

宽带钕玻璃激光谐波转换过程中的幅度调制效应

陈 英^{1,2} 王路露¹ 刘光灿¹ 夏 旭³ 傅喜泉²

¹长沙学院电子与通信工程系, 湖南 长沙 410003
²湖南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410012
³湖南安全技术职业学院电气与信息工程系, 湖南 长沙 410151

摘要 从时域的耦合波方程出发,数值研究了宽带钕玻璃激光谐波转换装置中输出三倍频脉冲的幅度调制效应,提出在三倍频的和频过程中加入一束窄带脉冲来抑制输出脉冲的幅度调制效应。研究表明,窄带脉冲的引入可大大减缓群速度失配对相位匹配带宽的限制,从而可以很好地抑制三倍频脉冲的幅度调制效应;对于目前所需要的带宽为 1 THz 的紫外脉冲,传统三倍频基本装置中的幅度调制深度为 180%,采用上述方案后,三倍频脉冲的幅度调制深度降低到 20%。

关键词 非线性光学;幅度调制效应;宽带窄带激光混频;钕玻璃激光

中图分类号 O437;TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1202009

FM-to-AM Effect in the Frequency Conversion of Broadband Nd:Glass Laser

Chen Ying^{1,2} Wang Lulu¹ Liu Guangcan¹ Xia Xu³ Fu Xiquan²

¹Department of Electronic and Communication, Changsha University, Changsha, Hunan 410003, China
²College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410012, China
³Department of Electrical and Information Engineering, Hunan Vocational Institute of Safety Technology, Changsha, Hunan 410151, China

Abstract Based on the time-dependent nonlinear coupled wave equations, the amplitude modulation (AM) effect of third-harmonic pulse in the frequency conversion device of broadband Nd:glass is studied numerically. To suppress this AM effect of output third-harmonic generation pulse, an added narrowband Nd:glass laser pulse is mixed with the broadband laser pulse in the sum-frequency process of tripling configuration. Numerical results show that the limited phase-matching bandwidth due to the group-velocity-mismatch effects are substantially alleviated with the assist of a narrowband pulse. As a result, for a required third-harmonic wave with 1 THz bandwidth, the defined relative modulation of pulse intensity is as large as 180% in the conventional baseline design, while it will be reduced to only 20% by using the proposed scheme.

Key words nonlinear optics; FM-to-AM effect; mixing narrowband and broadband pulses; Nd:glass laser

OCIS codes 190.2620; 320.7110; 140.3580

1 引 言

在目前的惯性约束聚变(ICF)激光驱动器中,为了抑制大口径光学元件中的横向受激布里渊散射(SBS)^[1,2]和结合谱色散匀滑技术(SSD)^[3,4]以改善

激光的辐照均匀度,通常引入相位调制模块对单纵模激光进行频谱展宽。美国的国家点火装置(NIF)和法国的兆焦耳激光装置(LMJ)都采用正弦相位调制器来获得宽带的激光脉冲。理论上,为增加带宽

收稿日期: 2012-08-01; **收到修改稿日期**: 2012-09-15

基金项目: 湖南省教育厅资助科研项目(12C0472)、长沙学院引进人才科研启动基金(SF1001)和长沙学院光电信息技术创新团队科研基金(10700-99008)资助课题。

作者简介: 陈 英(1983—),男,博士,讲师,主要从事超短脉冲的非线性光学效应方面的研究。

E-mail: yingchen@hnu.edu.cn

引入的纯相位调制不会引起光脉冲的幅度发生变化的。然而,光脉冲经传输、放大以及频率转换等过程后,其频率调制(FM)会转化为幅度调制(AM),即产生“FM-to-AM”效应^[5,6]。这种效应导致原来平滑的光脉冲在时域波形上出现尖峰振荡,影响激光脉冲的整形能力,降低系统的安全运行能量。由于聚变过程中有多束激光从不同方向压缩靶丸,这要求入射激光脉冲的强度必须高度对称,光脉冲幅度的调制可能会导致点火失败,甚至靶丸破裂。光脉冲的强度变化还会放大等离子体的不稳定性^[7][向后受激拉曼散射(SRS)、布里渊散射等]。因此,宽带激光脉冲的幅度调制效应必须得到很好的抑制。

对于宽带脉冲的传输、放大等过程引起的幅度调制效应,研究者找到了一些补偿方法,如利用色散延迟线可以补偿群速度色散引起的幅度调制^[5];利用可调的 Lyot 过滤器可以补偿前置放大器中增益窄化引起的幅度调制等^[8]。然而,在宽带钽玻璃激

光的频率转换过程中,三倍频(THG)脉冲的幅度调制效应(基频光的频率调制转化为三倍频光的幅度调制)是由基波和谐波之间的相位失配引起的,因而很难得到较好的补偿或抑制^[9,10]。目前,LLE 实验室使用二维的 SSD 技术,已经能够对带宽为 1 THz 的紫外激光进行光束匀滑^[11],所以高效地获得 1 THz 带宽的三倍频激光,以及很好地控制其脉冲的幅度调制效应显得尤为重要。本文提出了一种由宽带激光脉冲(相位调制脉冲)与窄带脉冲混频产生宽带紫外脉冲的谐波转换方案来抑制输出三倍频脉冲的幅度调制效应。

2 理论模型

时域耦合波方程用于研究宽频带钽玻璃激光的三倍频过程。对于 I 类倍频过程,其耦合波方程组为^[12]

$$\begin{cases} \frac{\partial E_1(z,t)}{\partial z} = -\frac{i\omega_1 d_1}{n_1 c} E_2(z,t) E_1^*(z,t) \exp(-i\Delta k_1 z) \\ \frac{\partial E_2(z,t)}{\partial z} + v_g^{21} \frac{\partial E_2(z,t)}{\partial t} = -\frac{i\omega_2 d_1}{n_2 c} E_1^2(z,t) \exp(i\Delta k_1 z) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $E_1(E_2)$ 为基频(倍频)光的复振幅; v_g^{21} 、 $\omega_1(\omega_2)$ 和 $n_1(n_2)$ 分别表示 1ω 光和 2ω 光之间的群速度失配因子、 $1\omega(2\omega)$ 光的中心频率以及折射率。 d_1 为倍频过程的有效非线性系数; $\Delta k_1 = 2k_1 - k_2$ 为中心波长处的波矢失配。使用倍频过程类似的参量标识,II 类和频过程的耦合波方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial E_1(z,t)}{\partial z} = -\frac{i\omega_1 d_2}{n_1 c} E_3(z,t) E_2^*(z,t) \exp(-i\Delta k_2 z) \\ \frac{\partial E_2(z,t)}{\partial z} + v_g^{21} \frac{\partial E_2(z,t)}{\partial t} = -\frac{i\omega_2 d_2}{n_2 c} E_3(z,t) E_1^*(z,t) \exp(-i\Delta k_2 z) \\ \frac{\partial E_3(z,t)}{\partial z} + v_g^{31} \frac{\partial E_3(z,t)}{\partial t} = -\frac{i\omega_3 d_2}{n_3 c} E_1(z,t) E_2(z,t) \exp(i\Delta k_2 z) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $\Delta k_2 = k_3 - k_2 - k_1$ 。在吉瓦每平方厘米量级的光强、大口径光束的条件下,耦合波方程中忽略了二阶以上的非线性效应以及光束的空间效应(衍射、空间走离等)。其中 KDP 或 KD^*P 晶体参数(如折射率、有效非线性系数等)均源自于文献^[12,13],输入的基频光为 40 阶的超高斯脉冲,中心波长为 $1.053 \mu\text{m}$,脉冲宽度为 2 ns,基频光的光强为钽玻璃激光的典型工作光强 $3 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。用电光晶体对单纵模的激光进行时间相位调制,产生的随时间变化的相位: $\Phi(t) = \delta \sin 2\pi\Omega t$,相应的激光半峰全宽(FWHM)为 $2\delta\Omega$ 。钽玻璃激光系统中三倍频的基本装置为 11 mm 的 KDP 倍频晶体(偏离相位匹配角 $250 \mu\text{rad}$)和 9 mm 的 KD^*P 晶体^[14]—前一后组成

三倍频器。

图 1 清晰地显示了在宽带高功率激光的三倍频过程中,输入基频光的频率调制最终转化为输出三倍频光脉冲的幅度调制。引入的相位调制导致窄带基频光的频谱变宽[图 1(a)带宽为 100 GHz],这并不会直接引起基频光脉冲的幅度调制效应[图 1(b)中的虚线]。但是基频光经过非线性光学晶体转换为三倍频光后,此时输出三倍频光的时间形状发生了明显的畸变[图 1(b)中的实线]。采用调制深度 α 来表征光脉冲幅度调制效应的大小,定义为^[6,15]

$$\alpha = 2 \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3)$$

式中 $I_{\max}(I_{\min})$ 是光脉冲中强度的极大值(极小值)。

理想情况下 $\alpha=0$ ，即脉冲是光滑的，没有强度的起伏。

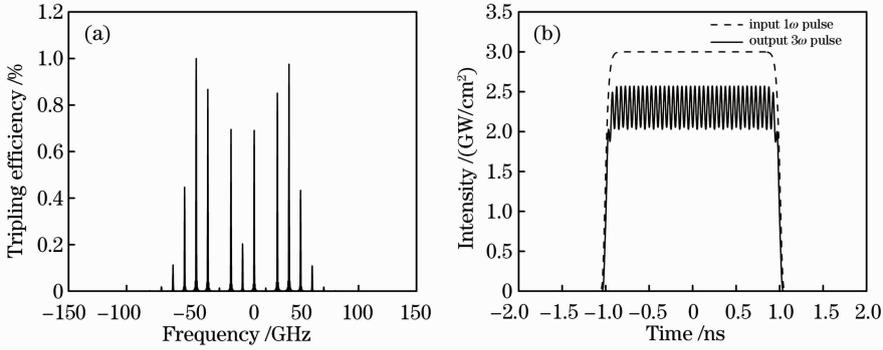


图 1 三倍频过程中的幅度调制效应。(a)基频光频谱;(b)输入基频光及输出三倍频光的脉冲形状

Fig. 1 (a) Amplitude modulation effect in the THG process. (a) Frequency modulated spectrum of fundamental laser; (b) input fundamental pulse and output amplitude modulated 3ω pulse

宽带激光三倍频过程中出现的幅度调制效应是由于频率转换过程中相位匹配带宽受限引起的，即部分频率的基频光并没有转换为三倍频光，等同于光的频谱被过滤掉一部分，最终表现为输出三倍频脉冲强度上的调制。这可以和空间域上的小孔衍射类比，光束通过一个小孔失去一部分能量，导致空间平面上光束振幅分布不均匀，最终表现为明暗相间的衍射条纹。很显然三倍频脉冲的幅度调制深度与输入基频光的频谱宽度有关：输入的基频光光谱越宽，就表明有越多的频率无法转换至三倍频光，三倍频脉冲的幅度调制程度也就越严重（如图 2 所示）。对于钽玻璃激光的三倍频基本装置，要产生带宽为 1 THz 的三倍频光，需要输入的基频光带宽约为 333 GHz，其谐波转化效率仅为 35% 左右，而三倍频光脉冲的幅度调制深度则达到了 180%（图 2 中虚线）。

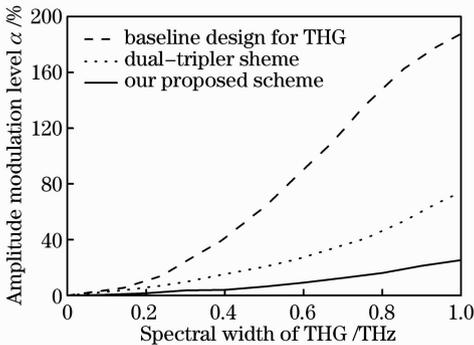


图 2 不同三倍频方案下输出三倍频脉冲的幅度调制深度 α 与其频谱线宽的关系

Fig. 2 Relationship between amplitude modulation level α of 3ω pulses and its spectral width for different THG schemes

3 宽带与窄带脉冲混频的方案抑制幅度调制效应

3.1 钽玻璃激光三倍频过程中的群速度失配

谐波转换过程中的相位匹配带宽与总的波矢失配量成反比，在中心波长满足波矢匹配 ($\Delta k=0$) 的情况下，宽带谐波转换的波矢失配量是由群速度失配 (GVM) 和频谱带宽的乘积 ($v_g \times \Delta\omega$) 决定的。因此在带宽固定的条件下，影响其相位匹配带宽的主要因素是群速度失配，群速度失配量越大，相位匹配带宽越小。钽玻璃激光的三倍频包含倍频及和频过程，表 1 列出了这两个过程中存在的 3 个群速度失配量。

表 1 钽玻璃激光三倍频过程中存在的群速度失配量

Table 1 Magnitudes of GVMs in the THG processes of Nd:glass laser

Frequency converter		$v_g / (\text{fs}/\text{mm})$	
Doubler	$1\omega(o) + 1\omega(o) \rightarrow$	$-5 (v_g^{21})$	
(KDP)	$2\omega(e)$ (type I)		
Tripler	$1\omega(e) + 2\omega(o) \rightarrow$	v_g^{31}	v_g^{32}
(KD* P)	$3\omega(e)$ (type II)	250	50

从表 1 中可以看出，影响宽带钽玻璃激光三倍频过程的相位匹配带宽的主要因素是和频过程中的两个群速度失配量 v_g^{31} 和 v_g^{32} ，其中前者是后者大小的 5 倍（选 3ω 光作为参考脉冲）。可以预见，如果设法让 v_g^{31} 不起作用，那么相位匹配带宽得到大幅度的提高。最近，有研究小组报道了一种新颖、有效的飞秒脉冲和频产生方案^[16]；实验验证了窄带皮秒脉冲与宽带啁啾皮秒脉冲之间可以发生高效率的和频过程；当和频啁啾脉冲能量达到 360 μJ 时，对应的转换效率为 40%；产生的啁啾脉冲可以被压缩到

110 fs。通过实验可认识到,在宽带谐波转换过程中加入一束窄带脉冲,可以减小此过程中群速度失配带来的影响,从而提高整体的转换效率。受此启发,本文提出在宽带钽玻璃激光三倍频的和频过程中加入一束窄带钽玻璃激光^[12],倍频得到的宽带 2ω 脉冲与附加的窄带 1ω 脉冲发生和频可高效地获得宽带 3ω 脉冲。在此过程中,为保证和频过程的光子数匹配,窄带脉冲的能量应为宽带脉冲能量的 $1/2$ 。

3.2 群速度失配对相位匹配带宽的影响

上述的三倍频方案中,假定仅宽带激光脉冲之间(2ω 光和 3ω 光)的群速度失配 v_g^{32} 会影响到相位匹配带宽值,与窄带(1ω 光)脉冲有关的群速度失配 v_g^{31} 不起作用。由于和频过程中由 v_g^{32} 引起的波矢失配量($v_g^{32} \cdot 2\Delta\omega$)约占总波矢失配量($v_g^{32} \cdot 2\Delta\omega + v_g^{31} \cdot \Delta\omega$)的 $2/7$ ($v_g^{31} \approx 5v_g^{32}$,且相位调制脉冲的倍频过程中产生的 2ω 光谱宽带约为 1ω 光谱宽带的2倍^[17]),因此,宽带与窄带脉冲混频的方案中的波矢失配仅为全宽频带激光方案下的 $2/7$ 。按此理论分析,上述三倍频方案中的相位匹配带宽将约为基本装置下的3.5倍。

图3数值模拟了钽玻璃激光三倍频过程中单色基频光波长的调谐对转换效率的影响,从中可得到不同方案下的相位匹配带宽值(半峰全宽值)。其中,对于传统的基本装置(11 mm/250 μ rad的倍频晶体与9 mm和频晶体)^[14],输入的单体波长可调谐激光的光强是3.0 GW/cm²;而对于宽带与窄带脉冲混频的方案,波长可调谐激光(相当于宽带激光)的光强为3.0 GW/cm²,另一束波长固定的激光(相当于窄带激光)的光强为1.5 GW/cm²;宽带、窄带脉冲均为2 ns的40阶超高斯脉冲。从图3中可看出传统的三倍频基本装置中 3ω 光的相位匹配带宽仅为0.2 nm左右(如图3的虚线所示);采用宽带

与窄带脉冲混频的三倍频方案, 3ω 光的相位匹配带宽增加到0.7 nm(图3中的实线),是传统基本装置的近3.5倍。数值模拟结果很好地证实了前文的理论分析,与窄带脉冲有关的群速度失配 M_{gv}^{31} 确实不会影响宽带脉冲的谐波转换过程。图3中还给出了目前使用广泛的双和频晶体级联的三倍频方案^[14,18](点线所示,6 mm/685 μ rad、8.5 mm/—645 μ rad KD*P和频晶体一前一后放置)的相位匹配带宽值,约为0.44 nm。

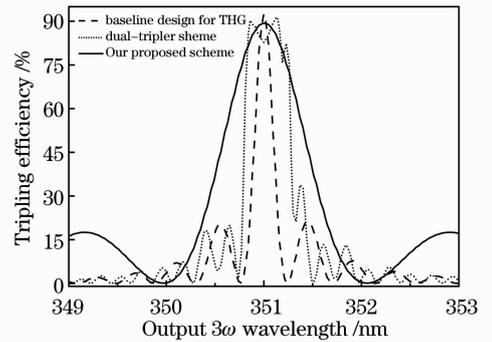


图3 不同三倍频方案下谐波的转换效率与输出三倍频光波长的调谐曲线

Fig. 3 Tuning curves of relationship between tripling efficiency and output 3ω wavelength for different schemes

3.3 相位匹配带宽与三倍频脉冲的幅度调制深度的关系

对于传统的三倍频基本装置,为获得带宽1 THz的紫外光,其脉冲幅度调制深度达到了180%(图2中的虚线)。采用晶体级联的方案,可以一定程度上增加三倍频的转换带宽,但 3ω 光脉冲的幅度调制效应还是比较严重, α 为70%左右(如图2点线所示)。而宽带与窄带脉冲混频的方案可以极大地提升带宽转换能力,一束带宽为500 GHz的钽玻璃激光经倍频后与另一束窄带钽玻璃激光发生和频可高效产生带宽为1 THz的紫外脉冲(三倍频效率约为

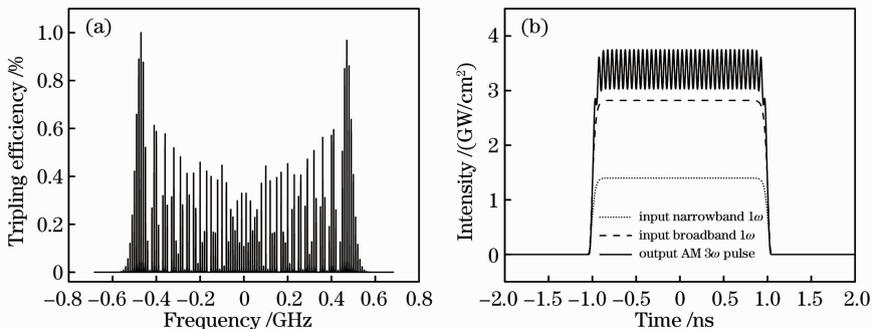


图4 宽带窄带脉冲混频方案下获得带宽为1 THz的 3ω 光的(a)频谱图及(b)脉冲形状

Fig. 4 (a) Spectra and (b) temporal shapes of output 3ω laser with 1 THz bandwidth under the mixing narrowband and broadband pulsed scheme

78%),且获得到的紫外光脉冲的幅度调制被很好地抑制,调制深度仅为20%左右(图2中实线)。此方案下带宽为1 THz的三倍频脉冲的频谱和脉冲形状分布如图4(a)及图4(b)中的实线所示。

此外,宽带与窄带脉冲混频方案与传统的三倍频基本装置相比,除需附加一束窄带脉冲以及倍频晶体偏离角需要调整外(此方案中倍频后剩余的宽带基频光不参与和频过程,倍频效率越高越好,而三倍频基本装置下,倍频的最佳效率为67%),并无其他不同。窄带脉冲与相位调制的宽带脉冲可用同一种子光源,系统能达到很好的同步性。

4 结 论

理论上提出了一种宽带脉冲与窄带脉冲混频的钽玻璃激光三倍频方案,为解决宽带钽玻璃激光谐波转换过程中的幅度调制效应提供一种新的方案。模拟结果表明,窄带脉冲的引入可大大减缓群速度失配对相位匹配带宽的限制,从而能很好地减小三倍频脉冲的幅度调制深度。对于现阶段所需的带宽为1 THz的紫外脉冲,数值模拟得到其脉冲幅度的起伏小于20%,低于LMJ提出的由非线性晶体引起的脉冲强度畸变须小于25%的标准。此外,宽带脉冲与窄带脉冲混频的方案还有望为飞秒脉冲的高效频率变换、超短紫外脉冲产生等提供一种新的技术思路。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Leng Jinyong, Wu Wuming, Chen Shengping *et al.*. Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency Raman fiber amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2334~2339
冷进勇, 吴武明, 陈胜平等. 单频拉曼光纤放大器中受激布里渊散射的抑制[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2334~2339
- 3 Zhou Yuliang, Sui Zhan, Liu Lanqin *et al.*. Research on beam smoothing technology for high-power laser system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(10): 101407
周煜梁, 隋展, 刘兰琴等. 高功率激光装置光束匀滑技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(10): 101407
- 4 S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessler *et al.*. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(8): 3456~3462

- 5 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**: 51~61
- 6 Liao Bo. Theoretical Study of FM-AM Issue on ICF Facility[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. 50~51
廖波. 高功率激光装置中幅度调制效应的研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2006. 50~51
- 7 Wang Jing, Zhang Xiaomin, Li Fuquan *et al.*. Risk evaluation of transverse stimulated Raman scattering in large-aperture, high fluence KDP crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502011
王静, 张小民, 李富全等. 大口径KDP晶体紫外光横向受激拉曼散射风险判据研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0502011
- 8 S. Hocquet, D. Penninckx, E. Bordenave *et al.*. FM-to-AM conversion in high-power lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(18): 3338~3349
- 9 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
- 10 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
- 11 S. P. Regan, J. A. Marozas, R. S. Craxton *et al.*. Performance of 1-THz-bandwidth, two-dimensional smoothing by spectral dispersion and polarization smoothing of high-power, solid-state laser beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(5): 998~1002
- 12 Y. Chen, P. Yuan, L. J. Qian *et al.*. Efficient third harmonic conversion of broad-band high-peak-power Nd: glass laser radiation boosted by a narrowband laser[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(13): 2737~2741
- 13 D. Eimerl. Electro-optic, linear, and nonlinear optical properties of KDP and its isomorphs[J]. *Ferroelectrics*, 1987, **72**(1): 95~139
- 14 D. Eimerl, J. M. Auerbach, C. E. Barker *et al.*. Multicrystal designs for efficient third-harmonic generation[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1208~1210
- 15 Lu Xinghua, Wang Jiangfeng, Jiang Youen *et al.*. Theoretical study of FM-AM effect of broadband pulsed laser in a regenerative amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502012
卢兴华, 王江峰, 姜有恩等. 宽带光再生放大幅度调制效应的研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0502012
- 16 K. Zhao, P. Yuan, H. Y. Zhu *et al.*. Narrowband pulse-enhanced upconversion of chirped broadband pulses[J]. *J. Opt.*, **12**(3): 035206
- 17 D. Eimerl. Quadrature frequency conversion[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(8): 1361~1371
- 18 Ji Lailin, Zhu Jian, Ma Weixin *et al.*. The dual-tripler scheme for increased-bandwidth of third harmonic generation in high power laser system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(S1): 120~123
季来林, 朱俭, 马伟新等. 利用晶体串接实现高效宽带三倍频[J]. *中国激光*, 2006, **33**(S1): 120~123