

频率转换过程中调频到调幅效应的解析量化

王伟 李平 李海 耿远超 韩伟 赵润昌* 栗敬钦 张小民

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 在高功率激光驱动器中, 调频到调幅(FM-to-AM)效应是制约聚变点火的一个关键物理量, 因而需要定性分析和定量评估。基于晶体的可接受带宽, 从光谱畸变和瞬时频率两个角度研究了频率转换过程中 FM-to-AM 效应的物理机制。利用瞬时频率定性分析了相位调制和强度调制之间的相关性, 得到了晶体最佳匹配角度情况下三倍频强度调制频率的变化规律。根据推导出的表征调制度的解析模型, 定量分析了三倍频输出强度调制特性, 量化了输入带宽和功率密度对调制度的影响, 通过数值模拟验证了该模型的可靠性。所得结果为抑制三倍频过程中 FM-to-AM 引起的强度调制提供了理论指导。

关键词 非线性光学; 频率转换; 调频到调幅; 强度调制; 调制度

中图分类号 O437.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0102009

Analytical Quantification of FM-to-AM Effects in Frequency Conversion

Wang Wei Li Ping Li Hai Geng Yuanchao Han Wei Zhao Runchang
Su Jingqin Zhang Xiaomin

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

Abstract In high power laser driver, frequency modulation to amplitude modulation (FM-to-AM) effect is a key parameter that could restrict fusion ignition, so qualitative investigation and evaluation are necessary. Based on acceptable bandwidth of the crystal, the physical mechanism of FM-to-AM effect in the process of frequency conversion is investigated from aspects of spectrum aberration and instantaneous frequency, respectively. Using instantaneous frequency, the correlation between phase modulation and intensity modulation is qualitatively analyzed, and the variation regularity of modulation frequency regarding the third harmonic generation (THG) intensity at the optimal phase matching angle is presented. With analytical derivation of modulation degree model, the modulation characteristics of output THG laser are quantitatively analyzed and the influences of input bandwidth and power density on THG intensity modulation are quantitatively studied as well. By numerical simulation, the reliability of the model is verified. All obtained results can give theoretical guide to suppress intensity modulation induced by FM-to-AM effects in THG process.

Key words nonlinear optics; frequency conversion; FM-to-AM; intensity modulation; modulation degree

OCIS codes 140.3515; 140.3518; 190.0190

1 引言

在激光惯性约束聚变高功率激光装置, 如法国兆焦耳装置(LMJ)及美国国家点火装置(NIF)中, 激光时间波形的精密控制是确保激光与靶丸理想作用效果的一个关键要素和重要性能指标^[1-3]。在高功率激光驱动器中, 通常采用具有一定线宽的激光脉冲结合光谱色散匀滑(SSD)技术来提高靶面辐照

均匀性, 从而达到抑制激光与等离子体相互作用过程中的受激拉曼散射(SRS)等有害非线性效应。同时, 一定线宽的激光脉冲可以有效抑制晶体和熔石英等大口徑光学元件的横向受激布里渊散射(SBS)过程, 降低元件的损伤风险, 提高装置的负载能力^[4-6]。目前主要通过正弦相位调制器来实现脉冲光谱展宽, 理想情况下纯粹的相位调制不会引起脉

收稿日期: 2013-07-25; 收到修改稿日期: 2013-09-15

作者简介: 王伟(1983—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: weiwang-06@caep.ac.cn

*通信联系人。E-mail: rcz_77@163.com

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

冲强度调制。但经过一系列传输放大和频率转换元件的光谱滤波作用,频率调制将会部分转换为幅度调制,即调频到调幅(FM-to-AM)效应^[7-11]。强度调制将破坏光束质量,使得脉冲瞬时功率密度超过元件的损伤阈值,造成元件激光诱导损伤,影响装置的安全运行。另一方面,物理靶丸要求每个时刻脉冲强度高度一致,强度调制会影响物理过程辐照均匀性,放大等离子体不稳定性^[12-13]。综上所述,脉冲波形精密控制的关键和难点即为抑制一定线宽的激光在传输放大和倍频过程的 FM-to-AM 效应。

本文主要针对一定线宽的激光脉冲在频率转换过程中的 FM-to-AM 效应进行了定性理论分析和定量解析表征。从光谱畸变和瞬时频率两个角度,建立了频率转换过程中 FM-to-AM 形成的物理模型。获得了频率转换过程中,相位调制和强度调制各自调制频率之间的相关性,分析了输入信号带宽对强度调制的影响。基于小信号解析解,推导了三倍频(THG)过程中由晶体可调谐带宽引起强度调制的解析模型,量化了三倍频波形的带宽和功率密度对调制度的影响。相关结果的获得对抑制终端系统的 FM-to-AM 效应技术方案提供了理论依据。

2 FM-to-AM 定性分析

2.1 光谱畸变角度

FM-to-AM 转换的广义解释为,一定线宽的光信号在传输放大等过程中,各频率成分的强度和相位改变并非一致,从而导致脉冲波形的变形,如果该光信号是被周期相位调制的,那么输出波形也将出现与频率调制类似的强度调制特性。通常,经过相位调制器调制后的脉冲形式可以表示为

$$E(t) = \exp\left[-0.5 \ln 2 \left(\frac{t}{2T}\right)^{2m}\right] \exp[i\sigma \sin(2\pi f_m t)], \quad (1)$$

式中 m 为超高斯脉冲阶数, σ 为调制深度, f_m 为调制频率, T 为脉冲半峰全宽, 脉冲的带宽为 $2\sigma f_m$ 。由傅里叶变换可知,任何周期函数都可以分解成以正弦函数为基的傅里叶级数的形式,所以只要具有周期性相位分布的信号其频谱必定是离散的,即时域的周期性结构在频域上必然表现为一定的离散性^[14]。无强度调制的平顶正弦调频脉冲光谱如图 1 所示,图中可以看出其频谱是由一系列离散的单一频率组成,为中间低两边高的梳状分布。这些频率成分间隔相同,且相干叠加后,刚好得到一个平滑的时间波形。

在三倍频过程中,晶体可接受调谐带宽如图 2

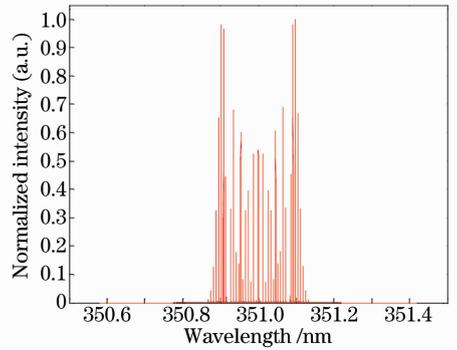


图 1 平顶正弦调频脉冲光谱分布

Fig. 1 Spectral distribution of flat-top sinusoidal modulated pulse

所示,从图中可以看出,在晶体最佳匹配角度下,中心波长三倍频转换效率最高,而边频处三倍频效率下降明显,表明可接受带宽类似于一个广义的滤波器,可以改变光谱强度,使得不同光谱成分倍频转换后频谱强度会出现较大差异,根据逆傅里叶变换,脉冲波形将出现相对应的强度调制。

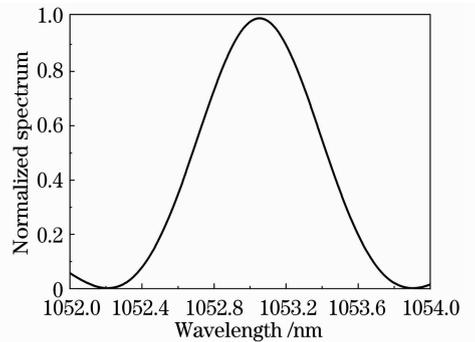


图 2 晶体可接受调谐带宽

Fig. 2 Acceptable frequency conversion bandwidth of crystal

晶体的调谐带宽使得原来频率成分的组合发生的变化如图 3 所示,其频谱变为中间高两边低的梳状分布,此时由频率差而导致的拍频将会表现出来,拍频与频率成分的间隔相关,这个拍频就是时域的

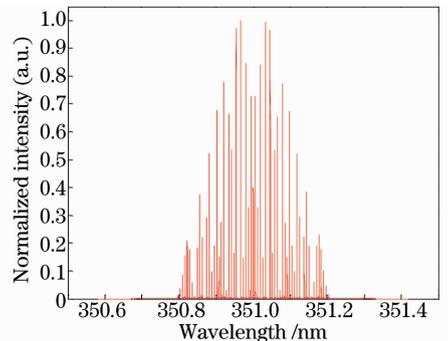


图 3 强度调制脉冲光谱分布

Fig. 3 Spectral distribution of intensity modulation pulse

幅度调制率。

2.2 瞬时频率角度

对于信号

$$E(t) = A(t)\exp[i\phi(t)], \quad (2)$$

瞬时频率(IF)定义为^[15]

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\phi'(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial\phi(t)}{\partial t}. \quad (3)$$

因此,上述正弦调频脉冲的瞬时频率可表示为

$$\omega_i(t) = \omega_{i0} + 2\pi\sigma f_m \cos(2\pi f_m t). \quad (4)$$

由(4)式可以看出,瞬时频率随时间以正弦形式周期性变化,其周期与调制频率相关。

以一个周期内瞬时频率的变化为基础来定性分析三倍频过程中的强度调制特性。从图2中晶体可接受带宽可以看出,在最佳三倍频匹配角处可以实现中心频率的相位匹配,因而获得中心频率处的最高转换效率,相反,与中心频率间隔越远,相应的频率转换效率越低,且转换效率关于中心频率对称分布,即相等的频率偏移量对应频率的三倍频转换效率相等。基于三倍频转换过程这一特性,在满足中心频率相位匹配的条件下,一个瞬时频率周期内三倍频强度调制的时间波形特性如图4所示。

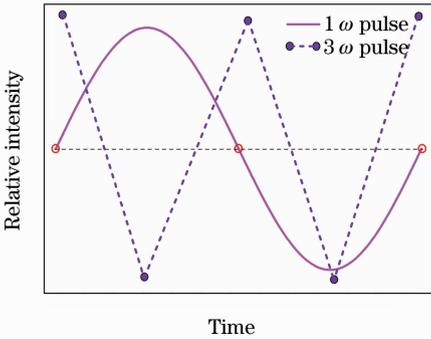


图4 三倍频强度调制特性

Fig. 4 Characteristics of THG intensity modulation

图4中,实线描述了一个任意周期内瞬时频率随时间的变化曲线,圆圈符号表示该周期内中心频率的位置,实心点表征了几个典型频率处的三倍频相对强度。为简单起见,此处用任意的线性关系(不代表实际的物理意义)来描述引起的三倍频强度调制的时间特性,如图4中虚线所示。从图4可以清晰地发现,当满足相位匹配条件时,三倍频光强度调制的调制频率是入射基频光相位调制频率的两倍。

为了验证这一重要结论,在输入功率密度为 2 GW/cm^2 时,数值模拟了基频光波长为 1053 nm , 相位调制频率为 5 GHz , 线宽为 100 GHz 的 2 ns 脉宽 40 阶超高斯脉冲的三倍频激光输出波形,如图5中实线所示,三倍频光波长为 351 nm , 脉冲宽度为

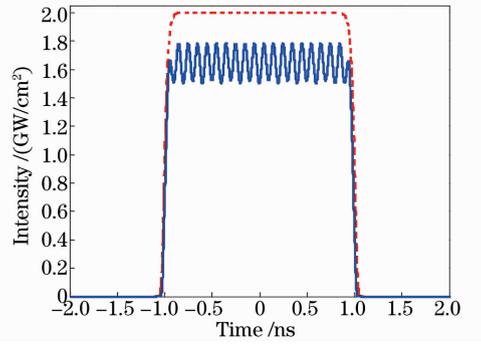


图5 三倍频输出波形数值模拟

Fig. 5 Numerical simulation of output THG waveform 2 ns , 图中虚线为输入基频光波形。对比基频光调制频率发现,三倍频强度调制频率为 10 GHz , 为相位调制频率的两倍,与定性分析结果相一致。

3 FM-to-AM 解析量化

为了量化由 FM-to-AM 转换引起的强度调制程度,通常引入调制度这一物理量来表示表征:

$$\alpha = 2 \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (5)$$

式中 I_{\max} , I_{\min} 分别表示输出脉冲的最大和最小光强。从(5)式可以看出,调制度的范围在 $0 \sim 2$ 之间,且在理想情况下等于 0,即没有 FM-to-AM 转换过程。

根据耦合波方程组,小信号情况下三次谐波解析解可近似表示为^[16]

$$A_3(\Delta k) = A_{3\max} \exp\left(i \frac{\Delta k L}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{\Delta k L}{2}\right), \quad (6)$$

式中 Δk 为相位失配, L 为三倍频晶体的厚度。从(6)式可以看出,由于复指数函数表征一个时间延迟,不会产生幅度调制,因而产生调制的根源在于 sinc 函数项中的相位失配,也就是频率转换过程中的光谱可接受带宽。基于晶体可接受带宽,相位失配与输入波长相对中心波长的偏移量有一定的比例关系,可看成幅度滤波函数,进行泰勒级数展开并忽略高阶项,其强度滤波函数表达式为

$$I_c(\lambda) \approx 1 - \frac{\gamma^2}{3} (\lambda - \lambda_c)^2, \quad (7)$$

式中 λ_c 为相位匹配的中心波长,即滤波函数的中心, γ 为与光谱接受带宽有关的参量,定义为滤波系数。将(7)式代入(5)式可以得到在中心波长相位匹配情况下,输出三倍频光调制度的解析表达为

$$\alpha = \frac{I_c(\lambda_c) - I_c(\lambda_c + 1/2\Delta\lambda)}{I_c(\lambda_c) + I_c(\lambda_c + 1/2\Delta\lambda)} = \frac{\gamma^2/3 (\lambda_c^2 \sigma f_m / c)^2}{1 - (\gamma^2/6) (\lambda_c^2 \sigma f_m / c)^2}, \quad (8)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为输入脉冲的光谱带宽。

通常情况下,随着光强的增加,可接受带宽会变小,滤波系数会变大,对于典型的“11+9”单倍单混频率转换设计^[17],可接受带宽理论计算结果如图 6 所示。

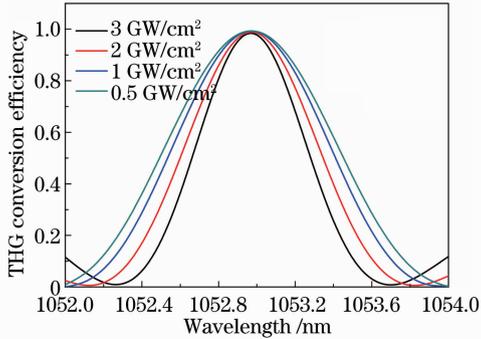


图 6 不同功率密度下晶体可接受带宽

Fig. 6 Acceptable bandwidths of crystal under various power densities

通过拟合不同功率密度下可接受带宽曲线,得到几个常用输入功率密度下滤波系数 γ 的值,并通过数值模拟进行验证。滤波系数的光强曲线如图 7 所示,滤波系数随输入光强的增加而变大,与理论分析相符合。

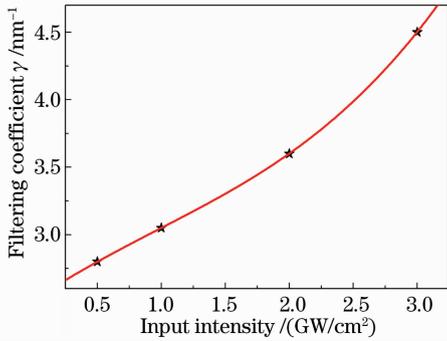


图 7 滤波系数随光强变化

Fig. 7 Filtering coefficient versus input intensity

为了验证调制度解析模型的有效性,相应的数值计算结果对比如图 8 所示。从图 8 中可以看出,在低入射功率密度下,数值结果和解析结果符合较好,但在高功率密度下,小输入带宽情况时一致性较好,而随着带宽增加两者差异逐步显现,且带宽越大差异性越明显。

事实上,该差异从推导小信号近似的角度可以很容易解释,由于在高功率密度下,接受带宽的限制非常明显,因而小信号近似和泰勒级数展开精度不够,解析模型的有效性将大大降低。为了更深入理解,可以通过计算得到的 100 GHz 带宽输入情况下调制度对光强的灵敏度曲线来说明这一差异,如

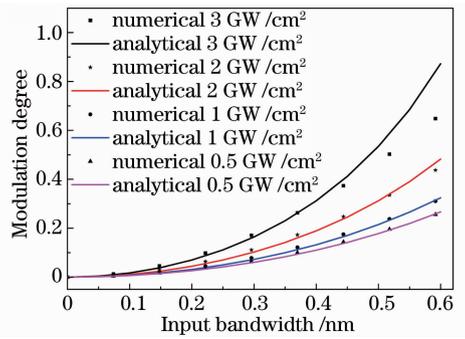


图 8 不同输入光强和带宽下调制度

Fig. 8 Modulation degrees under various input intensities and bandwidths

图 9 所示。

从图 9 中发现,在低功率密度下调制度曲线的斜率变化非常缓慢,因此解析曲线和数值模拟可以较好地吻合,但在高功率密度下,即使很小的强度增加,调制度也会急剧上升,这说明在高功率密度下调制度对入射强度很敏感,可接受带宽受限严重,解析模型的有效性会出现由于小信号近似导致的偏差。在实际应用中,一般入射光强要控制在 KDP 晶体的损伤阈值 3.0 GW/cm² 以下,因而该解析模型的精度能够满足实用性的要求。

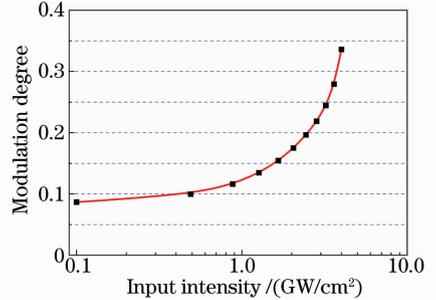


图 9 调制度对光强的灵敏度曲线

Fig. 9 Sensitivity curve of modulation degree versus input intensity

4 结 论

从光谱畸变和瞬时频率研究了频率的角度转换过程中形成 FM-to-AM 效应的物理机制。基于晶体的可接受带宽,定性分析了三倍频强度调制与相位调制之间的相关性,获得了最佳位相匹配角下三倍频强度调制频率为相位调制频率两倍的特性。基于耦合波方程小信号解析解,建立了三倍频强度调制的解析模型,量化了输出三倍频时间波形的调制度,数值计算验证了理论模型的可靠性。理论分析了输入信号带宽和功率密度对三倍频强度调制的影响,获得了调制度灵敏度关系曲线。所获得结果对

研究高功率激光驱动器强度调制和抑制 FM-to-AM 效应具有理论指导意义。

参 考 文 献

- 1 P Wegner, J Auerbach, T Biesiada, *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[C]. SPIE, 2004, 5341: 180-189.
- 2 G H Miller, E I Moses, C R Wuest. The national ignition facility[J]. Opt Eng, 2004, 43(12): 2841-2853.
- 3 Wang Fang, Feng Bin, Li Fuquan, *et al.*. Formation and suppression of amplitude modulation in frequency conversion[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302014.
王芳, 冯斌, 李富全, 等. 频率转换过程中强度调制的形成机制及抑制方法[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302014.
- 4 J R Murray, J R 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.
- 5 M A Norton, E E Donohue, M D Feit, *et al.*. Growth of laser damage in SiO₂ under multiple wavelength irradiation[C]. SPIE, 2006, 5991: 599108.
- 6 Li Fuquan, Han Wei, Zhang Xiaomin, *et al.*. Research status of final optics assembly in high power laser facility[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 060002.
李富全, 韩伟, 张小民, 等. 高功率激光驱动器终端光学组件研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 060002.
- 7 Chen Ying, Wang Lulu, Liu Guangcan, *et al.*. FM-to-AM effect in the frequency conversion of broadband Nd: galss laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1202009.
陈英, 王路露, 刘光灿, 等. 宽带钕玻璃激光谐波转换过程中的幅度调制效应[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1202009.
- 8 Fu Xiaofang, Ma Weiguang, Tan Wei, *et al.*. Theoretical and experimental researches on the detection phase determination of frequency modulation spectroscopy based on the residual amplitude modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0530002.
付小芳, 马维光, 谭巍, 等. 基于残余幅度调制确定频率调制

- 光谱探测相位的理论和实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0530002.
- 9 S Hocquet, D Penninckx, E Bordenave, *et al.*. FM-to-AM conversion in high-power lasers[J]. Appl Opt, 2008, 47(18): 3338-3349.
- 10 J E Rothenberg, D F Browning, R B Wilcox. The issue of FM to AM conversion on the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1999, 3492: 1-12.
- 11 S Hocquet, E Bordenave, J P Goossens, *et al.*. Amplitude modulation filtering of FM-to-AM conversion due to the focusing grating of LMJ[J]. J Phys, 2008, 112(3): 032016.
- 12 J E Rothenberg. Ultrafast picket fence pulse trains to enhance frequency conversion of shaped inertial confinement fusion laser pulses[J]. Appl Opt, 2000, 39(36): 6931-6938.
- 13 J D Lindl, P Amedt, R H Berger, *et al.*. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. Phys Plasmas, 2004, 11(2): 365-380.
- 14 S Hocquet, D Penninckx, J F Gleyze, *et al.*. Nonsinusoidal phase modulations for high-power laser performance control: stimulated Brillouin scattering and FM-to-AM conversion[J]. Appl Opt, 2010, 49(7): 1104-1115.
- 15 Lam A Bui, Mark D Pelusi, Trung D Vo, *et al.*. Instantaneous frequency measurement system using optical mixing in highly nonlinear fiber[J]. Opt Express, 2009, 17(25): 22983-22991.
- 16 Zeng Shuguang, Zhang Bin. Inverse problem of frequency tripling of pulses stacking lasers[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.
- 17 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.

栏目编辑: 史敏