

频率转换过程中强度调制的形成机制及抑制方法

王 芳 冯 斌 李富全 韩 伟 贾怀庭 李恪宇 向 勇

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 通过理论推导建立了频率转换过程中强度调制形成的物理模型,认为基频光的强度和相位扰动都将导致三倍频光强度的调制。采用数值模拟方法定量研究了频率转换过程中强度调制的演化规律,研究结果表明通过优化倍频晶体失谐角可以降低基频光强度扰动对三倍频强度调制的影响,而增加频率转换器的接受带宽则可以抑制基频光相位扰动的影响。此外,由于三倍频效率最优和时间调制度最小时对应的混频晶体失谐角略有差别,在优化设计时应综合考虑两个因素的影响。

关键词 非线性光学;频率转换;强度调制;正弦调频脉冲;FM-to-AM 效应

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0302014

Formation and Suppression of Amplitude Modulation in Frequency Conversion

Wang Fang Feng Bin Li Fuquan Han Wei Jia Huaiting Li Keyu Xiang Yong

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621900, China)

Abstract The physical model of amplitude modulation formation in frequency conversion process is established by theoretical derivation, amplitude modulation of tripling beam can be caused by both amplitude modulation and phase aberration of fundamental beam. The evolution process of amplitude modulation during the third harmonic generation (THG) is researched by numerical simulation, the results show that tripling amplitude modulation caused by fundamental amplitude modulation can be reduced by optimize doubling crystal detuned angle, while the influence of fundamental phase aberration can be depressed by increasing accepting bandwidth of frequency converter. Moreover, because there is a little difference in the optimized tripling detuned angle between optimal THG efficiency and minimal temporal modulation, both factors in an optimal design should be synthesised.

Key words nonlinear optics; frequency conversion; amplitude modulation; sinusoidal frequency-modulation pulse; FM-to-AM effect

OCIS codes 190.0190; 190.2620; 190.4160

1 引 言

在惯性约束核聚变(ICF)领域,高功率固体激光驱动器既要满足物理实验对打靶激光的要求,又要保证自身运行的安全,需要采用具有一定光谱宽度的激光脉冲^[1,2]。一方面,ICF物理实验对焦斑均匀性有很高的要求,通常采用宽带光结合光谱色散匀滑技术来提高靶照均匀性,以抑制激光与等离子体相互作用过程中的受激拉曼散射等非线性效应^[3~5]。另一方面,高功率激光系统中的大口径光

学元件容易产生横向受激布里渊散射(TSBS)效应^[6,7],损失能量并破坏光学元件,采用小宽带光可以有效抑制TSBS效应^[8]。美国的国家点火(NIF)装置和法国的兆焦耳激光(LMJ)装置都采用正弦相位调制器展宽光谱来获得宽带脉冲。

理论上,为增加带宽引入的纯相位调制是不会引起光束强度变化的。但光束经过传输放大以及频率转换等过程后,频率调制将转化为振幅调制,即产生“FM-to-AM”效应^[9~11]。从近场的角度来看,强

收稿日期:2010-05-10;收到修改稿日期:2010-11-22

基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金(2008B04010143)资助课题。

作者简介:王芳(1983—),女,硕士,助理研究员,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: aimeewf@gmail.com

度调制将直接或间接(增强自聚焦和SBS等非线性效应)导致脉冲的瞬时功率密度超过光学元件的损伤阈值^[12],从而造成破坏。从远场的角度来看,强度调制可能造成多路光束的束间辐照不均匀性,增强SBS及受激拉曼散射(SRS)等非线性效应,放大等离子体不稳定性。更为重要的是,高效的ICF物理实验需要对时间波形精密整形,时域上的强度调制将直接影响物理实验的效果。宽带光对抑制SBS效应和改善束匀滑效果有着非常重要的作用,但由宽带光引入的“FM-to-AM”效应对物理实验的效果和激光器自身的安全性都有诸多不利因素,应加以补偿或抑制。本文采用解析推导和数值模拟方法,着眼于研究频率转换过程强度调制的形成机制、影响因素及抑制方法。

2 理论分析

为了更形象地描述宽带三倍频(THG)过程中强度调制增长的物理图像,采用解析方法推导了三倍频光强度调制与基频光振幅及时间相位扰动之间的关系。高强度三倍频是一个非常复杂的非线性过程,影响三倍频转换效率和光束质量的因素众多,包括基频光功率密度、频率、时间调制、倍频和三倍频晶体失谐角,以及近场强度扰动、相位畸变和晶体折射率不均匀性等空间效应^[13~15]。为简化分析,推导过程中忽略了空间效应的影响,且对于一个特定的装置,晶体长度和失谐角都为固定值,可认为三倍频效率只是基频光强度和频率的函数。

假设基频光场 $A_1(t)$ 由平面波 A_{10} 和一个扰动因子 $\rho(t)$ 组成,即

$$A_1(t) = A_{10}[1 + \rho(t)], \quad (1)$$

当满足条件 $\rho(t) \ll 1$ 时,基频光场可以表示为振幅扰动 ρ_R 和相位扰动 ρ_I 的函数,即

$$A_1(t) = A_{10}(1 + \rho_R + i\rho_I) \approx A_{10}(1 + \rho_R)\exp(i\rho_I), \quad (2)$$

设 η 表示三倍频效率, I_1 为基频光强度, ω_1 为基频光频率,而 $\Delta\eta$, ΔI_1 和 $\Delta\omega_1$ 则分别表示三倍频效率、基频光强度和频率的扰动,则三倍频效率扰动可以写成

$$\Delta\eta \approx \frac{\partial\eta}{\partial I_1}\Delta I_1 + \frac{\partial\eta}{\partial\omega_1}\Delta\omega_1. \quad (3)$$

根据(2)式不难获得

$$\Delta I_1 = I_1[(1 + \rho_R)^2 - 1]$$

$$\Delta\omega_1 = \frac{\partial\rho_I}{\partial t}. \quad (4)$$

因此三倍频效率可以表示为

$$\eta = \eta_0 + \frac{\partial\eta}{\partial I_1}I_1[(1 + \rho_R)^2 - 1] + \frac{\partial\eta}{\partial\omega_1}\Delta\omega_1 \approx \eta_0 + \frac{\partial\eta}{\partial I_1}I_12\rho_R + \frac{\partial\eta}{\partial\omega_1}\frac{\partial\rho_I}{\partial t}. \quad (5)$$

令

$$\Lambda = \frac{1}{\eta_0}\frac{\partial(\eta I_1)}{\partial I_1}$$

$$\pi = \frac{1}{2\eta_0}\frac{\partial\eta}{\partial\omega}, \quad (6)$$

则有

$$\eta^{1/2} \approx \eta_0^{1/2}\left[1 + (\Lambda - 1)\rho_R + \pi\frac{\partial\rho_I}{\partial t}\right]. \quad (7)$$

不难看出,括号中的第二项和第三项分别表示基频光振幅扰动和相位扰动对三倍频转换效率的影响。式中 η_0 为平均三倍频转换效率。根据(1),(2)式,假设三倍频光场 $A_3(t)$ 可写成平面波 A_{30} 以及振幅扰动 ρ'_R 和相位扰动 ρ'_I 的函数,有

$$A_3(t) = A_{30}(1 + \rho'_R)\exp(i\rho'_I), \quad (8)$$

另一方面,根据三倍频转换效率的定义,三倍频光场振幅可以表述为

$$|A_3(t)| = \eta^{1/2}|A_1(t)|. \quad (9)$$

结合(2),(7),(8)和(9)式,并略去二阶小量,可得

$$A_{30}(1 + \rho'_R) = \eta^{1/2}A_{10}(1 + \rho_R) = \eta_0^{1/2}\left[1 + (\Lambda - 1)\rho_R + \pi\frac{\partial\rho_I}{\partial t}\right]A_{10}(1 + \rho_R) \approx A_{30}\left[1 + \Lambda\rho_R + \pi\frac{\partial\rho_I}{\partial t}\right]. \quad (10)$$

因此,三倍频振幅扰动项可以表示为

$$\rho'_R = \Lambda\rho_R + \pi\frac{\partial\rho_I}{\partial t}. \quad (11)$$

不难看出,(11)式中第一项表示基频光振幅扰动对三倍频强度调制的贡献,第二项则为基频光相位调制引起的三倍频光强度调制,也就是FM-to-AM效应。

对于正弦调频宽带光,设 ω_{10} 为基频光的中心频率, σ 和 Ω 分别为正弦相位调制器的调制深度和调制频率,则其光场表达式可写为

$$A_1(t) = A_{10}(t)\exp[-i\omega_{10}t - i\sigma\sin(2\pi\Omega t)], \quad (12)$$

其相位扰动项为

$$\rho_I = \sigma\sin(2\pi\Omega t), \quad (13)$$

将(13)式代入(11)式,可获得三倍频光振幅扰动为

$$\rho'_R = \frac{1}{\eta_0}\left(I_1\frac{\partial\eta}{\partial I_1} + \eta_0\right)\rho_R +$$

$$\frac{1}{2\eta_0} \frac{\partial \eta}{\partial \omega} 2\pi\sigma \Omega \cos(2\pi\Omega t). \quad (14)$$

从(14)式的第二项则可看出,只要 $\partial\eta/\partial\omega$ 不为零,不同时刻相位调制对三倍频强度扰动的贡献不同,从而导致三倍频光时间波形存在振幅调制。此外,从(14)式第一项不难看出,三倍频光调制随着基频光强度扰动幅度的增加而加剧,因此需要严格控制正弦调频光在传输放大过程中引入的时间强度调制,不过当 $\partial\eta/\partial I_1$ 小于零时,三倍频光振幅扰动可以小于基频光振幅扰动。

3 数值模拟

通过 2 节的理论推导获得了基频光相位调制引起三倍频光振幅扰动的解析表达式,同时给出了基频光振幅调制对三倍频振幅调制的影响关系,可以

通过数值模拟来获得定量分析结果,探索降低激光装置运行过程中三倍频光的振幅调制方法。计算过程中,基频光的空间分布为平面波,时间分布为正弦调频光,平均功率密度为 2 GW/cm^2 ,脉宽为 2 ns ,带宽为 1.2 nm 。

采用数值模拟方法计算了不同条件下基频光振幅扰动对三倍频光振幅扰动的影响,如图 1 所示。其中频率转换器采用单倍单混方案,倍频晶体厚度为 12 mm ,三倍频晶体厚度为 9 mm 。不难看出,随着倍频晶体失谐角 $\Delta\theta_{\text{SHG}}$ 的变化,基频光时间调制对三倍频时间调制的影响不同,适当减小倍频晶体失谐角,可以在保证高效率的同时降低基频光时间调制对三倍频时间调制的影响,这与(14)式获得的结论一致。

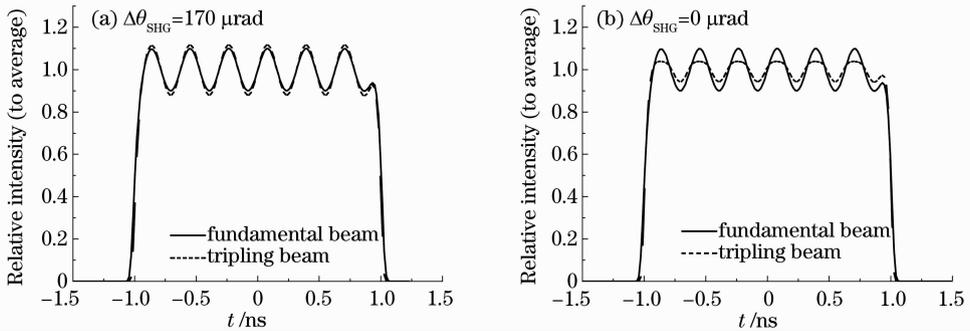


图 1 不同失谐角时的三倍频光时间调制

Fig. 1 Temporal modulation of tripling beam with different detuned angles

图 2 为三倍频转换效率随基频光波长的变化曲线,其中“12+9+9”表示频率转换器为单倍双混方案,由一块 12 mm 厚的倍频晶体和两块 9 mm 厚的三倍频晶体组成,而“12+9”则表示频率转换器为单倍单混方案,由一块 12 mm 厚的倍频晶体和一块 9 mm 厚的三倍频晶体组成。“12+9+9”方案对应的匹配带宽约为 1.4 nm ,为“12+9”方案的两倍,当激光装置的基频光带宽为 1.2 nm 时,采用单倍双混方案可大大减小频率转换过程中的“FM-to-AM”效应,从而降低三倍频光的时间强度调制水平。

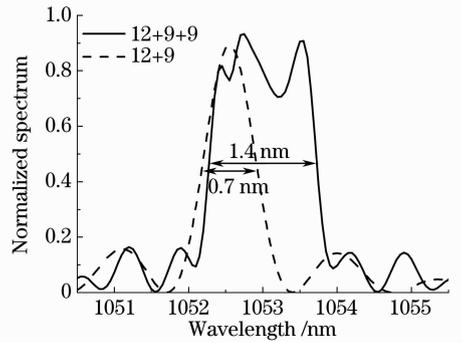


图 2 三倍频效率随波长的变化曲线

Fig. 2 THG efficiency versus wavelength

图 3 为理想的正弦调频宽带光(基频光不存在强度调制)的三倍频光时间调制细节结构,其时间调制细节结构与图 2 中的效率调谐曲线一致。而图 4 则为基频光存在 10% 的强度调制时三倍频光的时间调制特征,其细节结构除了效率调谐曲线的烙印外,还受基频光强度调制的影响。

图 5,6 则为三倍频效率和时间调制度随混频晶体失谐角的变化,一般来说,三倍频转换效率越高,三倍频光的时间调制度越低,但三倍频效率最优和时间调制度最小时对应的混频晶体失谐角略有差别,时间调制度对应的最佳失谐角要略小,这与图 1 的分析结果一致。

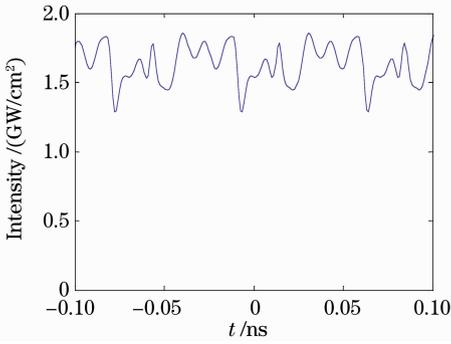


图 3 理想正弦调制宽带光的三倍频时间调制特征

Fig. 3 Tripling beam temporal modulation character of ideal sinusoidal frequency-modulation pulse

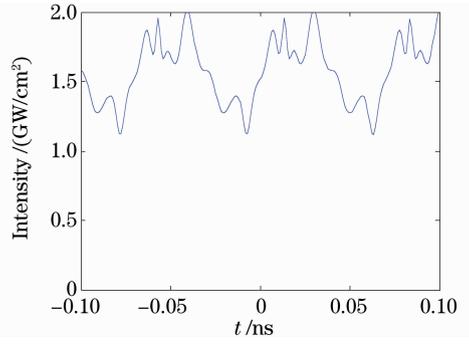


图 4 基频光存在 10% 的强度调制时三倍频时间的调制特征

Fig. 4 Tripling beam temporal modulation character of sinusoidal frequency-modulation pulse with ten percent intensity modulation depth

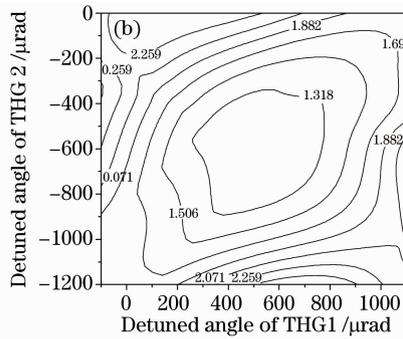
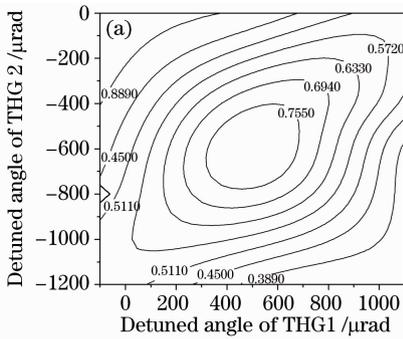


图 5 三倍频效率(a)和时间调制度(b)随晶体失谐角的变化

Fig. 5 THG efficiency (a) and temporal modulation (b) gradient curve versus detuned angle

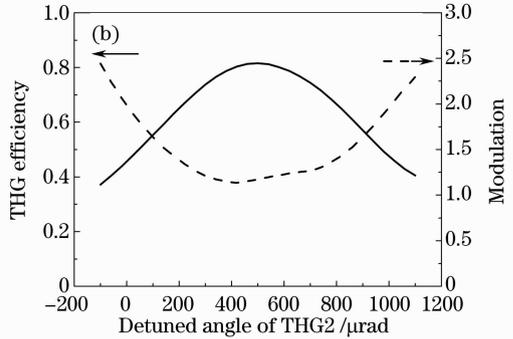
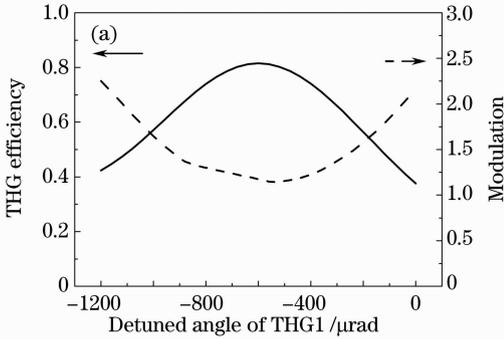


图 6 三倍频效率和时间调制度随晶体失谐角的变化

Fig. 6 THG efficiency (a) and temporal modulation (b) curve versus detuned angle

4 结 论

基频光时间强度调制将引起三倍频光强度调制,通过优化晶体参数使系统在 $\partial\eta/\partial I < 0$ 运行,可在一定程度上降低该效应导致的三倍频光强度调制,但仍需严格控制基频光段的“FM-to-AM”效应;由于倍频器的匹配带宽有限,宽带光各频率成分的转换效率不一样,会导致时间波形出现强度调制。通过采用晶体级联的方法增加频率转换器的接收带

宽,可以降低该过程中的“FM-to-AM”效应;通常三倍频效率越高,时间调制度越小。但三倍频效率最优和时间调制度最小时对应的混频晶体失谐角略有差别,在优化设计时应综合考虑两个因素的影响。

参 考 文 献

1 Bercegol Herve, Lamaignere Laurent, Cavaro Vincent *et al.*. Filamentation and surface damage in fused silica with single-mode and multi-mode pulses[C]. *SPIE*, 2006, **5991**: 59911Z

- 2 Hu Yonghua, Wang Youwen, Wen Shuangchun *et al.*. Suppression of nonlinear imaging in high-power laser by pulse bandwidth[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(9): 1474~1478
胡勇华, 王友文, 文双春等. 带宽对强光束非线性成像的抑制效应[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(9): 1474~1478
- 3 Zhang Rui, Zhang Xiaomin, Su Jingqin *et al.*. Temporal beam smoothing technique using chirped pulse stacking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1512~1516
张锐, 张小民, 粟敬钦等. 采用啁啾脉冲堆积的时间束平滑技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1512~1516
- 4 S. Skupsky, R. W. Short, J. Kessler *et al.*. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *Appl. Phys.*, 1989, **66**(8): 3456~3462
- 5 Li Keyu, Wei Xiaofeng, Cai Bangwei *et al.*. Transverse stimulated Raman scattering in tripler of ICF driver for long pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(8): 776~780
李恪宇, 魏晓峰, 蔡邦维等. ICF驱动器长脉冲下三倍频晶体中的横向受激拉曼散射[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(8): 776~780
- 6 J. R. Murray, J. Ray Smith, R. B. Ehrlich *et al.*. Experimental observation and suppression of transverse stimulated Brillouin scattering in large optical components[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(12): 2402~2411
- 7 Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Zhou Ping *et al.*. Numerical study on damage phenomenon induced by transverse stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(11): 3766~3770
郭少锋, 陆启生, 周萍等. 横向受激布里渊散射诱导破坏的数值研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(11): 3766~3770
- 8 T. G. Parham, S. Azevedo, J. Chang *et al.*. Large aperture optics performance[R]. LLNL-TR-410955, 2009
- 9 J. E. Rothenberg, D. F. Browning, R. B. Wilcox. The issue of FM to AM conversion on national ignition facility[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 51~61
- 10 Steve Hocquet, Denis Penninckx, Edouard Bordenave *et al.*. FM-to-AM conversion in high-power lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(18): 3338~3349
- 11 S. Hocquet, G. Lacroix, D. Penninckx. Compensation of frequency modulation to amplitude modulation conversion in frequency conversion systems[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(13): 2515~2521
- 12 Wang Fang, Su Jingqin, Li Keyu *et al.*. Increase law of near-field beam modulation in 3ω optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 92~97
王芳, 粟敬钦, 李恪宇等. 三倍频光学系统中近场调制增长规律研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 92~97
- 13 Kong Chenhui, Ji Lailin, Zhu Jian. Design and precision analysis of offline crystal frequency tripling alignment adjusting system for SG-II[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(10): 101403
孔晨晖, 季来林, 朱俭. “神光II”装置三倍频离线调试系统设计与测试精度分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(10): 101403
- 14 Zeng Shuguang, Zhang Bin. Inverse problem of frequency tripling of pulses stacking laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2561~2564
曾曙光, 张彬. 脉冲堆积激光三倍频过程的逆问题[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2561~2564
- 15 Tang Shunxing, Ji Lailin, Ouyang Xiaoping *et al.*. Improve the adjusting reliability of optimum matching angular of the frequency tripling of high power laser by laser near field CCD diagnostic device[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 262~264
唐顺兴, 季来林, 欧阳小平等. 利用 CCD 近场仪提高高功率激光器三倍频最佳匹配角的调节可靠度[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 262~264