

宽带光再生放大幅度调制效应的研究

卢兴华 王江峰 姜有恩 范 薇 李学春

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 根据宽带激光在均匀加宽线型增益介质中的放大理论模型,采用短时傅里叶变换算法数值模拟了相位调制的光脉冲通过再生放大器传输放大后的时间波形,分析了再生放大过程中各个参数对幅度调制效应的影响。计算结果表明,调节光脉冲中心波长使之与增益介质中心波长匹配,提高注入种子脉冲的能量都能够有效地降低再生放大器中的幅度调制效应,提高光束质量。

关键词 激光光学;再生放大;宽带激光;幅度调制效应;短时傅里叶变换

中图分类号 TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0502012

Theoretical Study of FM-AM Effect of Broadband Pulsed Laser in a Regenerative Amplifier

Lu Xinghua Wang Jiangfeng Jiang You'en Fan Wei Li Xuechun

(National Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Based on the theory of broadband pulsed laser amplification in the homogeneously broadening medium, a numerical model for the temporal pulse shape propagating through the regenerative amplification is established by means of the short-time Fourier transform. Numerical simulation results show that decreasing the detuning between laser wavelength and the center wavelength of gain medium can decrease the FM-AM effect effectively. Increasing the energy of the seed laser pulse can also decrease the FM-AM effect and thus improve the laser beam quality.

Key words laser optics; regenerative amplifier; broadband pulsed laser; FM-AM effect; short-time Fourier transform

OCIS codes 140.3430; 140.3280; 140.3580

1 引 言

在目前的惯性约束聚变(ICF)激光驱动器中,通常引入相位调制模块对单纵模激光进行频谱展宽,一方面宽带光可以有效地抑制受激布里渊散射(SBS)^[1],保护大口径石英光学元件^[2],提高系统的安全运行通量,保证系统的安全性,另一方面宽带光可以降低激光光束的近场空间相干性,提高光束空间均匀性,结合谱色散匀滑(SSD)^[3]技术,可以明显改善打靶脉冲对靶丸的辐照均匀性,提高打靶质量和成功率。

宽带光在系统的传输放大过程中不可避免地会带来幅度调制效应(FM-AM效应),也即光脉冲的频率调制(FM)引起光脉冲时域波形的幅度调制(AM)^[4]。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。Rothenberg等^[5]报道了NIF装置中产生幅度调制效应的主要因素:传输中的色散,放大过程中的增益窄化效应,并给出了简单的解析模型用于估算幅度调制效应的大小。Hocquet等^[6]研究了三倍频系统中频率转换过程及

收稿日期: 2011-01-07; 收到修改稿日期: 2011-02-15

作者简介: 卢兴华(1985—),男,博士研究生,主要从事高功率激光前端综合建模与相关实验方面的研究。

E-mail: luxingh@yahoo.cn

导师简介: 李学春(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光技术与光纤应用等方面的研究。

E-mail: lixuechun@siom.ac.cn

光栅色散对幅度调制效应的影响。Penninckx 等^[7]分析了保偏光纤中产生幅度调制效应的各种因素,并给出了相应的解决方法。

激光二极管(LD)抽运的再生放大器以其能量提取效率高、可靠稳定、结构紧凑、热耗散低的特点,越来越多地应用于纳秒激光脉冲放大^[8]和超短激光脉冲放大^[9]领域。用于 ICF 中的再生放大器,将振荡器输出的整形脉冲的能量从数百皮焦放大至毫焦量级,为后续放大提供巨大的增益,而该过程中增益窄化是产生幅度调制效应的主要因素。本文从宽带激光放大的理论模型出发,采用短时傅里叶变换方法,模拟了再生放大器中宽带激光放大后的时间波形,分析了再生放大器各个参数对幅度调制效应的影响。

2 理论模型

经过单一正弦相位调制的光场可以表示为^[6]

$$E(t) = \exp[i m \sin(2\pi f_m t)], \quad (1)$$

式中 m 为相位调制系数,反映相位调制器的调制深度, f_m 为相位调制器的调制频率。对(1)式两边进行傅里叶变换得到经过相位调制后的光波的光谱

$$\tilde{E}(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(m) \delta(f - n f_m), \quad (2)$$

式中 $J_n(m)$ 为 n 阶贝塞尔函数。

经过相位调制后,光波的光谱是由中心频率与在它两边对称分布的无穷多对边频组成,各边频之间的频率间隔为调制频率,各边频幅度大小由贝塞尔系数决定且频谱间的初始相位固定。理论上调制后的光谱具有无穷大的带宽,实际上,98%的能量局限在 $\Delta f = 2(m+1)f_m$ 的频率范围, Δf 定义为实际的调制带宽全宽度。

神光 II 装置中采用 3 GHz 的调制频率产生 30 GHz 的调制带宽抑制激光驱动器高通量运行时的受激布里渊散射。调制后的光谱如图 1 所示。

单纯的相位调制并不能改变光强的时间波形,但是如果宽带光的各个频谱在系统中非均匀传输,各个频谱的强度在系统中的增益不一致或产生不一致的相位延迟,就会破坏各个频谱强度原有的贝塞尔函数关系或原有的相位关系,将频域逆傅里叶变换到时间域时,光强的时间波形就会出现调制,即产生幅度调制效应。假定宽带光的各个频谱在系统中非均匀传输的传递函数为 $H(f)$,则传输后的光谱可以表示为 $\tilde{E}_{\text{out}}(f) = H(f)\tilde{E}(f)$,即

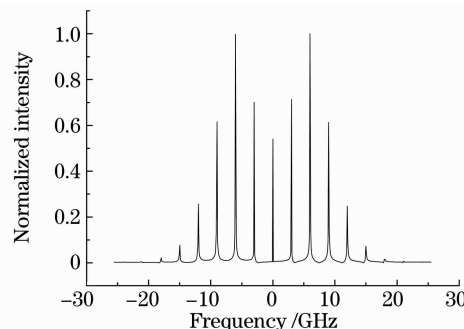


图 1 3 GHz 调制后的光谱

Fig. 1 Optical spectrum for 3 GHz sinusoidal phase modulation

$$\tilde{E}_{\text{out}}(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H(n f_m) J_n(m) \delta(f - n f_m). \quad (3)$$

宽带光传输后幅度调制的频谱定义为光强时间波形的傅里叶变换,即 $\tilde{I}_{\text{out}}(f) = \mathcal{F}[|E_{\text{out}}(t)|^2]$,经过整理得到

$$\tilde{I}_{\text{out}}(f) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H^*(-n f_m) H[(k-n) f_m] \times J_{-n}(m) J_{k-n}(m) \right\} \delta(f - k f_m), \quad (4)$$

从(4)式可以看到,幅度调制的频谱出现在 f_m 的整数倍处。 $k f_m$ 频谱的出现是由于两间隔 $k f_m$ 的光谱成分拍频效应的叠加结果。当传递函数满足条件

$$H^*(-f) = \pm H(f), \quad (5)$$

(4)式中 k 为奇数的项为 0,即幅度调制的频谱中只存在相位调制频率偶数倍的成分。

若采用调制深度 α 来表征光束幅度调制效应的大小,定义为

$$\alpha = 2 \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (6)$$

式中 I_{max} , I_{min} 为调制后光强的局部最大值和最小值。 α 范围在 0%~200%,理想的无调制情况对应 $\alpha = 0$,调制深度越小表示光束质量越好。

考虑宽带激光脉冲在均匀加宽线型增益介质中放大的理论模型,相位调制后的光脉冲在再生放大器中传播时的演化特征可描述为^[10]

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} = i \mathbf{P}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} = i(\omega_0 - \omega_a) \mathbf{P} - \frac{\Delta \omega_a}{2} \mathbf{P} - i \frac{\Delta \omega_a}{4} g \mathbf{E}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial g}{\partial t} = -g \frac{|E|^2}{F_{\text{sat}}}, \quad (9)$$

式中 $\mathbf{P} = \frac{\omega_0}{2nc} \mathbf{P}_{\text{amp}}$, \mathbf{P}_{amp} 为共振极化矢量, $\Delta \omega_a$ 为增益介质的发射谱宽, ω_a 为增益介质发射谱的中心频

率, ω_0 为激光频率, g 为小信号增益系数, F_{sat} 为增益介质的饱和通量。

在输入能量较低的小信号放大情况下, 可以忽略增益饱和效应, 假定 g 不依赖于时间变量, 对(8)式两边做傅里叶变换

$$\tilde{P}(\omega) = i \frac{g}{2} \frac{1}{1 + 2(\omega + \omega_0 - \omega_a)/\Delta\omega_a} \tilde{E}(\omega), \quad (10)$$

对(7)式两边做傅里叶变换, 并把(10)式代入, 得

$$\frac{\partial \tilde{E}(\omega)}{\partial z} = \frac{g}{2} \frac{1}{1 + i2(\omega + \omega_0 - \omega_a)/\Delta\omega_a} \tilde{E}(\omega), \quad (11)$$

(11)式表明在均匀加宽增益介质中, 光场的各个频谱分量以洛伦兹线型的指数形式增长。

若考虑增益饱和与增益窄化效应, 求解(7)~(9)式的非线性方程组时, 可以借助介质切片和脉冲分割的思想, 当切片足够薄时, 可近似认为增益系数 g 不变, 此算法的另一种变形算法即短时傅里叶变换算法^[11]。该算法要求给定一个时间宽度很短的窗函数 $r(t)$, 让窗函数滑动, 则光场 $E(t)$ 的短时傅里叶变换($\mathcal{F}_{\text{STFT}}$)定义为

$$\mathcal{F}_{\text{STFT}}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} E(\tau) r^*(\tau - t) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau, \quad (12)$$

式中 $r^*(t)$ 为窗函数 $r(t)$ 的复共轭。

窗函数 $r(t)$ 的时移和频移使得短时傅里叶变换具有了局域特征, 它既是时间的函数, 也是频率的函数。对于给定的时刻 t , $\mathcal{F}_{\text{STFT}}(t, f)$ 可以看作是该时刻的局部频谱, 而该时刻的光谱通过增益介质时, 由于时间宽度很窄, 增益饱和不明显, 可以利用(9)、(11)式分别得到放大后的光谱及介质的小信号增益系数, 从而作为下一个时刻光谱放大的初始条件。

类似于傅里叶变换, 光场 $E(t)$ 也应该可以由时频分布 $\mathcal{F}_{\text{STFT}}(t, f)$ 完全重构出来, 假定重构窗函数为 $h(t)$, 则逆短时傅里叶变换为

$$E(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}_{\text{STFT}}(t, f) h(\tau - t) \exp(j2\pi f\tau) dt df. \quad (13)$$

信号能量守恒要求窗函数满足 $\int_{-\infty}^{\infty} r^*(t) h(t) dt = 1$, 考虑到短时傅里叶变换频谱泄露的影响, 这里窗函数选取 Hamming 窗。

3 计算结果及讨论

根据上述理论, 用数值方法对宽带光脉冲在再生放大器中的传输放大进行了计算, 数值模拟过程中增益介质选用 N31 型钕玻璃, 主要的物理参数: 荧光谱线半峰全宽 20 nm; 受激发射截面 $3.83 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。输入的种子激光是经过 10 GHz 相位调制器展宽可进行二维谱色散平滑的宽带光, 种子激光脉冲为脉宽 3 ns 的方波脉冲。

图 2 给出了钕玻璃再生放大器输出能量与腔内放大程数的关系。在小信号输入状态下, 激光脉冲能量随着放大程数成指数增加的关系。但随着激光脉冲能量增大, 由于增益饱和效应, 放大器单程增益下降。当放大程数在 40 程附近时, 激光脉冲能量达到最大, 这时放大器单程增益等于损耗。之后的单程增益小于损耗, 输出能量随着循环次数的增大而不断减小。

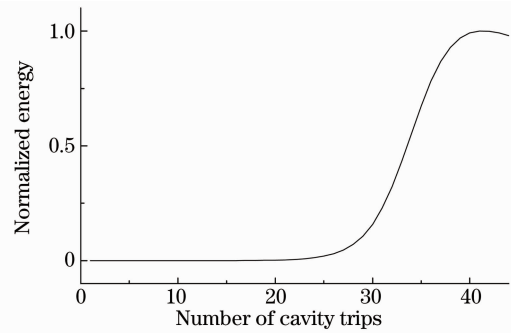


图 2 再生放大器输出能量与腔内放大程数的关系

Fig. 2 Output energy of regenerative amplifier versus the number of cavity trips

3.1 波长偏差对幅度调制效应的影响

图 3 是输入的种子激光脉冲中心波长与增益介质中心波长匹配时, 经过再生放大得到的光强时间波形, 虚线为单色光的放大时间波形, 实线为相位调制后宽带光的放大时间波形。图 4 是输入的种子激光脉冲中心波长与增益介质中心波长偏离 0.5 nm 时, 经过再生放大得到的光强时间波形, 虚线为单色光的放大时间波形, 实线为相位调制后宽带光的放大时间波形。

通过比较图 3, 4 可以发现, 在种子激光脉冲中心波长与增益介质中心波长匹配的情况下, 光强时间波形上 2 倍于调制频率 (20 GHz) 的谐波最为显著。在输入的种子激光脉冲中心波长与增益介质中心波长发生偏离的情况下, 光强的时间波形主要产生基频 (10 GHz) 调制, 且调制深度比波长匹配的情况大得多。激光脉冲中心波长与增益介质中心波长

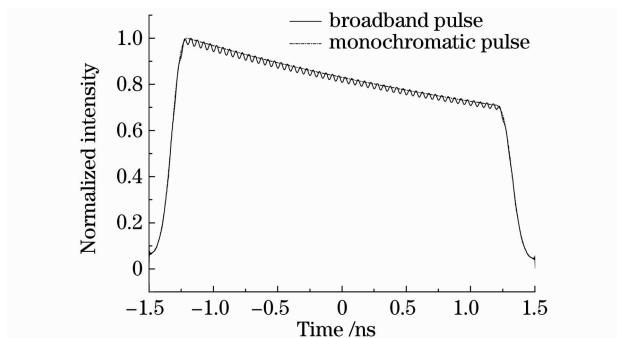


图 3 激光脉冲中心波长与增益介质中心波长匹配时, 输出光强的时间波形

Fig. 3 Temporal shape of the output pulse when exist nodetuning between laser wavelength and the line center wavelength of gain medium

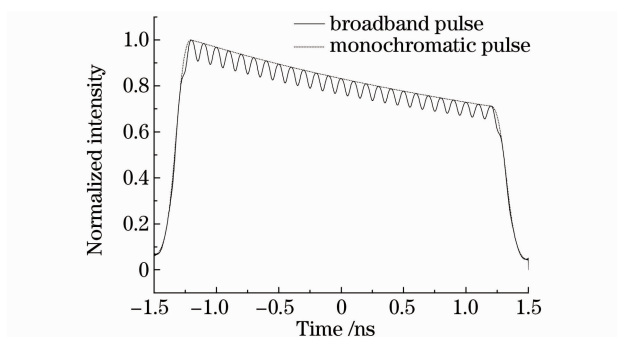


图 4 激光脉冲中心波长与增益介质中心波长偏离 0.5 nm 时, 输出光强的时间波形

Fig. 4 Temporal shape of the output pulse when exist 0.5 nm detuning between laser wavelength and the line center wavelength of gain medium

匹配时, 正好满足(5)式的条件, 数值模拟的结果与(4)式结论是一致的。

图 5 给出了调制深度随波长偏差量的变化关系。可以看到幅度调制深度随波长偏差量线性增加, 且激光波长偏离增益介质中心波长越大, 幅度调制效应越明显, 因此在满足系统使用的光谱带宽固定的情况下, 调节光束中心波长使之与增益介质中心波长匹配尤为重要。

光束中心波长与增益介质中心波长偏差较小时, 可以通过 Lyot 型双折射滤光片、标准具等滤波器对波长进行微调^[12]。如图 6 所示, 激光脉冲中心波长与增益介质中心波长偏离 0.25 nm 时, 加入滤光片后光束中心波长与增益介质中心波长基本匹配, 并且增益谱线变得平坦, 光谱传输的不均匀性能够得到很大的改善。加入滤光片后输出光强的时间波形如图 7 虚线所示, 此时幅度调制效应已经不明显, 光束质量得到了很大改善。

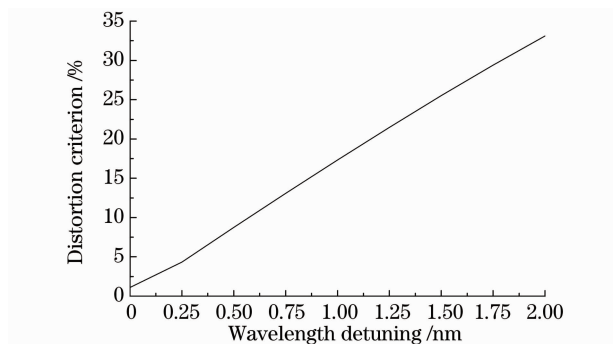


图 5 调制深度随波长偏差量的变化

Fig. 5 Distortion criterion versus detuning between laser wavelength and line center wavelength of gain medium

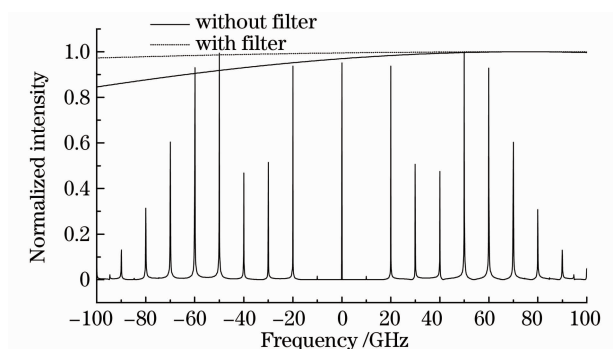


图 6 加入滤光片与未加滤光片时的增益曲线

Fig. 6 Gain curve with or without filter

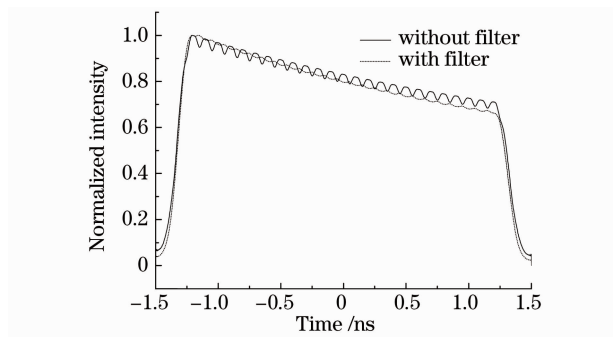


图 7 加入滤光片与未加滤光片时输出的时间波形

Fig. 7 Temporal shape of output pulse with or without filter

3.2 相位调制带宽对幅度调制效应的影响

相位调制模块中可以通过调节相位调制系数来控制光谱展宽的宽度。图 8 给出了幅度调制深度随光谱调制带宽的变化关系。光谱调制带宽较窄时, 相对于钕玻璃 20 nm 的增益带宽, 增益窄化效应可以忽略, 基本上不产生幅度调制效应, 之后, 幅度调制深度随光谱调制带宽的增加而增大。

3.3 放大程数对幅度调制效应的影响

图 9 给出了调制深度随放大程数的变化关系。调制深度一开始随放大程数的增加而增大, 直到再

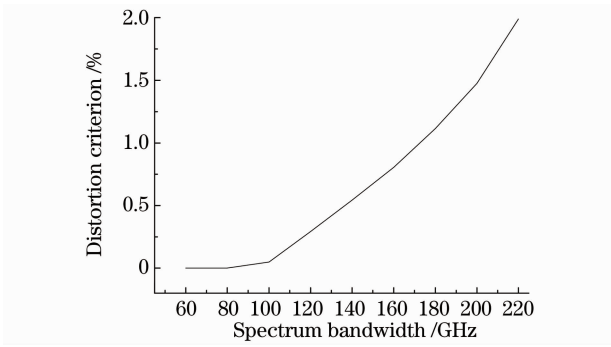


图 8 调制深度随调制带宽的变化

Fig. 8 Distortion criterion versus spectrum bandwidth

生放大器实现峰值能量输出(40程附近)达到稳定。因此要降低再生放大器中的幅度调制效应,应该通过提高注入激光种子脉冲的能量,尽量减小再生放大器峰值能量输出时的放大程数。

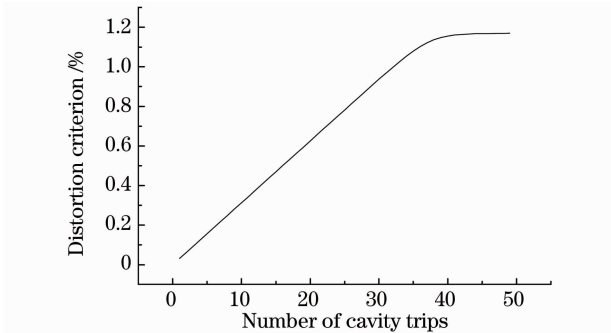


图 9 调制深度随放大程数的变化

Fig. 9 Distortion criterion versus number of cavity trips

4 结 论

数值模拟了宽带光经过再生放大器传输放大由于增益窄化产生的幅度调制效应,对宽带光再生放大器的设计有一定的指导意义。结果表明激光脉冲中心波长与增益介质中心波长匹配时,光强的时间波形上 2 倍于调制频率的谐波最为显著。激光脉冲中心波长与增益介质中心波长产生失谐时,光强的时间波形产生基频调制,且幅度调制深度随失谐量的增加而增大。因此在再生放大器中,调节光脉冲中心波长使之与增益介质中心波长的匹配变得尤为重要。双折射滤光片、标准具等滤波器可以有效地补偿再生放大器中的增益窄化效应,从根本上

降低甚至消除幅度调制效应。此外通过提高注入激光种子脉冲的能量,尽量减小再生放大器峰值能量输出时的放大程数也可以有效地减轻幅度调制效应的大小。

参 考 文 献

- 1 D. T. Kyrakis, T. L. Wiland. Determination of SBS induced damage limits in large fused silica optics for intense, time varying laser pulse[C]. *SPIE*, 1990, **1441**: 469~497
- 2 Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Cheng Xiang'ai *et al.*. Theoretical study on damage induced by stimulated Brillouin scattering process[J]. *High Power Laser and Particl Beams*, 2003, **15**(9): 850~854
郭少峰, 陆启生, 程湘爱 等. 后向受激布里渊散射诱导的光学材料破坏机理研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(9): 850~854
- 3 Li Jinghui, Zhang Hujie, Zhou Shenlei *et al.*. Effect of smoothing by spectral dispersion considering the hole used in spacial filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 827~832
李菁辉, 张琥杰, 周申蕾 等. 空间滤波器小孔对谱色散匀滑使用效果的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 827~832
- 4 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
- 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 S. Hocquet, D. Penninckx, E. Bordenave *et al.*. FM-to-AM conversion in high-power lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(18): 3338~3349
- 7 D. Penninckx, N. Beck, J. F. Gleyze *et al.*. Signal propagation over polarization-maintaining fibers: problem and solutions[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(11): 4197~4207
- 8 A. Babushkin, W. Bittle, S. A. Letzring *et al.*. Regenerative amplifier for the OMEGA laser system[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 124~130
- 9 Ma Yunfeng, Fan Zhongwei, Niu Gang *et al.*. 2.5 W picosecond pulse regenerative amplifier with 100 kHz repetition rate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2825~2828
麻云凤, 樊仲维, 牛岗 等. 重复频率 100 kHz, 平均功率 2.5 W 的皮秒脉冲再生放大器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2825~2828
- 10 O. Morice. Miro: complete modeling and software for pulse amplification and propagation in high-power laser systems[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(6): 1530~1541
- 11 Zhang Xianda. *Moden Signal Processing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 362~367
张贤达. *现代信号处理*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 362~367
- 12 C. P. J. Barty, G. Korn, F. Raksi *et al.*. Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3): 219~221