

基于级联倍频机制无啁啾激光脉宽随晶体位相失配量的非线性变化

李恪宇¹ 冯斌^{1*} 孙立^{1,2} 向勇¹ 郭仪^{1,2} 黄征^{1,2} 孙志红¹ 李庆^{1,2}
谢娜^{1,2} 叶荣³ 王晓东^{1,2}

¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900
² 等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900
³ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 在无啁啾激光脉冲的非线性压缩过程中,基于级联倍频机制,对影响脉冲压缩的敏感因素——晶体位相失配量进行了理论分析和实验验证。当入射基频激光(即 1ω 光,波长为 800 nm,脉宽为 278 fs)进入 I 类二倍频 β -BaB₂O₄ (BBO) 晶体后,随着晶体位相失配量的增加,基频光的输出脉宽先降后升,这种趋势可总结为“U”字形非线性变化;当位相失配量为 40 mm^{-1} 时,脉宽缩至最小,此时脉宽压缩比最大。

关键词 非线性光学;级联倍频;自相位调制;附加相移;晶体位相失配量;脉宽压缩比

中图分类号 O437.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1219002

Nonlinear Pulse Width Change of Nonchirped Pulse Versus Crystal Mismatch by Cascaded Harmonic Generation

Li Keyu¹ Feng Bin¹ Sun Li^{1,2} Xiang Yong¹ Guo Yi^{1,2} Huang Zheng^{1,2}
Sun Zhihong¹ Li Qing^{1,2} Xie Na^{1,2} Ye Rong³ Wang Xiaodong^{1,2}

¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
² Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Mianyang, Sichuan 621900, China
³ School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract Based on the cascaded frequency-harmonic mechanism during the course of nonlinear compression of nonchirped laser pulse, the sensitive factor affecting the pulse compression of crystal phase mismatch is analyzed theoretically and validated experimentally. After the input fundamental pulse (namely, 1ω , 0.8- μm wavelength and 278-fs pulse width) propagates through the type I second harmonic generation β -BaB₂O₄ (BBO) crystal, the 1ω output pulse width is shortened firstly and widened again with the increase of crystal phase mismatch. This trend can be summarized as the “U” grapheme nonlinear change. The output pulse width is shortened to the least value and the highest compression ratio of pulse width is obtained when the crystal mismatch is 40 mm^{-1} .

Key words nonlinear optics; cascaded harmonic generation; self-phase modulation; extra phase; crystal mismatch; compression ratio of pulse-width

OCIS codes 190.4410; 190.3270

1 引言

对于不同输出功率的超短脉冲装置末端,脉冲

压缩研究的重点是光栅线性压缩及其测量技术^[1-2],对于已压缩至傅里叶变化极限的无啁啾脉

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(11304293,11174258)

作者简介: 李恪宇(1976—),男,硕士,副研究员,主要从事高功率激光技术与非线性光学方面的研究。

E-mail: likeyu6969@163.com

* 通信联系人。E-mail: fengbin_mail@tom.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

冲,原则上已不能再采用光栅进行压缩。但是,可以考虑采用其他非线性脉冲压缩技术进行再次压缩,这已成为国内外研究的热点与难点,比如惰性气体中成丝压缩脉冲技术^[3-4]、参量放大技术^[5-6]、充气空心光纤技术^[7-8]等。但是由于各种局限性,上述3种技术难以得到应用和推广。本文针对级联倍频压缩技术,研究了影响输出脉宽和压缩比的关键因素——晶体位相失配量,并对其进行了相应的理论

分析和实验验证,为无啁啾脉冲非线性压缩技术的探索提供了参考。

2 物理模型

沿着晶体厚度方向,基频光进行纵向传输时,在振幅慢变包络近似条件下, β -BaB₂O₄ (BBO)晶体二倍频(SHG)的耦合波方程组可表示为^[9]

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} = i\xi_1 \frac{\partial^2 A_1}{\partial \eta^2} - i\rho_1 A_1^* A_2 \exp(-i\Delta kL) - i\sigma_1 (|A_1|^2 A_1 + 2|A_2|^2 A_1), \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} = -\zeta \frac{\partial A_2}{\partial \eta} + i\xi_2 \frac{\partial^2 A_2}{\partial \eta^2} - \frac{1}{2} i\rho_2 A_1^2 \exp(+i\Delta kL) - i\sigma_2 (|A_2|^2 A_2 + 2|A_1|^2 A_2), \quad (2)$$

式中 A_1 、 A_2 分别为基频光和二倍频光的电场振幅, $|A_1|^2 A_1$ 、 $|A_2|^2 A_2$ 分别为基频光和二倍频光自身的自相位调制项(SPM), η 为时间轴的变换关系, Δk 为晶体位相失配量, ζ 为群速度失配项, ξ_1 和 ξ_2 为与群速度色散有关的物理量, σ_1 与 σ_2 为与三阶非线性系数 $\chi^{(3)}$ 有关的耦合系数, ρ_1 与 ρ_2 为与非线性系数 d_{eff} 的线性相关物理量。如果设计并满足一定的条件,使得如图1所示的多次倍频回流,则在这种级联倍频效应的物理过程中,两种光由于光强的瞬时快速变化,会引起其自身的相位调制,即SPM效应使两种光均产生附加相移。本文只关注输入基频光的脉宽压缩比,因此只讨论基频光的脉宽变化。

导致无啁啾脉冲的频率在时间轴上重新进行分布和排布,即无啁啾脉冲又变成了啁啾脉冲。脉冲两侧频率 ω 与光脉冲的中心频率 ω_0 有不同的瞬时频率差,其差值 $\delta\omega(T)$ 为

$$\delta\omega(T) = -\frac{\partial \Delta\Phi_{\text{NL}}(L, T)}{\partial T} \cong \frac{\omega^2 d_{\text{eff}}^2 L^2}{c^2 n_1 n_2 \Delta k} \times \frac{\partial |A_1(L, T)|^2}{\partial T}. \quad (4)$$

根据(3)和(4)式可知,为了在正色散BBO晶体中实现脉宽压缩,必须保证晶体位相失配量 $\Delta k > 0$, 即附加非线性相移 $\Delta\Phi_{\text{NL}}(L, T)$ 为负数,就能保证能(4)式系数项 $\frac{\omega^2 d_{\text{eff}}^2 L^2}{c^2 n_1 n_2 \Delta k}$ 为正。这样,从脉冲前沿至脉冲后沿,激光瞬时频率越来越小,则 $\partial\omega/\partial T$ 为负,即由附加负相移 $\Delta\Phi_{\text{NL}}(L, T)$ 产生负啁啾。

与光纤中的非线性效应类似,负啁啾激光在正色散BBO晶体中进行传输时,由于激光的自压缩效应,输出脉宽得到一定的压缩。并且,从(3)和(4)式中发现,输出脉宽对晶体位相失配量非常敏感。因为,不同的位相失配量 Δk 决定了附加相移 $\Delta\Phi_{\text{NL}}(L, T)$ 和频率差 $\delta\omega(t)$ 的大小,从而影响输出脉宽和压缩比。

3 Δk 影响规律的理论计算

由上述分析可知,基于多次倍频回流机制,进行无啁啾激光脉宽压缩的关键是使基频光产生附加足够的负相移,进而引起频谱展宽和负啁啾。考虑到I类BBO的有效非线性系数 $d_{\text{eff}}^{\text{SHG}}$ 为 2.00 pm/V,远大于其他晶体,因此,采用I类BBO晶体进行级联倍频来压缩 800 nm 的基频光,其谐波转换过程为

$$800.0(\text{o}) + 800.0(\text{o}) = 400.0(\text{e}). \quad (5)$$

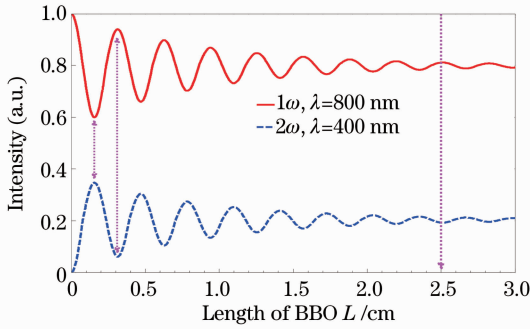


图1 级联倍频的物理过程示意图

Fig. 1 Scheme of cascaded harmonic generation

根据(1)式和(2)式,输入基频光的附加非线性相移 $\Delta\Phi_{\text{NL}}(L, T)$ 可以近似表示为^[10]

$$\Delta\Phi_{\text{NL}}(L, T) \approx -\frac{\omega^2 d_{\text{eff}}^2 |A_{10}|^2 L^2}{c^2 n_1 n_2 \Delta k}. \quad (3)$$

式中 d_{eff} 为晶体的有效非线性系数, c 为光速, n_1 与 n_2 分别为基频光和倍频光的折射率, ω 为基频光的圆频率。由于 $\Delta\Phi_{\text{NL}}(L, T)$ 与时间有关,因此SPM将导致无啁啾脉冲的频谱展宽,瞬时变化的相位会

其他计算条件如下：入射脉宽为 300 fs 左右，晶体厚度为 25 mm。如图 2 所示，计算了在功率密度为 20~30 GW/cm² 时，位相失配量 Δk 对脉冲压缩效果的影响。

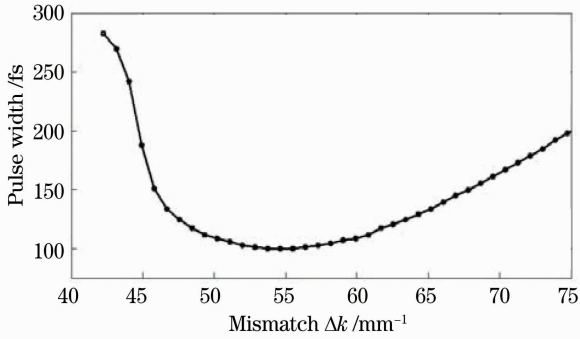


图 2 1ω 光输出脉宽随晶体位相失配量的变化
Fig. 2 1ω output pulse width change versus crystal mismatch

从图 2 可以看出，在固定基频光强等参数的条件下，随着位相失配量 Δk 的增大，基频光的输出脉宽呈现出先降后升的“U”字形非线性变化，并且当 Δk 为 50~60 mm⁻¹ 时，输出脉宽达到最小值。这是因为当 Δk 较小时，根据级联倍频机制，二倍频效率的小信号近似解为

$$\eta_{\text{SHG}} = \kappa \times I_{1\omega} \times \frac{\sin^2(\Delta k \times L/2)}{(\Delta k \times L/2)^2} = \kappa \times I_{1\omega} \times \sin^2(\Delta k \times L/2). \quad (6)$$

从(6)式可知，二倍频效率呈“类似阻尼”震荡曲线，

当 $(\Delta k \times L/2) = k\pi$ (k 为整数) 时，倍频效率为极小值，在基频功率密度和晶体长度固定的前提下，当 Δk 较小时，转换效率高，倍频回流所需的周期 L 较长，即在 25 mm 的晶体厚度内，逆转换次数非常少，从而难以实现两种光光强在时间上的急剧变化，即倍频压缩效果不明显；随着 Δk 的增加，倍频回流周期变短，在 25 mm 的晶体厚度内逆转换次数增加，两种光光强在时间上急剧变化，则附加相移变大，压缩效果显著。当 Δk 增加到 50~60 mm⁻¹ 时，倍频压缩效果最为显著；随着 Δk 的继续增加，由于二次谐波转换效率太低，导致倍频回流过程难以充分发生，则压缩效果再次变差。

从图 2 可知，若要获得较好的压缩效果，对于功率密度和晶体厚度等参数一定的初始脉冲，应在此“U”型非线性变化曲线中，使位相失配量在一个合适值，才能得到最短输出脉宽和最大压缩比。

4 验证实验

采用激光聚变研究中心的 SILEX-I 超短脉冲激光装置，如图 3 和图 4 所示进行实验光路排布。脉宽测量采用频率分辨的光学开关测量系统 (FROG)，通过电缆将 FROG 与电脑连接，直接显示脉冲波形和脉宽。由于 FROG 仪器的测试范围为 30~300 fs，为尽量减少测量误差，并与理论模拟计算的初始条件基本一致，调节压缩器光栅的相关参数，使得激光器的输出脉宽为 278 fs，从而保证经过晶体后压缩的基频光脉宽还在该测量范围内。

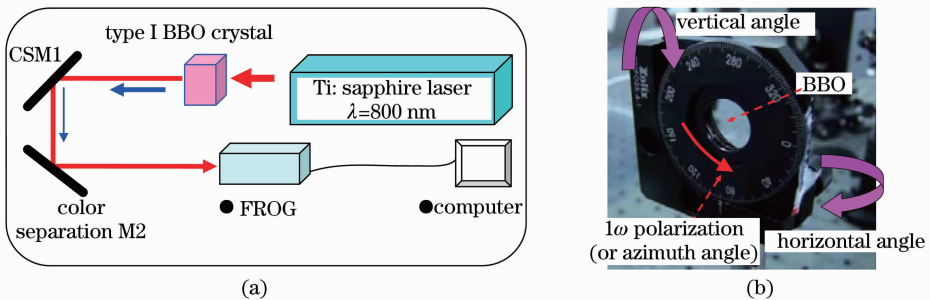


图 3 (a) I 类 BBO 晶体脉冲压缩实验光路图；(b) 单块 BBO 晶体图
Fig. 3 (a) Experimental setup for pulse compression in type I BBO crystal; (b) single BBO crystal

利用 FROG 测试光斑的脉宽及其分布，测试数据的精度受调试误差的影响非常大。因此，实验过程严格按照以下 3 步骤进行，以确保实验数据的置信度和准确性：1) FROG 准直调试：光谱仪测量光斑的时空为对称分布，并且保证测试误差小于 5%，如图 5 所示；2) SILEX-I 输出脉宽调试：调节压缩器光栅对距离，使输出脉宽为 278 fs；3) BBO 倍频

晶体三维调试：将晶体精调至最佳匹配，再沿着敏感轴方向调整晶体的失谐角，测试 1ω 光输出脉宽随晶体的失谐角(即晶体位相失配量)的变化规律，如图 6 所示，其中 10 mm⁻¹ 对应晶体的旋转角度为 5.72 mrad。

从图 6 可以看出，随着晶体位相失配量的增加，输出脉宽呈先降后升的“U”字形非线性变化，当位

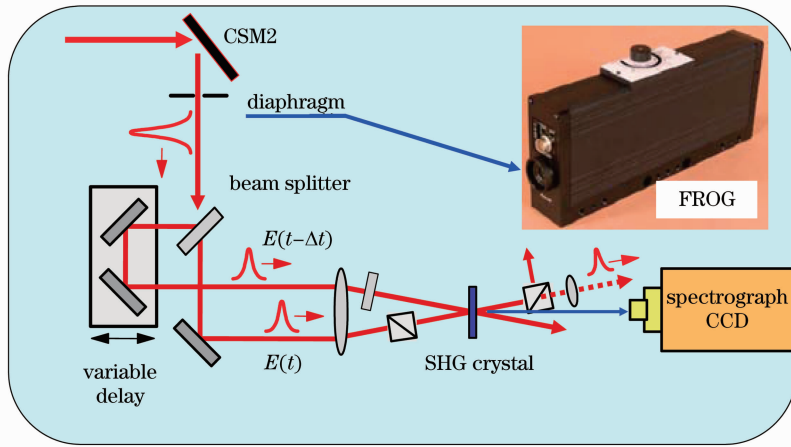


图 4 FROG 测试装置的光路等效图

Fig. 4 Experimental setup for FROG equipment

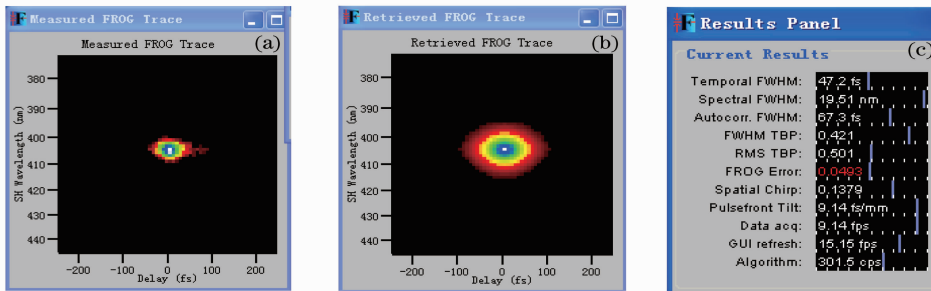


图 5 FROG 调试后所测光斑结果。(a)原始数据图;(b)反演恢复图;(c)光斑参数表(FROG 测试误差 $<5\%$)

Fig. 5 Measured laser spot after FROG debugging. (a) Original data; (b) renewed data from original data (middle); (c) parameters table (FROG measure error $<5\%$)

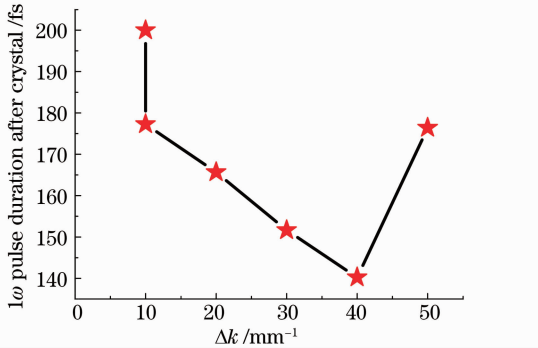


图 6 1ω 光输出脉宽随晶体位相失配量的非线性变化测量结果

Fig. 6 Measured nonlinear pulse width change of 1ω pulse versus crystal mismatch

相失配量为 40 mm^{-1} 时,脉宽最小,脉宽压缩比最大。

对比图 2 和图 6 可知,虽然不同位相失配量值下的输出脉宽值和“U”字形曲线谷底所对应的位相失配量值稍有差异,但已实验证明了 1ω 光输出脉宽随晶体位相失配量呈现出先降后升的“U”字形变化,从而证明了理论计算及其分析的正确性。对于

级联倍频机制,必须充分理解并控制敏感因素——晶体位相失配量对 1ω 光输出脉宽的影响规律,并且利用这一规律,找到晶体位相失配量的最佳值,从而得出最短输出脉宽和最大压缩比。

5 结 论

理论分析了晶体位相失配量这一敏感因素在级联倍频机制过程中的影响机理和特征,同时对波长为 800 nm 的基频光脉冲,进行了理论计算和“U”字形变化的机理分析。利用 I 类二倍频 BBO 晶体进行实验,研究发现,当晶体前输入 1ω 光脉宽为 278 fs ,功率密度为 50 GW/cm^2 时,随着晶体位相失配量的增加,输出脉宽呈先降后升的“U”字形非线性变化;当位相失配量为 40 mm^{-1} 时,脉宽缩至最小值,可获得最大脉宽压缩比。研究结果将有利于级联倍频压缩机制的进一步深入研究和将来的工程应用。

参 考 文 献

1 He Kai, Liu Shijie, Hou Yongqiang, *et al.*. Broadband and high

- resolution spectral measurement technique for pulse compression gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1005002z.
- 何凯, 刘世杰, 侯永强, 等. 用于脉冲压缩光栅的宽带高分辨率光谱测量技术[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1005002.
- 2 Fanyu Kong, Yunxia Jin, Shijie Liu, *et al.*. Femtosecond laser damage of broadband pulse compression gratings [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(10): 102302.
 - 3 G Stibenz, N Zhavoronkov, G Steinmeger. Self-compression of millijoule pulses to 7.8 fs duration on a white-light filament [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(2): 274–276.
 - 4 O Shorokhov, A Pukhov, I Kostyukov. Self-compression of laser pulses in plasma [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(26): 265002.
 - 5 A Baltuska, T Fuji, T Kobayashi. Visible pulse compression to 4 fs by optical parametric amplification and programmable dispersion control [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(5): 306–308.
 - 6 A Shirakawa, I Sakane, M Takasaka, *et al.*. Sub-5-fs visible pulse generation by pulse-front-matched noncollinear optical parametric amplification [J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(11): 2268–2270.
 - 7 C Vozzi, M Nisoli, G Sarsone, *et al.*. Optimal spectral broadening in hollow-fiber compressor systems [J]. *Appl Phys B*, 2005, 80(3): 285–289.
 - 8 G Sansone, G Steinmeger, C Vozzi, *et al.*. Mirror dispersion control of a hollow fiber supercontinuum [J]. *Appl Phys B*, 2004, 78(5): 551–555.
 - 9 Sidick E, Knoesen A, Dienes A, *et al.*. Ultrashort-pulse second-harmonic generation. I. Transform-limited fundamental pulses [J]. *J Opt Soc Am B*, 1995, 12(9): 1704–1712.
 - 10 Desalvo R, Vanherzeele H, Hagan D J, *et al.*. Self-focusing and self-defocusing by cascaded second-order effects in KTP [J]. *Opt Lett*, 1992, 17(1): 28–30.

栏目编辑：张雁