

文章编号: 0258-7025(2010)10-2550-04

# 准相位匹配晶体中超短脉冲传输的自聚焦效应

张双根<sup>1</sup> 黄章超<sup>2</sup> 薛玉明<sup>1</sup> 吕福云<sup>2</sup> 姚江宏<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 天津理工大学电子信息工程学院,天津市薄膜电子与通信器件重点实验室,通信器件与技术教育部工程研究中心,天津 300384  
<sup>2</sup> 南开大学物理科学学院,天津 300071

**摘要** 建立了超短激光脉冲在准相位匹配晶体中传输的物理模型,并对修正后的非线性薛定谔方程进行了数值求解,获得了飞秒激光脉冲在周期极化铌酸锂晶体中传输的时空演化过程。模拟结果发现当入射基频光功率超过晶体自聚焦的临界功率时,发生自聚焦过程。自聚焦效应使激光脉冲在时域上产生分裂和在空间上发生聚焦。脉冲宽度随着传输距离的增加而逐渐减小,焦点处脉冲宽度最小;脉冲在空间上被聚焦,聚焦半径随着传输距离的增加而逐渐减小,焦点处半径最小,经过焦点后发散;脉冲峰值强度在焦点处最强,经过焦点后峰值强度逐渐降低。超短脉冲倍频过程中,自聚焦效应限制了准相位匹配晶体的长度。

**关键词** 非线性光学;飞秒激光;准相位匹配;周期极化;倍频;自聚焦

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2550

## Self-Focusing Effect of Ultra-Short Laser Pulse Propagation During Quasi-Phase Matched Crystal

Zhang Shuanggen<sup>1</sup> Huang Zhangchao<sup>2</sup> Xue Yuming<sup>1</sup> Lü Fuyun<sup>2</sup> Yao Jianghong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Engineering Research Center of Communication Devices and Technology, Ministry of Education, Tianjin Key Laboratory of Film Electronic and Communication Device, School of Electronic Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China  
<sup>2</sup> School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China

**Abstract** The physical model of ultra-short laser pulse propagation during quasi-phase matched crystal is built and modified nonlinear Schrödinger equation is solved with step Fourier method. The temporal and spatial characteristics of femto-second laser pulse propagation in periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal are achieved numerically. It is found that when the fundamental power is beyond the critical power, temporal splitting and spatial focusing of pulse are induced by self-focusing effect. Temporal splitting results in pulse width decrease with the increment of propagation distance, and minimal width is obtained at the focal point. On the other hand, spatial focusing brings decrement of focused diameter with the increment of propagation distance, and minimal diameter is obtained at the focal point and then diffused outward. Finally, the peak intensity of the pulse reaches maximal value at the focal point, and then reduces gradually. The length of quasi-phase matched crystal is restricted by self-focusing effect during ultra-short laser frequency doubling process.

**Key words** nonlinear optics; femto-second laser; quasi-phase matched; periodically poled; frequency doubling; self-focusing

## 1 引 言

准相位匹配(QPM)技术是对晶体的非线性系

数进行周期性调制,引入附加相移,从而满足基频光波与二次谐波间的相位匹配条件。QPM技术的出

收稿日期: 2009-11-18; 收到修改稿日期: 2010-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(60806030 和 11004152)、天津市自然科学基金(08JCYBJC14600)、天津市教委资助项目(20090715)资助课题。

作者简介: 张双根(1979—),男,博士,讲师,主要从事非线性光学与光电子学等方面的研究。

E-mail: shuanggenzhang@163.com

现,解决了传统相位匹配的难题,体现出许多独特的优势<sup>[1~3]</sup>,如可以利用晶体的最大非线性系数、设计灵活和调谐方法简便等,成为目前拓宽激光波长最常用、最有效的方法之一<sup>[4,5]</sup>。超短脉冲激光倍频不同于连续激光(包括长脉冲)倍频,由于超短脉冲包含多个频率成分,在 QPM 晶体中传输时,各个频率分量的群速不同,造成基频光波和谐波脉冲在时间上的延迟<sup>[6,7]</sup>,从而导致谐波光束质量和转换效率的显著下降<sup>[8~10]</sup>。同时,由于超短脉冲激光具有较高的功率密度,会诱导与光强相关的非线性折射率,介质折射率随空间的变化,引起光束的自聚焦(SF)效应,反过来,SF 效应又会影响光束的传输,改变光脉冲的时空分布特性。人们研究了超短脉冲激光在熔融硅<sup>[11~13]</sup>、玻璃<sup>[14]</sup>和 CS<sub>2</sub><sup>[15]</sup>等介质中的小尺度 SF 效应引起脉冲时域压缩以及分裂成丝,而超短脉冲激光在 QPM 晶体中的 SF 效应以及 SF 对倍频过程的影响研究较少。本文根据超短脉冲激光在 QPM 晶体中传输的物理模型,运用分步傅里叶方法对修正后的非线性薛定谔方程(NLSE)进行了数值求解,获得了飞秒激光脉冲在 QPM 铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)晶体中传输的时空演化过程,分析讨论了 SF 效应对倍频过程的影响。

## 2 物理模型

超短超强激光脉冲在介质内的传输特性,比如克尔效应、色散、衍射等现象都可以用标准的 NLSE 来描述,然而当激光脉冲的峰值功率进一步提高后,针对一些非线性现象如 SF,自俘获和光诱导材料损伤等,标准的 NLSE 不能给出很好的解释,必须对其进行修正。

光脉冲在  $z$  方向传输的 NLSE 为<sup>[11,12]</sup>

$$\frac{\partial E(z,t)}{\partial z} + i \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 E(z,t)}{\partial t^2} - i \frac{kn_2}{n} |E(z,t)|^2 E(z,t) = 0. \quad (1)$$

考虑到脉冲在介质中传输时的 SF 效应时,可用 NLSE 来描述<sup>[16]</sup>

$$\frac{\partial E(z,r,t)}{\partial z} - i \frac{1}{2k} \nabla_{\perp}^2 E(z,r,t) + i \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 E(z,r,t)}{\partial t^2} - i \frac{kn_2}{n} |E(z,r,t)|^2 E(z,r,t) = 0. \quad (2)$$

(1)式与(2)式不同的是,场振幅的形式为  $E(z, r, t)$ ,横向拉普拉斯算符描述光脉冲在空间的衍射

效应:  $\nabla_{\perp}^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}$ ;  $k = 2\pi n/\lambda$ ,  $n$  是在中心波长  $\lambda$  处的线性折射率,实际倍频过程中为了利用周期极化铌酸锂晶体(PPLN)的最大非线性系数以获得较高的转换效率,入射基频光均采用 e 偏振光,当入射基频光波长为 1550 nm 时,线性折射率  $n = 2.14$ ;  $n_2$  是非线性折射率,与晶体材料有关,在数值模拟中取  $n_2 \approx 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ ;  $k''$  为色散系数,是波矢对频率的二阶导数。周期极化 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的极化周期为 18.6  $\mu\text{m}$ ,厚度为 0.5 mm,长度为 1 cm,宽度为 0.5 cm。根据 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的色散方程<sup>[17]</sup>,对基频光中心波长为 1550 nm,基频光和倍频光各阶群速度色散系数分别为  $\beta_0^{(1)} = 8.687 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ ,  $\beta_1^{(1)} = 7.294 \times 10^{-9} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\beta_2^{(1)} = 9.725 \times 10^{-26} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\beta_3^{(1)} = 3.271 \times 10^{-40} \text{ s}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\beta_0^{(2)} = 1.766 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ ,  $\beta_1^{(2)} = 7.574 \times 10^{-9} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\beta_2^{(2)} = 3.841 \times 10^{-25} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\beta_3^{(2)} = 2.426 \times 10^{-40} \text{ s}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ 。

假设初始脉冲的时空分布为

$$E(z=0, r, t) = E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{2w_0^2}\right) \text{sech}\left(\frac{t}{t_p}\right). \quad (3)$$

由峰值功率的计算公式  $P_{\text{peak}} = I_{\text{peak}} \pi w_0^2/2$ ,数值模拟中,取入射基频光波长为 1550 nm,脉冲宽度为 40 fs,焦斑大小为  $w_0 = 70 \mu\text{m}$ ,初始脉冲的峰值强度为 500 GW/cm<sup>2</sup>,则相应的峰值功率为 9.62 MW。产生自聚焦的临界功率由公式  $P_{\text{crit}} = \frac{0.61\lambda_0^2 \pi}{8n_0 n_2}$  给出,计算得到临界功率为 6.55 MW,峰值功率为临界功率的 1.5 倍,超过 SF 效应所需要的临界功率。

## 3 结果与分析

为了计算方便,在数值模拟中忽略损耗的影响,模拟结果如图 1 所示。当光脉冲通过焦点时观察到了脉冲能量在时域上的分裂现象,而能量在空间上的分裂并没有出现。尽管自相位调制本身对脉冲的时域展宽没有贡献,但是自相位调制和正的群速度色散( $k'' > 0$ )的共同作用,引起了激光脉冲的正啁啾,导致脉冲的时域展宽,结果在  $L = 6 \text{ mm}$ ,  $t = 0$  处产生了两个子峰结构,脉冲能量向焦点外流动,如图 1(b)所示。当激光脉冲继续向前传输,在  $L = 9 \text{ mm}$  时,激光脉冲的能量在  $t = 0$  处逐渐向外扩散,出现了两个子脉冲,而能量在空间上的分裂并没有出现,如图 1(c)所示。

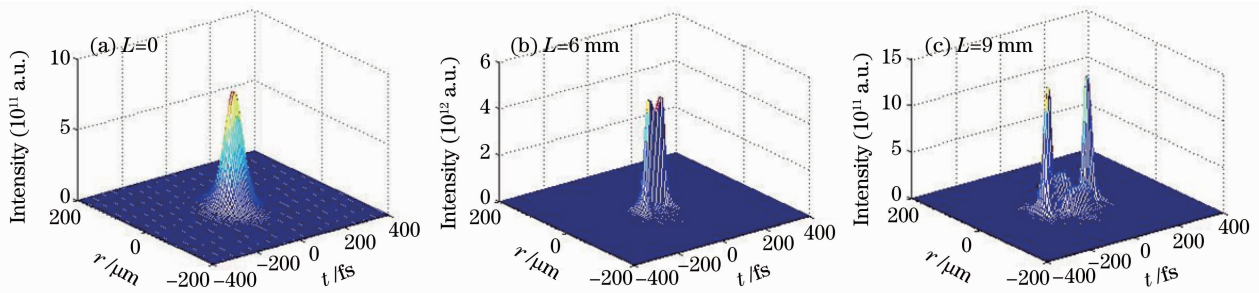


图 1 飞秒激光脉冲在 PPLN 晶体中传输不同距离  $L$  时强度的时空分布

Fig. 1 Spatio-temporal characterization of femto-second pulse intensity under different propagation distances in PPLN crystal

图 2(a) 给出了激光脉冲传输过程中脉冲宽度  $d_{\text{FHWM}}$  随传输距离的变化, 可见激光脉冲在时域上的分裂具有对称性, 产生两个几乎对称的子脉冲, 总的脉冲宽度随着传输距离的增加逐渐减小, 在焦点处脉冲宽度最小, 经过焦点后脉冲分裂为两个子脉冲, 总的脉冲宽度随着传输距离的增加而逐渐增大。类似地, 图 2(b) 给出了脉冲空间半径大小随传输距离的变化, 随着传输距离的增加, 激光脉冲在空间上被聚焦, 在焦点处半径最小, 半径由原来的  $70 \mu\text{m}$

下降到约  $6 \mu\text{m}$ 。经过焦点后随着传输距离的增加半径逐渐增大, 光束发散。图 2(c) 给出了激光脉冲的峰值强度随传输距离的变化。聚焦前, 激光脉冲的峰值强度随着传输距离的增加逐渐增大, 在焦点处峰值强度最强, 经过焦点后峰值强度逐渐降低。在数值模拟过程中, 改变入射光的波长、强度、脉冲宽度、脉冲的形状以及晶体性质等参数, 发现晶体中的 SF 效应主要依赖于入射激光强度, 并且都遵循上述规律。

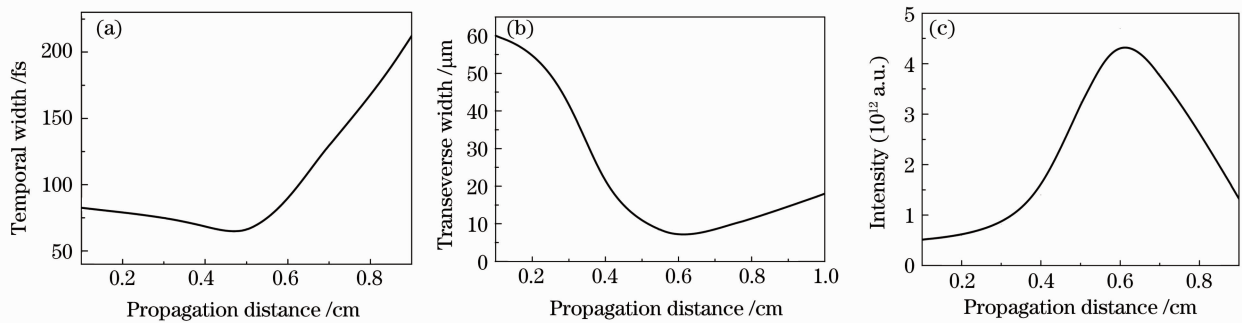


图 2 飞秒激光脉冲在 PPLN 晶体中传输的时空分布特性

Fig. 2 Spatio-temporal characterization of femto-second pulse propagation in PPLN crystal

图 3 给出了激光脉冲在不同传输距离时的时域波形, SF 效应引起了激光脉冲在时域上分裂为两个

子脉冲, 子脉冲几乎是对称产生的, 具有接近的峰值强度和脉冲宽度。

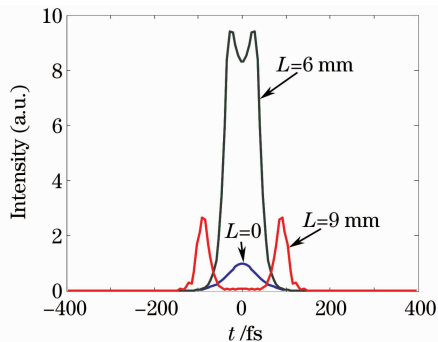


图 3 不同传输距离时飞秒激光脉冲的时域特性

Fig. 3 Temporal characterization of femto-second pulse under different propagation distances

在实际倍频过程中, 当入射基频光功率很高时, 容易发生小尺度 SF 效应, 因此可以通过改变入射基频光的强度或者设计合适的晶体长度来控制小尺度 SF 过程, 从而抑制小尺度 SF, 使得光脉冲在倍频过程中保持较好的光束质量。

## 4 结 论

SF 效应主要依赖于入射激光强度, 当入射激光的功率超过 SF 的临界功率时, SF 过程才会发生, 这时 SF 效应引起激光脉冲时域波形的分裂和空间上的聚焦, 对倍频过程的影响就不能不考虑。从模

拟过程可以清晰地看到激光脉冲在 QPM 晶体中传输时经历的 SF 过程,一方面 SF 效应引起了脉冲时域波形的分裂,产生两个几乎对称的子脉冲;另外引起了激光脉冲在空间上的 SF。因此在实际倍频过程中,可以通过改变入射基频光的强度或者设计合适的晶体长度来控制小尺度 SF 过程,从而抑制小尺度 SF,降低小尺度 SF 对二次谐波光束质量的影响,具有一定的实际参考意义。

### 参 考 文 献

- 1 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
- 2 P. A. Franken, J. F. Ward. Optical harmonics and nonlinear phenomena[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1963, **35**(1): 23~29
- 3 Yao Jianquan. Nonlinear Optics Frequency Conversion and Laser Tuning Technology[M]. Beijing: Science Press, 1995. 177~182  
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. 177~182
- 4 Wang Jian, Sun Junqiang, Sun Qizhen. Tunable wavelength converters of picosecond pulses based on periodically poled LiNbO<sub>3</sub> waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1453~1458  
王 健, 孙军强, 孙琪真. 周期域反转铌酸锂可调谐波长转换器的皮秒脉冲实验[J]. 光学学报, 2006, **26**(10): 1453~1458
- 5 Zhu Xiaozheng, Zhou Jun, Lou Qihong *et al.*. Experimental investigation of quasi-CW frequency-doubling of broad band fiber laser in periodically poled lithium niobate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1330~1334  
朱晓峥, 周 军, 楼祺洪 等. 宽带准连续光纤激光在周期极化铌酸锂中倍频特性的研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1330~1334
- 6 Wang Li, Han Xiyou. Influence on crystal matching length by group velocity delay in optical parametric process[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 313~317  
王 丽, 韩秀友. 参变过程中的群速延迟对晶体匹配长度的影响[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 313~317
- 7 Wang Li, Han Xiyou. Ultra-short Gaussian pulse expansion and deformation by high-order group velocity dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 138~142  
王 丽, 韩秀友. 高阶群速色散引起的高斯超短脉冲宽度的展宽和形变[J]. 光学学报, 2007, **27**(1): 138~142
- 8 H. Zhu, T. Wang, W. Zheng *et al.*. Efficient second harmonic generation of femtosecond laser at 1  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(10): 2150~2155
- 9 Gao Yanxia, Yang Jun, Fan Dianyuan. Theoretical research on frequency doubling of ultra-short pulse in Fibonacci optical superlattice[J]. *Science in China (Series A)*, 2000, **30**(4): 366~371  
高艳霞, 杨 军, 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 Z. Zheng, A. M. Weiner, K. R. Parameswaran *et al.*. Femtosecond second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate waveguides with simultaneous strong pump depletion and group-velocity walk-off [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 839~848
- 11 S. A. Diddams, H. K. Eaton, A. A. Zozulya *et al.*. Characterizing the nonlinear propagation of femtosecond pulses in bulk media[J]. *IEEE. J. Quantum Electron*, 1998, **34**(2): 306~316
- 12 J. K. Ranka, A. L. Gaeta. Breakdown of the slowly varying envelope approximation in the self-focusing of ultrashort pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7): 534~536
- 13 S. Tzortzakis, L. Sudrie, M. Franco *et al.*. Self-guided propagation of ultrashort IR laser pulses in fused silica[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(21): 213902
- 14 Chen Xiaowei, Zhu Yi, Liu Jun *et al.*. Self-compression of femtosecond laser pulses in normally dispersive solid material[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(11): 5178~5183  
陈晓伟, 朱 毅, 刘 军 等. 飞秒激光脉冲在正色散固体材料中的自压缩[J]. 物理学报, 2005, **54**(11): 5178~5183
- 15 Zhang Lifu, Fu Xiquan, Feng Zehu *et al.*. Experimental study of spatial self-confusing effect on chirped pulses [J]. *Science in China (Series G)*, 2008, **38**(10): 1372~1379  
章礼富, 傅喜泉, 冯则胡 等. 脉冲啁啾对空间小尺度自聚焦影响的实验研究[J]. 中国科学(G 辑), 2008, **38**(10): 1372~1379
- 16 A. A. Zozulya, S. A. Diddams, T. S. Clement. Investigations of nonlinear femtosecond pulse propagation with the inclusion of Raman, shock, and third-order phase effects[J]. *Phys. Rev. A.*, 1998, **58**(4): 3303~3310
- 17 M. Okada, K. Takizawa, S. Ieiri. Second harmonic generation by periodic laminar structure of nonlinear optical crystal[J]. *Opt. Commun.*, 1976, **18**(3): 331~334