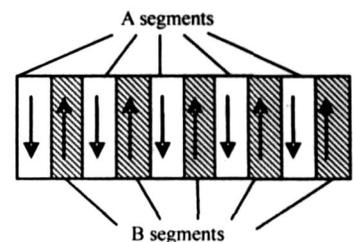


Fig. 1 QPM superlattice made from LiNbO₃ single crystal
图 1 准相位匹配周期极化 LiNbO₃ 构造

* 收稿日期:2007-07-03; 修订日期:2007-08-01
基金项目:国家 863 计划项目资助课题
作者简介:高艳霞(1972—),女,硕士生导师,从事超短脉冲传输及转换的理论和应用研究;gyx @szu.edu.cn.

$$\left[\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_1} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} \right] E_1(z, t) = -8i \frac{L_n}{v_1} (n_2 E_{30}) E_1(z, t) / E_j(z, t)^2 \quad (1)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_2} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} \right] E_2(z, t) = -8i \frac{L_n}{v_2} (n_2 E_{30}) E_2(z, t) / E_j(z, t)^2 \quad (2)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_3} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} \right] E_3(z, t) = -16i \frac{L_n}{v_3} (n_2 E_{30}) E_3(z, t) / E_j(z, t)^2 \quad (3)$$

$$k = 2 \left[\frac{m_3}{3} \frac{m_1}{1} \cos \phi - \frac{m_2}{2} \cos \phi - \frac{1}{2} \right] \quad (4)$$

式中： $E_j, n_j, \lambda_j (j=1,2,3)$ 分别代表三波的电场、折射率、波长； v_1 是群速度的倒数， v_2, v_3 是二阶和三阶群速度色散系数； z 为光的传播方向； k 为三波耦合的相位失配量； $z = z/L_n$ ； $t = t - z/v_{g3}$ ； $L_n = m_1 c / v_{g3}^{(2)} E_{30}$ ， $\chi^{(2)}$ 是二阶非线性系数； T 是晶格极化周期； θ, ϕ 分别为信号光和闲频光与泵浦光的夹角； v_g 是群速度。 $M = z/l_c, l_c$ 是相干长度。在具体的数值分析中,我们将长度为 L 的超晶格假想成是由 M 个薄片组成的,每个薄片厚度足够薄,具体通过分步的快速傅里叶变换(FFT)方法来数值模拟三波耦合过程。

2 数值模拟结果与分析

假设信号光是中心波长 1 053 nm,脉宽 100 fs 的飞秒脉冲,经展宽器展宽 800 ps 的啁啾脉冲,输入能量约 0.6 nJ,为高斯脉冲形式。泵浦光波长 527 nm,脉宽 3 ns,为高斯脉冲形式,初始泵浦光强 300 MW/cm²,初始泵浦光和信号光峰顶重合。

2.1 对前级 OPCPA 最佳非共线输入角分析

在参量放大过程中,群速度匹配决定着光参量产生的超荧光谱分布,因此群速度匹配是参量过程必须要考虑的问题。在具体实验中,应尽可能的满足有效群速度匹配,这也是获得最大光参量放大输出增益谱宽的必要条件。通常采用泵浦光和信号光的非共线输入来减小群速度失配。

在准相位匹配条件下,针对在泵浦光中心波长 527 nm,信号光中心波长 1 053 nm 处,对群速度失配与非共线输入角间的关系进行了模拟计算,如图 2 所示。当非共线角 $\theta = 1.49^\circ$ 时,信号光和闲频光在信号光方向上的群速度失配为零。再结合(4)式,在一阶准相位匹配时,可得到 PPLN 晶体的极化周期为 9.7 μm 。即使在最佳非共线角输入情况下,由于放大过程中存在高阶群速度色散,群速度失配还是存在的,特别对于啁啾光脉冲,群速度失配是影响参量放大过程中获得最宽光谱带输出的重要因素。

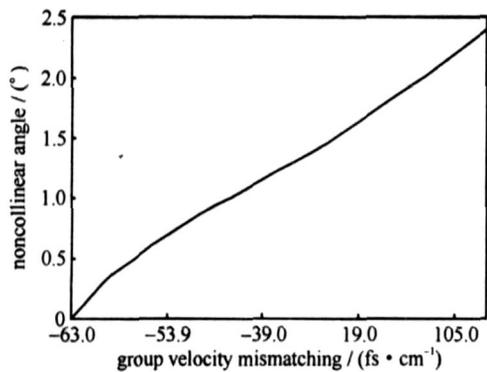


Fig. 2 Dependence of group velocity mismatching on noncollinear angle in PPLN

图 2 PPLN 晶体中群速失配与非共线输入角间的关系

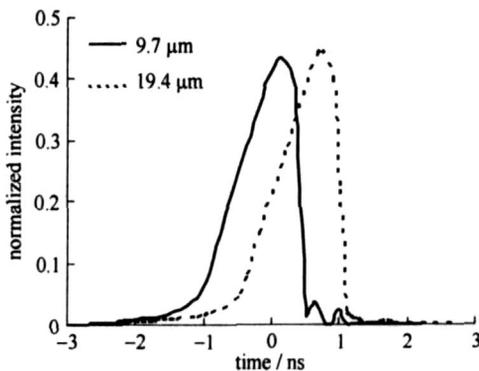


Fig. 3 Signal pulse shape for propagation through 9.7 and 19.4 μm crystal segments

图 3 信号光脉冲传输通过 9.7, 19.4 μm 后脉冲波形的变化

2.2 对脉冲形状的影响

图 3 是根据方程(1)~(4)数值模拟的参量放大过程经过 9.7(图 1 中 A), 19.4 μm (图 1 中 A+B) 晶体长度后输出信号光波形。为了方便比较波形的细致结构,我们将经过 19.4 μm 输出的信号光波形在时间轴上向右移动了 0.8 ns。理论上,准相位匹配条件下,泵浦光会对称地放大信号光脉冲的前沿和后沿。但从图 3 来看,脉冲前沿有畸变,这是因为存在群速度色散,导致泵浦光和信号光走离,致使放大变得不对称,通过 9.7 μm 后,产生的畸变的最大值是脉冲峰值的 8.2%,在通过 19.4 μm 后,产生的畸变的最大值是脉冲峰值的 0.6%,没有加剧的趋势,也就是说群速度色散主要发生在一个极化周期的前半部分,经过一个完整的极化周期后,脉冲形状上的畸变反而缓和了。可见这种周期极化构造对高阶的群速度色散效应有一定的抑制作用,但畸变并

没有完全被补偿,因而畸变仍会随着通过晶体长度的增加而增大。

从图 3 还可看出,与初始输入脉冲形状相比,输出信号光脉冲的形状虽有较大的变化,但变化均出现在较低强度处,峰值强度的 10% 以下,对整体转换效率的影响不大,如果仅关心转换效率,在相互作用长度较短时,可以忽略群速度色散的影响。

图 4 是晶体长度 13, 16, 18 mm 时输出泵浦光和信号光时间形状。随着距离的增加,信号光脉冲前沿畸变有增大的趋势,但在细节上有很大的不同:晶体长度 13 mm 时,脉冲时间形状上的畸变很小,估计主要原因是畸变的部分无法满足参量过程中的群速匹配和相位匹配条件,因而不能有效被放大。晶体长度 16 mm 时,畸变最高点是信号光峰值的 16%。晶体长度 18 mm 时,波形畸变非常严重,几乎分裂为两个波包。预计:泵浦光的形状同时也有较大变化,在脉冲的前沿出现起伏,晶体长度 18 mm 时,经计算得知起伏最大值是泵浦光脉冲峰值的 8%。从图中还可观察到:在较长的晶体长度上,出现和频效应,能量发生“回流”现象。随晶体长度增加,信号光强急剧降低,参量转换效率也会急剧下降,这主要是由于存在群速度色散,泵浦光不再对称地放大信号光脉冲的前沿和后沿,到和频过程出现时,一部分信号光分量因和频产生能量回流而使强度下降,而另一部分却还在进行参量放大,因而造成脉冲形状发生更严重畸变。

通过上述数值分析可见,在选择适宜的晶体长度,高阶群速度色散引起的走离效应对转换效率的影响不大,主要影响放大信号光的脉冲对比度和波形质量。

2.3 对输出频谱的影响

我们模拟了泵浦光和信号光在不同晶体长度上输出频谱的变化。图 5 是泵浦光在晶体长度分别为 13, 16, 18 mm 时的频谱分布。从图中可看出,在晶体长度为 13 mm 时,泵浦光的频谱中心因参量放大信号光而出现凹陷,在距中心频率较远的两沿,由于群速失配,参与信号光放大不充分,频谱分量较丰富,凹陷浅;随着晶体长度增加,泵浦光频谱中心的凹陷渐渐变小,到晶体长度为 18 mm 时,凹陷已经不存在了,但频谱形状畸变,频谱分量分布不均匀。从泵浦光频谱的变化可以推断:晶体长度 13 mm 开始,放大过程已经逐渐转变为和频过程,能量又从信号光和闲频光回流到泵浦光中,在图中表现为泵浦光的频谱形状中的凹陷消失,但泵浦光并没有恢复到初始输入的频谱形状,而是出现了频谱分布不均匀的情况。

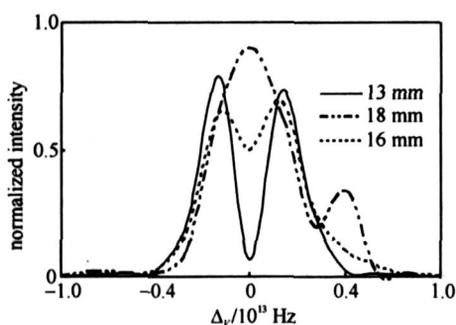


Fig. 5 Spectra of pump pulse through various crystal length

图 5 不同晶体长度时泵浦光频谱变化

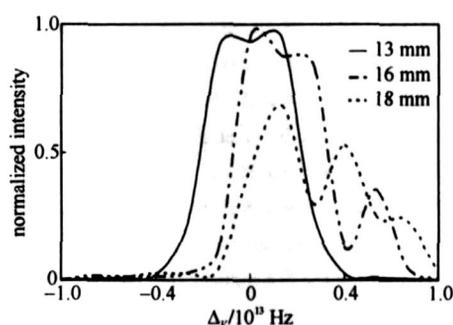


Fig. 6 Spectra of signal through various crystal length

图 6 不同晶体长度时信号光频谱变化

图 6 是信号光在晶体长度 13, 16, 18 mm 时的频谱分布。当晶体长度较短时,信号光频谱有变窄的现象。晶体长度为 16 mm 时的频谱宽度是 13 mm 时频谱宽度的 91%。当晶体长度较长时,信号光谱形状变化较大,出现多峰结构。随晶体长度的增加,信号光谱发生漂移,在晶体长度为 16 mm 时,信号光谱相对晶体长度为 13 mm 时漂移量达到其谱宽的 36%,可见考虑高阶群速度色散后,光参量之间走离效应严重,群速失配严重。由此可见,高阶群速度色散是光参量过程中必须要考虑的因素,它会引起信号光频谱漂移,当相互作用长度较长时,是造成光参量之间走离效应的主要原因。

需要说明的是,本文并没有考虑空间走离效应,这主要是因为在本文模拟条件下,晶体长度为 18 mm 时,两光束空间走离为信号光斑的 9.8%,而此时由高阶群速度色散造成的频谱漂移量达到输入信号光谱宽的 46.7%。

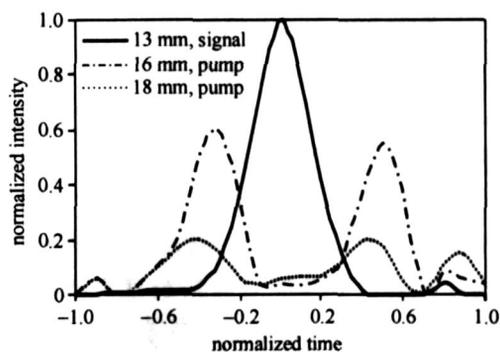


Fig. 4 Output pump pulse and signal

图 4 不同晶体长度时,泵浦光和信号光形状

3 结 论

光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术是一种非线性的参量耦合放大过程,因为超短脉冲包含多个频谱成份,即便在最佳非共线角输入的情况下,各频率分量在耦合过程中也会由于群速的不同,造成各波在时间上的延迟,产生走离效应,从而使放大光波光束质量和转换效率显著下降。而在准相位匹配下,OPCPA过程对泵浦光和信号光的初始输入限制会相对宽松,可以降低双折射相位匹配的晶体走离效应,提高非线性转换效率,克服相位匹配温度和匹配角受限制等缺点。

本文就是以准相位匹配的PPLN参量放大器为例,对OPCPA过程中的高阶群速色散引起的走离效应对过程转换效率、泵浦光、信号光频谱和脉冲形状的影响等具体特性进行了数值模拟,结果表明:在准相位匹配的PPLN参量放大器中,在合适的晶体长度下,高阶群速色散对参量转换效率的影响不大,但它对输出信号光的时间波形和频谱有较大影响,会引起脉冲时间形状畸变和频谱漂移,是造成参量光之间走离效应的主要原因,同时模拟发现PPLN对高阶群速色散有一定的抑制作用,研究结果为我国设计高能拍瓦激光系统前端的OPCPA系统提供了有益的参考。

参考文献:

- [1] Ross I N, Matousek P, Towrie M, et al. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers[J]. *Opt Commun*, 1997, **33**(6):125-133.
- [2] Igor J, Brian J C, Christopher A E, et al. Optical parametric chirped pulse amplifier as an alternative to Ti:sapphire regenerative amplifiers[J]. *Appl Opt*, 2002, **40**(5):2923-2926.
- [3] Kitagawa Y. GEKKO XII petawatt module project[R]. Annual Progress Report, 1998.
- [4] Collier J, Hernandez Gomez C, Ross I N, et al. Evaluation of an ultra-broadband high-gain amplification technique for chirped pulse amplification facilities[J]. *Appl Opt*, 1999, **36**(5):7486-7489.
- [5] Fragemann A, Pasiskevicius V, Laurell F. Broadband nondegenerate optical parametric amplification in the mid infrared with periodically poled KTiOPO₄[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(17):2296-2298.
- [6] Armstrong J A, Bloembergen N, Ducuing J, et al. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric[J]. *Phys Rev*, 1962, **127**(6):1918-1939.
- [7] 高艳霞, 范滇元. 超短脉冲在准相位匹配光学超晶格中倍频转换的理论研究[J]. 中国科学(A辑), 2000, **30**(4):366-371. (Gao Y X, Fan D Y. Study on the ultra-short pulse SHG in quasi-periodic optical super-lattice. *Science in China(Series A)*, 2000, **30**(4):366-371)
- [8] Danielius R, Piskarskas A, Trapani P D. A collinearly phase-matched parametric generators/amplifier of visible femtosecond pulses[J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 1998, **34**(3):459-464.
- [9] 曾小明, 魏晓峰, 朱启华, 等. 高重复频率高效率光参量啁啾脉冲放大研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(s0):101-104. (Zeng X M, Wei X F, Zhu Q H, et al. High repetition rate and high conversion efficiency in optical parametric chirped pulse amplification system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(s0):101-104)
- [10] 姜永亮, 赵保真, 梁晓燕, 等. 基于周期极化LiTaO₃晶体的高增益简并啁啾脉冲参量放大[J]. 物理学报, 2007, **56**(5):2709-2713. (Jiang Y L, Zhao B Z, Liang X Y, et al. High-gain degenerated optical parametric chirped-pulse amplification in periodically poled LiTaO₃. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5):2709-2713)
- [11] 朱鹏飞, 钱列加, 薛绍林, 等. 基于“神光”装置的飞秒拍瓦级光学参量啁啾脉冲放大的特性分析与系统设计[J]. 物理学报, 2003, **52**(3):587-594. (Zhu P F, Qian L J, Xue S L, et al. Numerical studies of characteristics and the design of 1 PW optical parametric chirped pulse amplifier for the “Shenguang” facility. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(3):587-594)

Numerical analyses on walk-off effect in periodically poled lithium niobate

GAO Yan-xia, ZHAO Gai-qing, WU Jing-qing

(Applied Physics Department, College of Physics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: This paper presents our numerical analyses on the walk-off effect in periodically poled lithium niobate(PPLN) for optical parametric chirped pulse amplification in the front-stage of PW laser system with our simulation program. Under the 527 nm, 3 ns and 300 MW/cm² pumping condition, using 1 053 nm, 0.6 nJ stretched pulse(from 100 fs to 800 ps) as signal, our analyses show that the high-order group velocity in the parametric process has little effect on the conversion coefficient, but it distorts both the temporal and spectral profiles of the output signal pulse, thus degrades the pulse contrast of the amplified signal through a PPLN with a poled period of 9.7 μm.

Key words: Optical parametric chirped pulse amplification; Walk-off; Quasi-phase-matching; High-order group velocity