

文章编号: 1001-4322(2004)01-0027-04

光强对短脉冲在准周期光学超晶格中传输的影响*

高艳霞¹, 范滇元²

(1. 深圳大学 理学院, 广东 深圳 518060; 2. 中国科学院 上海高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘 要: 在考虑自相位调制和高阶群速色散的情况下,分析了超短脉冲在准周期 Fibonacci 超晶格中传输时,入射光强对脉冲传输特性的影响。结果表明:入射光强度对脉冲传输特性影响很大,不但使频谱展宽,而且限制超晶格的有效长度,是超短脉冲进行频率转换的主要考虑因素之一。

关键词: 自相位调制; 群速色散; 准周期 Fibonacci 光学超晶格; 入射光强度

中图分类号: O437 **文献标识码:** A

随着 ICF 的发展,利用超短脉冲实现快点火(FIS)也越来越迫切^[1]。因而,研究超短脉冲的倍频已成为激光系统的一个关键的发展方向 and ICF 中很重要的一个环节,具有重要的学术价值和应用背景。超短脉冲倍频要满足两个匹配条件,即相位匹配及群速匹配。由于超短脉冲具有很宽的谱宽度,要在一个宽的谱线范围内同时满足这两个匹配条件是不容易的。而且超短脉冲在介质中传输及其频率转换特性受自相位调制(SPM)及群速色散效应(GVD)的影响,会使光束质量急剧变差,转换效率严重下降。解决 GVD 和 SPM 影响主要有两种途径:一是探索更加合理的频率转换方式,另一是寻找合适的非线性转换介质。从目前的实际情况来看,寻找新颖的转换介质更加活跃。本文旨在研究超短脉冲在这种特殊结构内传输过程中,入射光脉冲强度对脉冲传输特性的影响。以具有准周期(设置为光学 Fibonacci 序列)的铁电体 LiNbO₃ 的超晶格做例子,具体研究在这种排列的介质中,入射脉冲光强度对超短脉冲形状和频谱的影响,以便为超短脉冲频率转换实验提供更加有效的途径,为 ICF 快点火提供必要的理论依据。

1 理论分析

超短脉冲在光学超晶格中传输应遵循含时的波动方程。群速色散和自相位调制及其所产生啁啾是影响超短脉冲传播的两个重要因素,在考虑 GVD 和 SPM 的耦合效应时,方程变得复杂,是广义 Schrödinger 方程。当认为受喇曼散射和受激布里渊散射等效应均不发生及忽略超晶格损耗,考虑 SPM 及二阶 GVD,引入归一化振幅 $A(z, t) = \sqrt{P_0} U(z, t)$ 时,超短脉冲的传输方程可写为^[2]

$$\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \frac{1}{6} \frac{\partial^3 U}{\partial t^3} = - \frac{i}{2} \frac{k_0 n_2}{n_0} |U|^2 U \quad (1)$$

式中: k_0 是真空中光波矢; n_0 是线性折射率; n_2 为非线性折射率系数(由电子云畸变所致); P_0 是入射脉冲峰值功率; $v_g = d\omega/dk$ 是群速色散。在(1)式等号左边,第二项是整个脉冲包络的群延迟($u = 1/v_g$),对脉冲宽度短于 100fs 的频率转换来说,它是决定群速匹配的关键因素,但通常它对脉冲形变不起作用;第三、四项是一、二阶群速色散,在色散介质中,它们会产生 Walk-off 效应,从而导致脉冲展宽和畸变。方程(1)的解析解是很难得到的。本文将自相位调制和群速色散在细致结构上分开考虑^[3],利用分步傅里叶方法分析入射光强对脉冲传输特性的影响。

我们研究的超晶格是以具有层状铁电区结构的 LiNbO₃ 晶体为基本介质^[4],它包括两个长度分别为 l_A, l_B 的

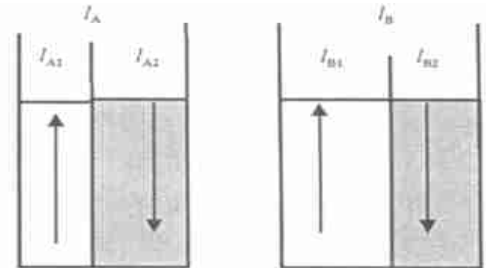


Fig. 1 Quasi-periodic optical super-lattice is made of two building blocks: A and B, each composed of one positive and one negative ferro-electric domain
图 1 组成 Fibonacci 超晶格的二个基本单元 A、B, 每个单元有两个极化矢量方向相反的区域

* 收稿日期:2003-01-28; 修订日期:2003-04-07

基金项目:广东省自然科学基金资助课题(000851)

作者简介:高艳霞(1972—),女,博士,副教授,主要研究方向为超短脉冲传输、倍频及其与物质的相互作用;E-mail:gyx468963@sohu.com。

基本单元 A, B, 每个单元包含两个极化矢量方向相反的区域, 如图 1 所示。图中 l_{A1} 表示单元 A 正区(可任意设某一极化矢量方向为正)厚度, l_{B1} 表示单元 B 正区厚度, l_{A2} 和 l_{B2} 表示单元负区(极化矢量与正区方向相反)厚度。在此基础上, 组合成一个数学上的 Fibonacci 排列, 方式如下: $S_j = S_{j-1} | S_{j-2}, j \geq 3, S_1 = A, S_2 = AB$, 其中“|”表示级联, 如图 2。对实际应用, 可设为: $l_{A1} = l_{B1} = l, l_{A2} = l(1 + \phi), l_{B2} = l(1 - \phi)$, ϕ 是黄金分割数, l 是可调整的参数, 根据具体情况, 通过调节 l , 可得到最佳超晶格结构。在数值计算中, 将长度为 $2L$ 的超晶格假想成由 M 个薄片组成, 每个薄片厚 $dz = 2L/M$, 设在某些片内, 脉冲仅受自相位调制作用, 在另外一些片中只受群速度色散作用, 且认为这些代表不同特性的片在脉冲传输过程中交替出现, 如图 3 所示, 这样就将问题简化。

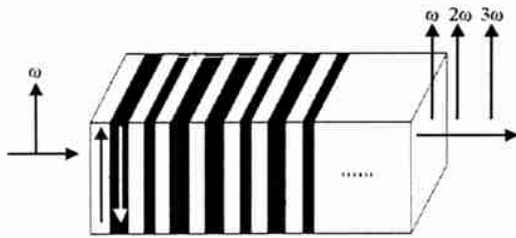


Fig. 2 Optical micro-graph of a super-lattice LiNbO₃ single crystal revealed by etching

图 2 按 Fibonacci 排列的 LiNbO₃ 单晶准周期超晶格

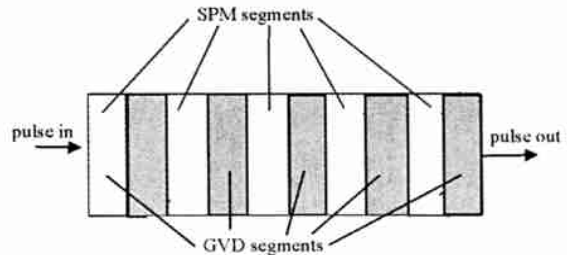


Fig. 3 Schematic of basic calculation. The segments are SPM and GVD alternately

图 3 基本算法图示: SPM 和 GVD 交替作用

2 传输模拟研究

在具体计算中: 时间空间利用 SPM 得到脉冲频谱的变化, 频率空间利用 GVD 得到脉冲形状的变化, 傅里叶变换在每两个片的交界面上进行, 相当于脉冲传播通过每个片两次 (SPM, GVD 各一次), 选取片足够薄, 保证计算精度, 为使模拟效果能够体现普遍性, 图示结果已做归一化。

取入射光中心波长 $\lambda = 1.054\mu\text{m}$, 脉宽 100fs , $n_2 = 26\text{pmV}^{-1[7]}$, LiNbO₃ Fibonacci 超晶格主要参数值为 $\phi = 1.618, \alpha = 0.23, l = 10.7\mu\text{m}$ 。根据 LiNbO₃ 的 Sellmeier 方程^[5], 群速度色散系数为 $\beta_0 = 1.331 \times 10^7 \text{m}^{-1}, \beta_1 = 8.415 \times 10^{-9} \text{sm}^{-1}, \beta_2 = 1.257 \times 10^{-24} \text{s}^2 \text{m}^{-1}, \beta_3 = 2.206 \times 10^{-39} \text{s}^3 \text{m}^{-1}$ 。首先, 就较低的入射光强 $P_0 = 9.0 \times 10^{10} \text{W/cm}^2$, Fibonacci 数为 15 的 LiNbO₃ 超晶格进行了模拟。发现在较低入射强度, 传播距离较短时, 传输过程中输出与输入脉冲形状几乎重叠, 未出现明显的展宽和畸变 (4 (a))。因而可推测, 这种 Fibonacci 排列的超晶格对由群速度色散造成的脉冲展宽效应有所抑制。同时也说明, SPM 和 GVD 的耦合效应较弱。当传播距离较长时 (图 5 (b)) 脉冲的展宽量仍然很小。另外由于基本单元 A 和 B 均由一正一负两极化矢量相反的区域组成, SPM 致啁啾亦有互相补偿的作用, 因而仔细调整基本单元 A 和 B 的结构, 选择最佳的结构参数, 群速度色散及自相位调制均会得到有效的控制^[6]。

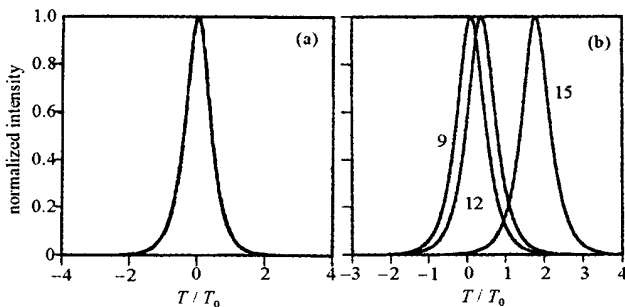


Fig. 4 Evolution of the pulse shape along Fibonacci super-lattice for Fibonacci number 3, 5, 7 (a) and 9, 12, 15 (b)

图 4 入射光强为 $P_0 = 9.0 \times 10^{10} \text{W/cm}^2$ 时,

Fibonacci 数为 3, 5, 7 (a) 和 9, 12, 15 (b) 时的输出脉冲形状

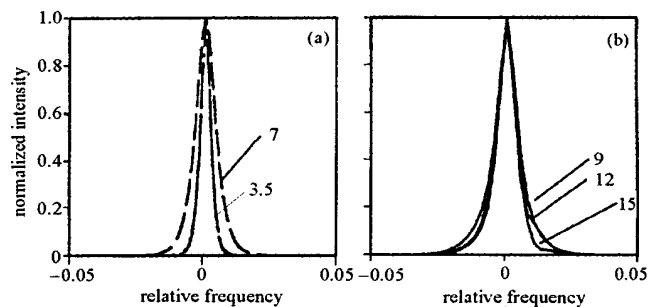


Fig. 5 Evolution of the pulse spectrum along Fibonacci super-lattice for Fibonacci number 3, 5, 7 (a) and 9, 12, 15 (b)

图 5 入射光强为 $P_0 = 9.0 \times 10^{10} \text{W/cm}^2$ 时,

Fibonacci 数为 3, 5, 7 (a) 和 9, 12, 15 (b) 时的输出脉冲频谱

由于准周期 Fibonacci 超晶格的两个基本单元由正、负两个铁电区组成, 从而使非线性相位变化量有所抵消。因而超短脉冲在传输中, 受到 SPM 的影响不大, 所以脉冲形状被拉平变方的趋势不明显。可以断定, 在较

低入射光强下,高阶色散可不予考虑。从整个形状的变化看,由于存在群速度色散,脉冲波包的前进速度受到影响,使得整个波包的速度发生变化,因而脉冲在传输过程中相对初始脉冲发生了移动,出现波包延迟。脉冲频谱(图 5(a))的不对称性结构几乎没有出现,同时随着超晶格长度的增加,频谱展宽并不严重,而且展宽呈对称趋势。

物理上,脉冲的群速度与光强有关。将入射光强增大到 $P_0 = 9.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$,脉冲传输形状(图 6)没有出现明显畸变,但波包延迟随传输距离增加而增大,脉宽有变窄趋势,脉冲形状变化很小。相对而言,脉冲传输过程中频谱的变化就复杂得多,如图 7 所示。当 Fibonacci 数大于 7 时,出现了非对称性展宽,在高频侧有振荡结构。随着超晶格长度增加(7(b)),与输入频谱(图 7(a)中 0)相比,频谱展宽很严重,对称性明显下降,出现多峰值结构,振荡在两侧同时出现,但向中心频率两侧的展宽量基本相等。最值得注意的是:脉冲能量集中于两频谱带。当 Fibonacci 数为 15 时,频谱分量已经几乎处于两频谱带内,但总的频谱展宽量并不大。图 7(b)之所以出现振荡结构,主要是由于随传播距离的增加,自相位调制导致脉冲频谱的展宽、对频率的瞬时调制即啁啾越来越明显。这强烈地影响到与脉冲频谱分量密切相关的群速度色散效应,而群速度色散又通过与 SPM 的耦合,改变了脉冲的时间和频率特性,从而使得自相位调制对瞬时频率的影响更加复杂,二者耦合在一起,使得脉冲频谱出现了无规律的振荡结构,调制性增强。

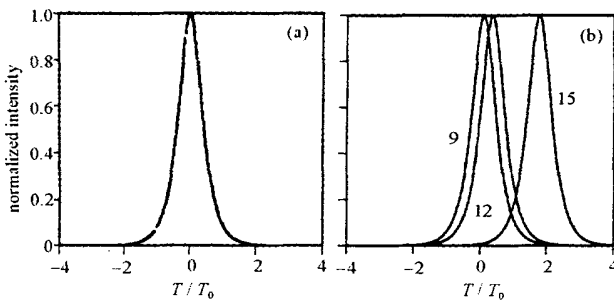


Fig. 6 Evolution of the pulse shape along Fibonacci super-lattice for Fibonacci number 3, 5, 7 (a) and 9, 12, 15 (b)

图 6 入射光强为 $P_0 = 9.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 时, Fibonacci 数为 3, 5, 7(a) 和 9, 12, 15(b) 时的输出脉冲形状

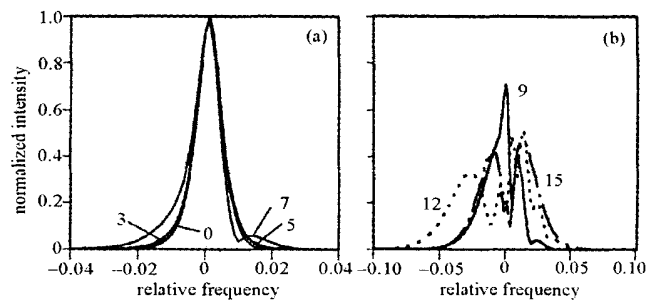


Fig. 7 Evolution of the pulse spectrum for Fibonacci number 3, 5, 7 (a) and 9, 12, 15 (b), and Fibonacci number 0 (a) input spectrum

图 7 入射光强为 $P_0 = 9.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 时,

Fibonacci 数为 3, 5, 7(a) 和 9, 12, 15(b) 时的输出脉冲频谱

以上模拟分析说明,在较低的入射光功率下,SPM 和 GVD 的耦合效应较弱。在适当光强下,对 Fibonacci 超晶格比较短时(Fibonacci 数小于 9),入射光强的大小对脉冲形状及频谱影响都较弱。此后继续传播,频谱的展宽比较小,只是脉冲延迟变得严重,这也是利用 Fibonacci 超晶格做超短脉冲频率转换的一个主要的原因。从脉冲频谱变化比形状变化更加复杂也说明,SPM 对强度更加敏感。

3 结 语

由于 Fibonacci 超晶格二基本单元产生的 SPM 有补偿作用,因而在更加合理的结构设计下,SPM 效应有望得到更好的改善。由此可见,这种超晶格将主要对超短脉冲传输过程频谱的畸变有所抑制,从而对脉冲形状也有所改善。从整个分析结果来看,利用这种 Fibonacci 超晶格做超短脉冲频率转换,对较低强度更加有利,但这将会影响转换所得的倍频光强度。同时由于传输过程中会存在脉冲延迟,如果超晶格过长,会使基波和谐波完全分开,相互作用停止。因而在实际应用中,对于超短脉冲频率转换而言,超晶格长度与入射光强度是一对在概念上几乎是同等关键的限制因素。较低强度允许使用较长的超晶格,而强度增强,有效的超晶格长度就会缩短。

参考文献:

- [1] Tabak M, Hammer I, Glinaky M E, et al. Ignition and high with ultra-powerful lasers[J]. *Phys Plasmas*, 1994, (1):1626—1630.
- [2] Liu H, Yao J Q, Ashok Puri. Second and third harmonic generation in BBO by femto-second Ti: sapphire laser pulses[J]. *Opt Lett*, 1994, **19**: 139—141.
- [3] Fisher R A, Bischel W K. Numerical studies of the interplay between self-phase modulation and dispersion for intense plane wave laser pulses[J]. *J Appl Phys*, 1975, **46**(11):4921—4933.
- [4] Zhu Y Y, Ming N B. Second-harmonic generation in a Fibonacci optical superlattice and the dispersive effect of the refractive index[J]. *Phys Rev*

- B*, 1990, **42**(6):3676—3679.
- [5] Smith D S. Refractive indices lithium niobate[J]. *Opt Commun*, 1976, **17**(3):332—340.
- [6] 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)
- [7] 高艳霞, 范滇元. 自相位调制及群速度色散对超短脉冲在准周期超晶格中传输的影响[J]. 物理学报, 1999, **48**(6):1060—1065. (Gao Y X, Fan D Y. Ultra-short pulse propagating in Fibonacci quasi-periodic optical super-lattice influenced by GVD and SPM. *Acta Physica Sinica*, 1999, **48**(6):1060—1065)

Ultra-short pulse propagating in Fibonacci optical super-lattice influenced by input intensity

GAO Yan-xia¹, FAN Dian-yuan²

(1. Department of Physical, College of Science, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: In this paper, taking into account both the self-phase-modulation (SPM) and the lowest and second order group velocity dispersion (GVD), the propagation equations of ultra-short pulses is given through numerical analysis. The influence of input intensity on ultra-short pulses in Fibonacci super-lattice is analyzed. The calculations show that the input intensity cause broadening in the spectrum and set a limit to effective length of super-lattice, which is an important factor for frequency conversion.

Key words: Self-phase modulation; Group velocity dispersion; Quasi-periodic Fibonacci optical super-lattice; Input intensity