

文章编号: 0258-7025(2007)08-1092-04

# 用于高能拍瓦激光系统前端的周期极化 LiNbO<sub>3</sub> 光参量放大

高艳霞, 赵改清

(深圳大学物理科学学院应用物理系, 广东 深圳 518060)

**摘要** 为了在高能拍瓦激光系统中设计和应用光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术,建立了仿真模拟程序,并以周期极化 LiNbO<sub>3</sub> 光参量放大器为例,分析了在准相位匹配条件下,前级光参量啁啾脉冲放大特性的影响参数,包括:非共线角、晶体长度、增益带宽、高阶非线性效应等。为设计与应用光参量啁啾脉冲放大技术提供了理论和数据上的参考。

**关键词** 激光物理;光参量啁啾脉冲放大;晶体长度;准相位匹配;转换效率

**中图分类号** O 437 **文献标识码** A

## Optical Parametric Amplification in Periodically Poled LiNbO<sub>3</sub> for High Energy Perawatt Laser System Front End

GAO Yan-xia, ZHAO Gai-qing

(Department of Applied Physics, School of Physics, University of Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

**Abstract** A simulation program is finished for applying the optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA) technique to the high energy perawatt laser system. Taking periodically polarized LiNbO<sub>3</sub> optical parametric amplifier as an example, the influence of noncollinearly angle, crystal length, gain bandwidth and high-order nonlinear effect on the front end OPCPA under quasis-phase matching conditions is analyzed. This work provides theoretical and experimental reference for the design and application of OPCPA.

**Key words** laser physics; optical parametric chirped pulse amplification; crystal length; quasi-phase matching; conversion efficiency

### 1 引言

要从激光放大器抽取储能,激光脉冲的能流必须和增益介质的饱和能流相当。大多数固体激光介质的饱和能流介于1 J/cm<sup>2</sup> (钛宝石)和6 J/cm<sup>2</sup> (钕玻璃)之间,对于超短激光脉冲,它相当于要求工作光强在10<sup>13</sup> W/cm<sup>2</sup>水平,远高于光学介质的破坏负载。因此,不能利用固体激光放大器来直接对超短脉冲进行放大。啁啾脉冲放大技术的出现将高功率激光系统输出水平推上了拍瓦的台阶<sup>[1]</sup>。然而,增益压窄效应的限制,影响了传统啁啾脉冲放大技术的放大效能。光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)因其超

宽的增益带宽及高信噪比,成为产生超强超短激光的一种新技术<sup>[2,3]</sup>。近年来,光参量啁啾脉冲放大技术受到广泛关注,发展迅速。日本大阪大学激光工程研究所于2001年为GEKKO-XII装置建成第13束激光,输出功率达到1 PW。其中,成功研制了光参量啁啾脉冲放大预放级,取代原来的再生放大器,有效提高了输出激光脉冲的信噪比。同期,英国卢瑟福实验室、美国Rochester大学激光力能学实验室(LLE)、德国的PHELIX计划和法国的LIL激光装置计划,在建造拍瓦激光装置中,都采用了光参量啁啾脉冲放大技术<sup>[4]</sup>。在激光聚变快点火需求推动下,我国也开始了高能拍瓦激光系统的研制。

收稿日期:2007-02-26;收到修改稿日期:2007-05-08

基金项目:国家863计划(2006AA804207)资助项目。

作者简介:高艳霞(1972—),女,副教授,硕士生导师,主要从事超短脉冲传输及转换的理论和应用研究。

E-mail:gyx@szu.edu.cn

本文建立了光参量啁啾脉冲放大仿真程序,并以准相位匹配的周期极化 LiNbO<sub>3</sub> 光参量放大器为例,对光参量啁啾脉冲放大过程中最佳非共线输入角、增益带宽效应、最佳晶体长度、高阶非线性效应等具体特性进行了数值模拟。

## 2 理论模型

光参量啁啾脉冲放大的主要原理是利用高功率钕玻璃激光系统的纳秒倍频激光脉冲作为抽运光,通过光参量放大机制对展宽的纳秒啁啾脉冲进行放大,然后注入钕玻璃主放大系统,最后在输出端利用光栅压缩从而获得超短超强激光脉冲。考虑到二阶和三阶非线性效应并忽略介质吸收时,准相位匹配条件下,三波耦合方程可以写为<sup>[5,6]</sup>

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_{g1}} \frac{\partial}{\partial t}\right) \mathbf{E}_1(z, t) = (-1)^{M_1} \frac{\omega_1}{n_1 c} \hat{\chi}^{(2)} \times \mathbf{E}_3(z, t) \mathbf{E}_2^*(z, t) \exp(-iz\Delta k) + i \frac{3\omega_1}{2n_1 c} \hat{\chi}^{(3)} \times \mathbf{E}_1(z, t) \sum_{j=1}^3 k_{1j} |\mathbf{E}_j(z, t)|^2, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_{g3}} \frac{\partial}{\partial t}\right) \mathbf{E}_3(z, t) = (-1)^{M_3} \frac{\omega_3}{n_3 c} \hat{\chi}^{(2)} \times \mathbf{E}_1(z, t) \mathbf{E}_2(z, t) \exp(-iz\Delta k) + i \frac{3\omega_3}{2n_3 c} \hat{\chi}^{(3)} \times \mathbf{E}_3(z, t) \sum_{j=1}^3 k_{3j} |\mathbf{E}_j(z, t)|^2, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_{g2}} \frac{\partial}{\partial t}\right) \mathbf{E}_2(z, t) = (-1)^{M_2} \frac{\omega_2}{n_2 c} \hat{\chi}^{(2)} \times \mathbf{E}_3(z, t) \mathbf{E}_1^*(z, t) \exp(-iz\Delta k) + i \frac{3\omega_2}{2n_2 c} \hat{\chi}^{(3)} \times \mathbf{E}_2(z, t) \sum_{j=1}^3 k_{2j} |\mathbf{E}_j(z, t)|^2, \quad (3)$$

$$\Delta k = 2\pi \left( \frac{n_3}{\lambda_3} - \frac{n_1}{\lambda_1} \cos\theta - \frac{n_2}{\lambda_2} \cos\phi - \frac{1}{\Lambda} \right), \quad (4)$$

式中  $\mathbf{E}_j, n_j, \lambda_j (j = 1, 2, 3)$  分别代表三波的电场、折射率、波长;  $z$  为光的传播方向;  $\Delta k$  为三波耦合的相位失配量,  $M = z/l_c, l_c$  为相干长度,  $\Lambda$  为晶格极化周期,  $\theta, \phi$  分别为信号光和闲频光与抽运光的夹角,  $v_g$  为群速度,  $\hat{\chi}^{(2)}, \hat{\chi}^{(3)}$  为二、三阶非线性极化率。在一阶准相位匹配条件下有效非线性系数可表示为<sup>[7]</sup>:  $d_m = 2d_{\text{eff}}/\pi$ , 其中,  $d_{\text{eff}}$  为晶体最大非线性耦合系数, 本文采用的模拟介质为周期极化 LiNbO<sub>3</sub>, 在具体的数值分析中, 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方法来数值模拟三波耦合过程。

有关准相位匹配请参考文献[7,8]。

## 3 数值模拟分析

### 3.1 对前级光参量啁啾脉冲放大群速匹配分析

在参量过程中, 群速匹配决定着光学参量产生的超荧光的角分布和谱分布, 因此群速匹配是参量过程必须要考虑的问题。在具体实验中, 应尽可能满足有效群速匹配, 这也是获得最大参量放大输出增益谱宽的必要条件。通常采用抽运光和信号光的非共线输入来减小群速失配。

在准相位匹配条件下, 针对在抽运光中心波长 532 nm, 信号光中心波长 1064 nm 处, 对群速失配与非共线输入角间的关系进行了模拟计算, 结果如图 1 所示。从图中可以看出, 当非共线角  $\alpha = 1.52^\circ$  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, 可得到周期极化 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的极化周期为 9.8  $\mu\text{m}$ 。

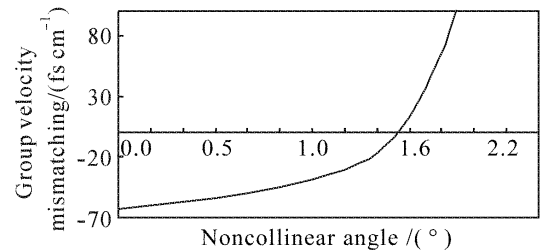


图 1 周期极化 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中群速度失配随非共线角的变化

Fig. 1 Dependence of group velocity mismatching on noncollinear angle in periodically poled LiNbO<sub>3</sub>

### 3.2 对前级光参量啁啾脉冲放大增益的计算

假设信号光、抽运光脉冲均为标准高斯形状, 初始输入抽运光强为 300 MW/cm<sup>2</sup>, 脉宽为 1 ns; 信号光强 0.8 MW/cm<sup>2</sup>, 脉宽为 120 fs。在拍瓦系统的总体设计中, 采用二级展宽方案, 第一级展宽到 300 ps 的啁啾脉冲, 对 O 类准相位匹配一阶过程 ( $e+e \rightarrow e$ ), 周期极化 LiNbO<sub>3</sub> 的有效非线性系数  $d_{\text{eff}}$  为 16.56 pm/V<sup>[9]</sup>。增益曲线如图 2 所示, 从图中得到在 1064 nm 附近介质的增益带宽为 46.8 nm。

### 3.3 前级最佳晶体长度的分析

计算参数如上, 程序模拟结果表明, 在晶体长度 12.5 mm 时可获得最大转换效率, 输出的信号光和抽运光的脉冲形状如图 3(a) 所示, 图 (b) 是晶体长度为 19.7 mm 时信号光和抽运光的脉冲形状。

由图 3 可见, 准相位匹配超晶格中的光参量过

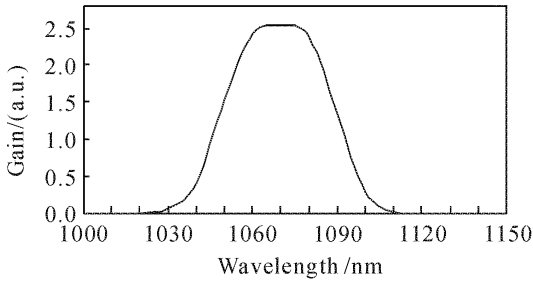


图 2 增益曲线

Fig. 2 Gain curves

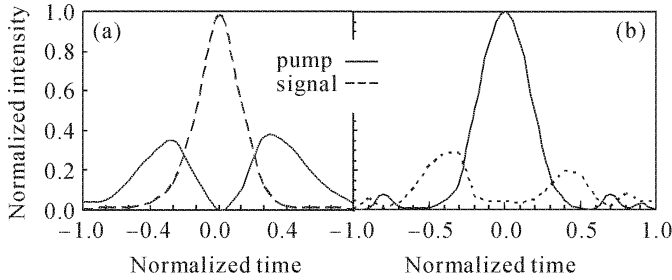
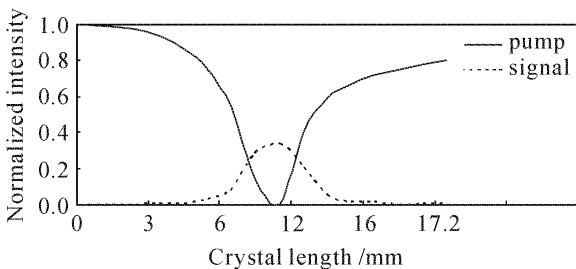


图 3 晶格长度为 12.5 mm(a)和 19.7 mm(b)时,抽运光和信号光形状

Fig. 3 Profile of pump and signal light pulse with crystal lengths 12.5 mm (a) and 19.7 mm (b)

程与普通非线性晶体相似,具有周期性,会出现和频过程,能量会从信号光和闲频光回流到抽运光中,如图 3(b),在晶体长度为 19.7 mm 时,已发生信号光能量回流到抽运光中。若定义抽运光的能量第一次完全转换为信号光和闲频光时的晶体长度为最佳晶体长度,在本文模拟条件下,最佳晶体长度为 12.5 mm。从图 3(b)可以看出,随着晶格长度的增加,信号光出现多峰结构,抽运光脉冲的前后沿也出现了畸变,这主要是因为距离增加,相互作用的参量光部分地偏离群速匹配和相位匹配,导致抽运光对信号光的放大不均匀,所以能量的回流也不均匀。

图 4 给出的是当初始输入信号光强为  $8 \text{ MW/cm}^2$  时,抽运光和信号光光强随晶体长度的变化,从图中

图 4 入射信号光强度为  $8 \text{ MW/cm}^2$  时抽运光、信号光强随晶格长度的变化Fig. 4 Relation of parametric light intensity and crystal lengths with input signal light intensity  $8 \text{ MW/cm}^2$ 

可以看出此时最佳晶格长度变为 9.2 mm,可见大的初始入射信号光使得和频现象较早出现,最佳晶体长度变短,因此对于一定长度的非线性晶体,为了获得高功率的信号光输出,抽运光和初始入射信号光强应根据晶体长度取最佳优化值。

### 3.4 高阶非线性效应对光参量啁啾脉冲放大的影响

对于多级光参量放大,当抽运光强达到  $\text{GW/cm}^2$  量级时, $\chi^{(3)}$  项的作用将变得重要,高阶非线性效应的影响将会体现出来。高阶非线性效应会加剧能量回流效应,使抽运波形中本来由于能量向信号光和闲频光转换而凹陷下去的中心更加突起,如图 5(a)曲线 2 所示。从图中来看,考虑高阶非线性效应与否,抽运波的总体凹陷程度不同。抽运波凹陷得越多,说明它转换给信号波和闲频波的能量越多,因此转化效率就越高,如图 5(b)所示。

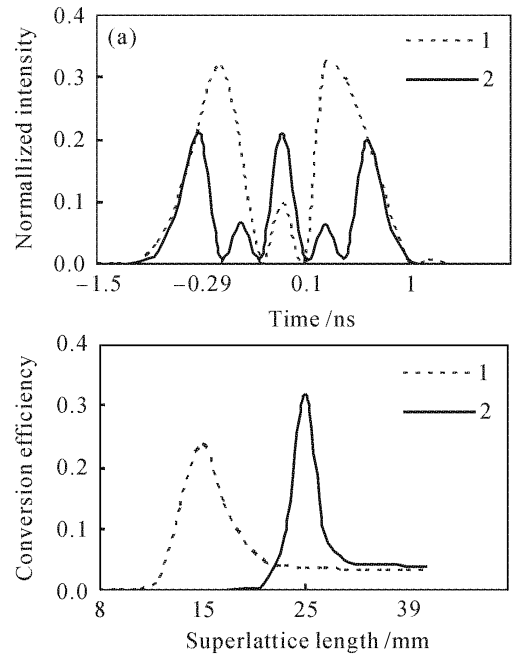


图 5 抽运光波形(a)和转换效率(b)与晶体长度的关系 曲线 1:不考虑三阶非线性效应;曲线 2:考虑三阶非线性效应

Fig. 5 Profile of pump beam (a) and conversion efficiency (b) versus crystal lengths (curve 1: without the 3rd nonlinear effect; curve 2: with the 3rd nonlinear effect)

## 4 结 论

对于高能量大口径钕玻璃激光系统,光参量啁啾脉冲放大技术是进一步提高现有激光峰值功率的有效途径。为了在现有的高功率激光系统上设计应用光参量啁啾脉冲放大技术,我们建立了仿真模拟程序,并以周期极化  $\text{LiNbO}_3$  为例分析了在准相位

匹配条件下,光参量啁啾脉冲放大前级放大的影响参数(非共线角、晶体长度、增益带宽、高阶非线性效应等),为设计与应用光参量啁啾脉冲放大技术提供了理论和数据上的参考。

致谢非常感谢范滇元院士在本文研究工作中给予的帮助和指导。

### 参 考 文 献

- 1 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*. Petawatt laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3):160~162
- 2 Yang Xiaodong, Xu Zhizhan, Leng Yuxin *et al.*. Multiterawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(13):1135~1137
- 3 Igor Jovanovic, Brian J. Comaskey, Christopher A. Ebbers *et al.*. Optical parametric chirped-pulse amplifier as an alternative to Ti:sapphire regenerative amplifiers [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(15):2923~2929
- 4 K. Osvay, G. Kurdi, J. Klebniczki *et al.*. Femtosecond OPCPA in the UV [R]. 2000/2001 Central Laser Facility Annual Report, 2002. 487~489
- 5 R. A. Baumgartner, R. L. Byer. Optical parametric amplification [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **15**(6):432~444
- 6 Yao Jianquan. Nonlinear Optics Frequency Conversion and Laser Tuning Technology [M]. Beijing: Science Press, 1995  
姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京:科学出版社, 1995
- 7 Jiang Yongliang, Zhao Baozhen, Liang Xiaoyan *et al.*. High-gain degenerated optical parametric chirped-pulse amplification in periodically poled LiTaO<sub>3</sub> [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5):2709~2713  
姜永亮,赵保真,梁晓燕等. 基于周期极化 LiTaO<sub>3</sub> 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
- 8 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
- 9 Gao Yanxia, Fan Dianyuan. Study on the ultra-short pulse SHG in quasi-periodic optical super-lattice [J]. *Science in China (Series A)*, 2000, **30**(4):366~371  
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
- 10 A. Fragemann, V. Pasiskevicius, F. Laurell. Broadband nondegenerate optical parametric amplification in the mid infrared with periodically poled KTiOPO<sub>4</sub> [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(17):2296~2298