

# 复杂激光系统中平板光学元件的 调频 - 调幅效应的研究\*

王雨雷<sup>1)2)†</sup> 张昀<sup>2)</sup> 付万琴<sup>2)</sup> 吕志伟<sup>2)</sup> 周宇<sup>2)</sup> 邓青华<sup>3)</sup> 丁磊<sup>3)</sup>

1) (哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150080)

3) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2011年4月18日收到; 2011年9月23日收到修改稿)

为了抑制大口径光学元件中的受激 Brillouin 散射效应, 并满足打靶过程中束匀滑的要求, 目前高能激光驱动器大都采用了正弦相位调制脉冲. 然而, 这类脉冲在复杂激光系统中传输时, 会出现明显的调频 - 调幅 (FM-to-AM) 效应. 研究这种效应的来源, 对提升激光系统的整体输出性能至关重要. 对复杂激光系统中一直被人们所忽视的平板光学元件带来的 FM-to-AM 效应进行了理论研究和数值模拟. 数值模拟结果表明, 通过平板光学元件的次数越多调制深度越大, 呈线性递增趋势, 当通过次数为 10 次时, 调制深度高达 22.2%; 并且平板光学元件对各谱线的过滤也各不相同, 当前端选用的中心波长为 1054 nm 时, 平板光学对各谱线的过滤作用非常小. 提出通过改变中心波长来减小 FM-to-AM 效应, 这对于复杂激光系统的设计具有重要的指导意义.

**关键词:** 调频 - 调幅效应, 相位调制, 弱标准具效应

**PACS:** 42.60.Jf, 42.25.Bs

## 1 引言

在惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, 简记为 ICF)<sup>[1,2]</sup> 的高功率激光驱动器中, 为了抑制高能激光在大口径光学元件中传播时因受激 Brillouin 散射 (stimulated Brillouin scattering, 简记为 SBS) 带来的破坏<sup>[3]</sup>, 以及达到光谱色散匀滑 (smoothing by spectral dispersion, 简记为 SSD) 的目的<sup>[4,5]</sup>, 需要对驱动器前端产生的单纵模种子脉冲进行相位调制, 以获得宽带的频谱<sup>[6]</sup>. 理想情况下, 经过相位调制的脉冲在传播过程中不会出现强度的变化, 但由于激光系统中光学元件对频谱不均匀的过滤作用, 使得调制后的脉冲出现振幅或相位的不均匀传输, 从而导致强度调制, 也即调频 - 调幅 (frequency mod-

ulation to amplitude modulation, FM-to-AM) 效应<sup>[7]</sup>. 这使得原来在时域上平滑的脉冲波形出现顶部调制, 是脉冲波形发生畸变的主要因素, 甚至会影响激光系统的稳定运行以及打靶的光束能量的均衡性. 因此研究如何控制 FM-to-AM 效应是这些复杂激光系统最为关注的问题.

目前, 各国对于复杂激光系统中 FM-to-AM 效应的研究刚刚起步. Rothenberg 等<sup>[8]</sup> 在对 NIF 中的 FM-to-AM 效应研究表明, 色散以及增益窄化是产生振幅调制的主要原因. 2004 年, Peter 等<sup>[9]</sup> 报道了 NIF 前端采取的抑制 FM-to-AM 效应的方法, 并取得了相当好的效果. 2008 年, Hocquet 等<sup>[10]</sup> 在 LMJ 装置上对 FM-to-AM 效应进行了系统研究, 其中研究的重点是系统中的三倍频环节. 国内针

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61008005)、中国博士后科学基金和特别资助基金 (批准号: 20090450966, 201003428)、黑龙江省博士后基金 (批准号: LBH-Z09128)、中央高校基本科研业务费专项基金 (批准号: HIT. KLOF. 2010037) 和哈尔滨工业大学科研创新基金 (批准号: HIT. NSRIF. 2009010) 资助的课题.

† E-mail: wyl@hit.edu.cn

对 FM-to-AM 效应的研究主要集中于对群速度色散 (GVD)<sup>[11]</sup>、增益窄化<sup>[12]</sup> 和边带失衡<sup>[13]</sup> 等影响的研究, 对复杂激光系统中因平板光学元件 (波片、偏振片等) 的弱标准具效应带来的 FM-to-AM 效应研究甚少. 而激光脉冲在复杂激光系统传输放大过程中要通过大量的平板光学元件, 因而非常有必要研究它带来的影响. 尽管最近 Xu 等<sup>[14]</sup> 报道了平板光学元件的弱标准具效应带来的影响很严重, 但文中没有提出减小的方法.

针对如何减小 FM-to-AM 效应, Hocquet 等<sup>[15]</sup> 提出了采用非正弦相位调制的方法, 耿远超等<sup>[16]</sup> 提出通过波形测量来引导光谱整形的补偿方法, Cao 等<sup>[17]</sup> 针对神光 II 系统的三倍频过程, 数值模拟了补偿 FM-to-AM 效应的光栅色散法, Séastien 等<sup>[18]</sup> 通过实验证明了可以通过线性预补偿方法来补偿因频率转换过程带来的非线性传递函数. 这些方法虽然都能一定程度地减小 FM-to-AM 效应, 但实现起来较为困难. 本文首先从理论角度研究了相位调制导致平板光学元件中的 FM-to-AM 效应, 然后根据国际上各研究机构对 ICF 激光驱动器前端波长的选择, 选用不同波长的单纵模种子脉冲, 对平板光学元件中弱标准具效应产生的 FM-to-AM 效应做了数值模拟, 并分析了产生这种现象的原因. 文中针对平板光学元件弱标准具效应的 FM-to-AM 效应提出的减小方法, 对复杂激光系统设计具有指导意义, 并且这种方法相对于以前的方法非常简单.

## 2 相位调制与 FM-to-AM 效应

假设驱动器前端输出的单纵模激光脉冲的电场强度为

$$e_c(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c), \quad (1)$$

式中,  $A_c$  为振幅,  $\omega_c$  为角频率,  $\varphi_c$  为相位角. 相位调制就是上式中的相位角  $\varphi_c$  随调制信号周期变化而变化, 设调制信号为  $m \cos \omega_m t$ , 其中  $m$  为调制系数, 经调制后的电场为

$$e(t) = A_c \cos(\omega_c t + m \cos \omega_m t + \varphi_c), \quad (2)$$

将上式按 Bessel 函数展开, 可得

$$e(t) = A_c J_0(m) \cos(\omega_c t + \varphi_c) + A_c \sum_{n=1}^{\infty} J_n(m) [\cos(\omega_c + n\omega_m)t$$

$$+ \varphi_c + (-1)^n \cos(\omega_c - n\omega_m)t + \varphi_c]. \quad (3)$$

根据激光驱动器的实验需求, 我们选用调制频率为 2 GHz, 调制深度为 22 的相位调制器对中心波长为 1053 nm 的单纵模脉冲进行相位调制, 调制后的频谱如图 1 所示.

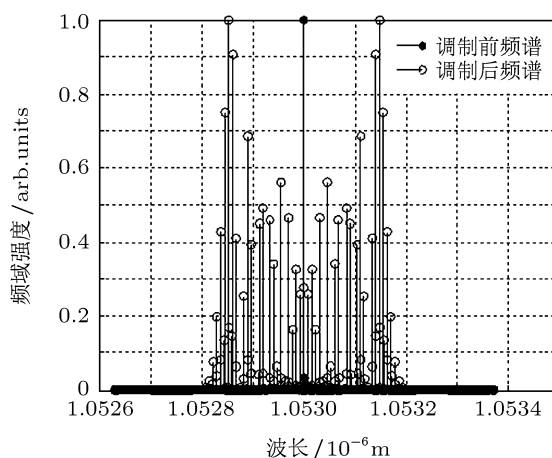


图 1 相位调制前后的频谱 (中心波长 1053 nm)

由图 1 可知, 当单纵模的脉冲经正弦波调制后, 其频谱将由原中心频率与在它两边呈对称分布的边频所组成, 频谱中心部位的强度很小, 对称边频的强度关于中心频率总体上呈先增大后减小的趋势, 并在相对于中心约  $\pm 0.15$  nm 时达最大值. 经相位调制后的单纵模的光在频域上展开为宽带频谱, 这样的脉冲在复杂光学系统中传播时, 由于光学元件的对不同谱线的不同滤波作用, 使得各个频谱的强度经过系统后减小不一致, 这就破坏了原来的相位关系, 当再将频域信号变换到时域时, 光强在时间上的波形将出现顶部调制, 也就产生了 FM-to-AM 效应. 这种效应达到一定程度会损坏光学元件, 并影响整个激光系统的最终时间输出波形.

## 3 弱标准具效应带来的 FM-to-AM 效应

激光脉冲在经过波片、偏振片等平板光学元件时, 由于这类元件两表面平行且存在一定的反射率, 使得光波不断在平板内反射和透射, 从而在平板两侧发生多光束干涉, 形成弱标准具效应. 根据 Airy 公式可知透射光强与入射光强的关系<sup>[19]</sup>为

$$I_t = \frac{1}{1 + F \sin^2(\varphi/2)} I_i, \quad (4)$$

其中,  $\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}nd$ ,  $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$ ,  $R$  为反射率,  $d$  为厚度,  $\lambda$  为入射激光波长. (4) 式中的  $\frac{1}{1 + F \sin^2(\varphi/2)}$  为光谱传递函数, 它随波长变化而在  $\left[\frac{1}{1+F}, 1\right]$  之间变化. 假设经相位调制后的脉冲  $n$  次通过平板光学元件, 对于频率为  $f$  的激光, 它的光谱传递函数分别为  $H_1(f), H_2(f), \dots, H_n(f)$ , 则总的光谱传递函数为

$$\begin{aligned} H(f) &= \prod_i H_i(f) \\ &= I_1(f) \times I_2(f) \\ &\quad \times \dots \times I_n(f), \end{aligned} \quad (5)$$

通过  $n$  个平板光学元件后的光强为  $I_{\text{out}}(f) = I_{\text{in}}(f) \times H(f)$ , 其物理过程如图 2 所示.

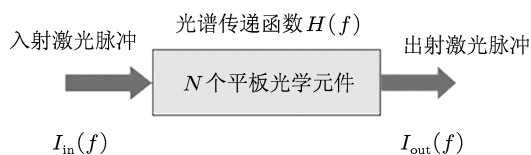


图 2 经过平板光学元件的光谱传递示意图

由 (5) 式可知, 透射光强与波长密切相关, 入射波长不同的光的透射强度不同, 也即平板光学元件对不同频率的光的过滤作用不尽相同. 因此调制后的脉冲经过平板光学元件后, 各展宽光谱强度的变化也各不相同, 也即产生了 FM-to-AM 效应.

#### 4 弱标准具效应带来的 FM-to-AM 效应的数值模拟

为了讨论 FM-to-AM 效应对复杂激光系统输出性能的影响, 本文就激光脉冲通过平板光学元件进行了数值模拟. 具体参数为: 板厚为 1 mm, 表面反射率为 0.005, 折射率为 1.45, 相位调制的频率为 9.2 GHz, 前端中心波长 1053 nm.

##### 4.1 时域波形调制研究

激光脉冲在复杂激光系统中传播、放大过程中, 要经过大量的平板光学元件. 图 3(a) 为经过平板光学元件后时域波形的数值模拟结果. 曲线 1 为经过平板光学元件前的时域波形, 曲线 2 和 3 分别

为经过五次和十次平板光学元件后的时域波形.

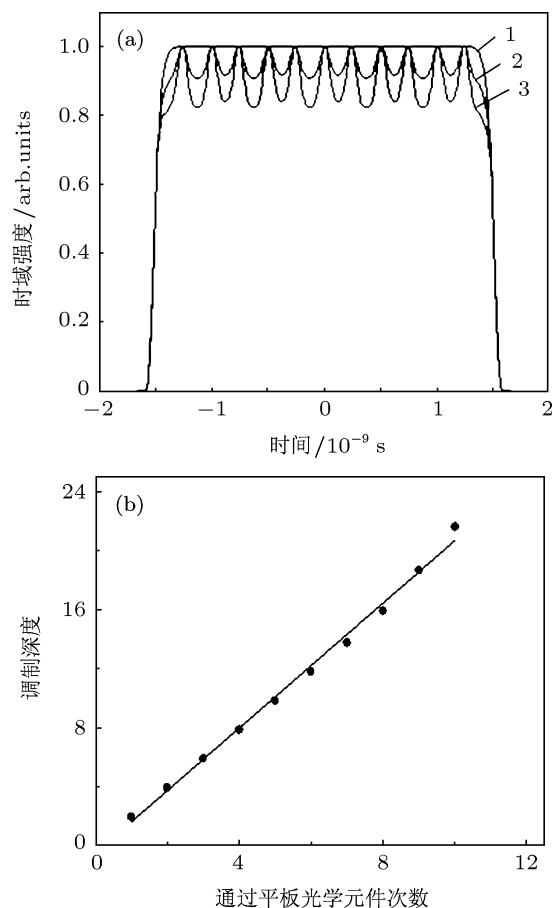


图 3 (a) 通过平板光学元件时域波形; (b) 通过平板光学元件次数和调制深度的关系

由不同中心波长的时域波形可以得出: 时域波形的调制深度与经过平板光学元件的次数成正比, 经过的平板光学元件越多, 调制深度越大, 呈现出近线性增加. 模拟结果显示, 十次通过平板光学元件后, 调制深度高达 22.2%, 这与通过的串联平板光学元件带来的叠加效应有关. 因而在复杂光学系统的设计中, 在不影响系统稳定运行的情况下, 尽量减少平板光学元件的数目.

##### 4.2 不同中心波长的影响

根据各个研究机构对 ICF 激光驱动器前端波长的选择, 这里选用的激光中心波长分别为 1047 nm (Mercury), 1053 nm (NIF 和 LMJ 等), 1054 nm (Vulcan 和 PHELIX 等), 1058 nm (Texas Petawatt), 1060 nm (NOVA). 针对这些波长而进行的数值模拟结果分别如图 4—图 8 所示. 各图中 (a) 为时域波形图, (b) 为频谱图, 曲线 1 为经过平

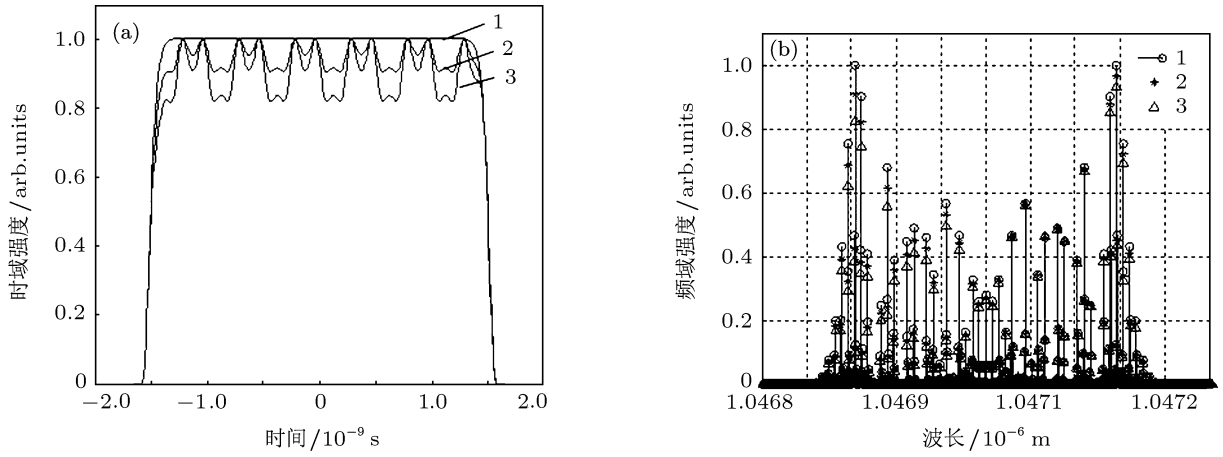


图4 中心波长为 1047 nm 的 (a) 时域波形; (b) 频谱图

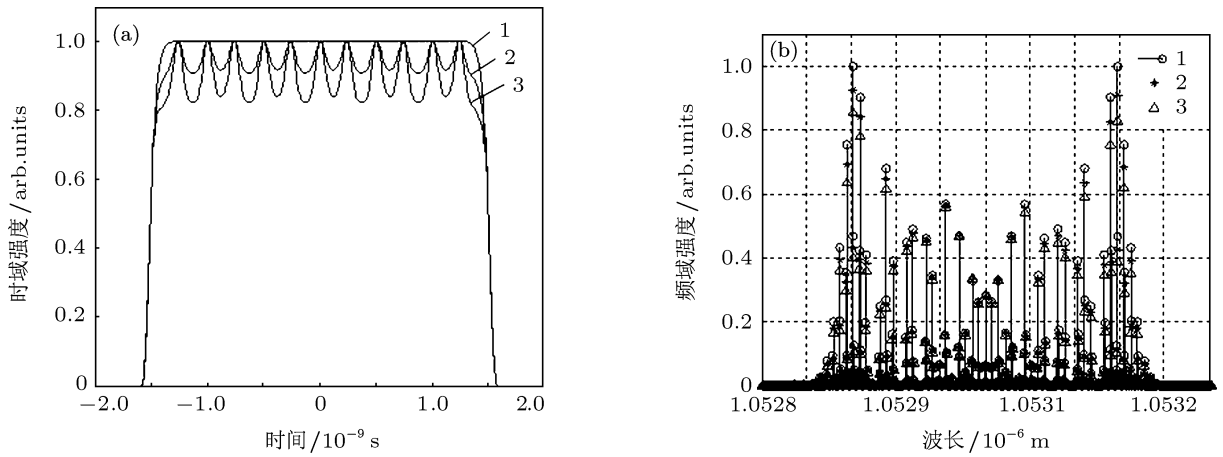


图5 中心波长为 1053 nm 的 (a) 时域波形; (b) 频谱图

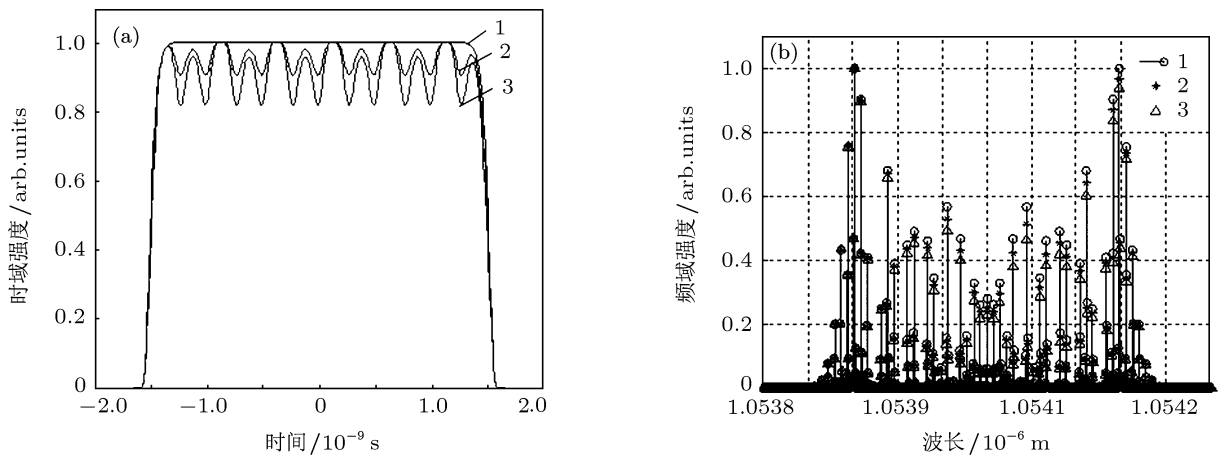


图6 中心波长为 1054 nm 的 (a) 时域波形; (b) 频谱图

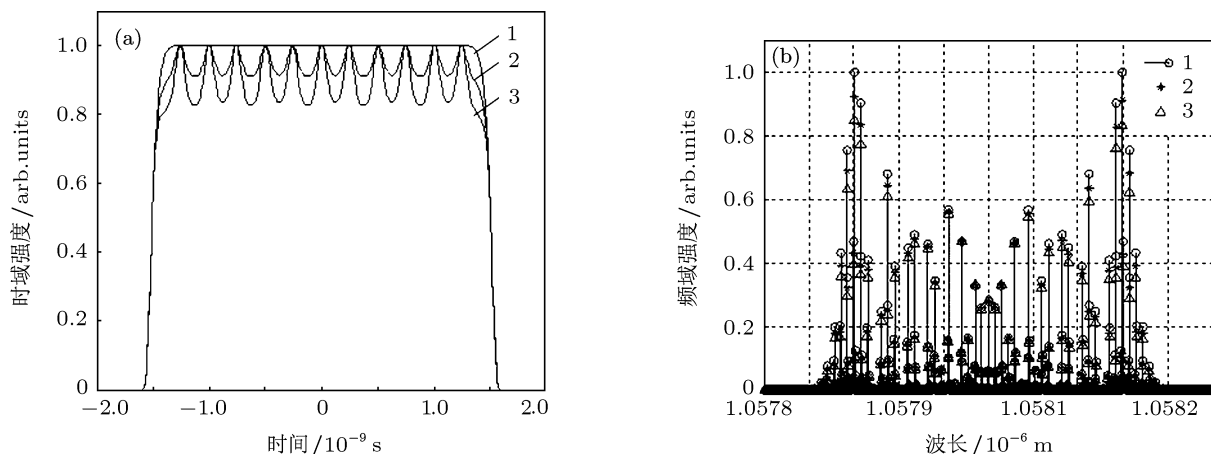


图7 中心波长为 1058 nm 的 (a) 时域波形; (b) 频谱图

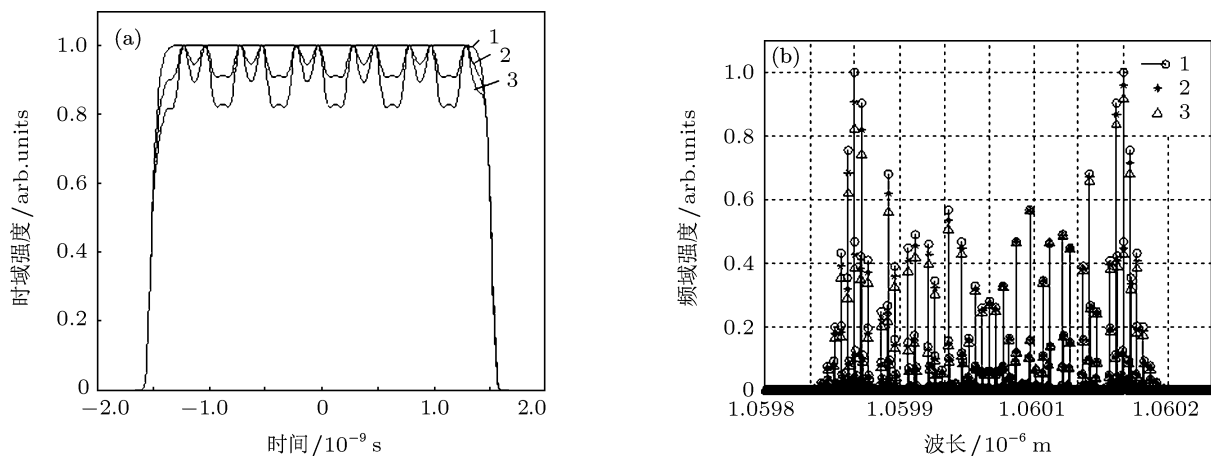


图8 中心波长为 1060 nm 的 (a) 时域波形; (b) 频谱图

板光学元件前的时域波形和频谱图, 曲线 2 和 3 分别为经过五次和十次平板光学元件后的时域波形.

由不同中心波长的时域波形可以得出: 改变中心波长相应的时域波形也会发生变化, 但它们的调制深度没有发生改变. 图 4(a) 和图 8(a), 图 5(a) 和图 7(a) 的时域波形基本一样, 这是因为 (4) 式中含有随波长周期变化的项. 比较各频谱图可以发现: 平板光学元件对某频率的过滤作用与经过它的次数成正比, 但它对不同频率的过滤作用各不相同, 即对展宽后的整个频谱的过滤是有选择性的. 对中心波长为 1053 nm 和 1058 nm 的激光脉冲, 经过平板光学元件前后的频谱均关于中心波长呈对称分布, 并且对相对于中心波长距离较大的谱线过滤非

常大, 而对相对于中心波长距离较小的谱线过滤非常小. 对于中心波长为 1047 nm 和 1060 nm 的激光脉冲, 它们经过平板光学元件后高频部分过滤大, 低频部分过滤小, 频谱曲线不再关于中心波长对称. 而对于中心波长为 1054 nm 的脉冲, 平板光学元件对频谱的高频成分过滤非常小, 对低频成分过滤也比较小, 因此在复杂光学系统中选用此波长能明显减小平板光学元件带来的 FM-to-AM 效应.

产生上述现象的原因与平板光学元件对不同波长的光具有不同的透过率有关, 由 (4) 和 (5) 式可知, 经相位调制后具有一定宽度的频谱, 不同波长的光经平板光学元件后对应的强度的透过率不一样. 因此, 我们在设计复杂激光系统时, 可以选用波

长可调谐的激光器作为前端种子光,通过改变种子光的中心波长,选择对展宽后的频谱过滤小的中心波长来减小平板光学元件带来的 FM-to-AM 效应.这种方法相对以往的补偿方法,不仅操作简单,而且避免了常规方法中在加入补偿装置后还得考虑其可能带来的其他效应的问题.

## 5 结论

经相位调制的激光脉冲在复杂激光系统传输放大过程中,要经过大量串联的平板光学元件,以前的做法是采用理想化处理,而实际上当通过的

平板光学元件达到一定的数目后,就必须考虑它们带来的影响.本文针对复杂激光系统中平板光学元件带来的 FM-to-AM 效应进行了理论研究和数值模拟.通过数值模拟,得到经过相位调制后的脉冲通过平板光学元件次数越多,调制深度越大,频谱的过滤也越严重,这是由于平板光学元件串联放大滤波作用所致.当选择中心波长为 1054 nm 时,频谱的过滤作用明显减弱.因而我们可以通过改变前端的中心波长,选用对频谱过滤作用非常小的中心波长( $\lambda = 1054$  nm)来减弱平板光学元件带来的 FM-to-AM 效应.

- 
- [1] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, Bowers M W, Dixit S N, Erbert G V, Heestand G M, Hennesian M A, Hermann M R, Jancaitis K S, Manes K R, Marshall C D, Mehta N C, Menapace J, Moses E, Murray J R, Nostrand M C, Orth C D, Patterson R, Sacks R A, Shaw M J, Spaeth M, Sutton S B, Williams W H, Widmayer C C, White R K, Yang S T, van Wonerghem B M 2007 *Appl. Opt.* **46** 3276
- [2] Lindl J D, Amedt P, Berger R H, Glendinning S G, Glenzer S H, Hann S W, Landen R L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339
- [3] Guo S F, Lu Q S, Zhou P, Zeng X W, Deng S Y, Cheng X A 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3766 (in Chinese) [郭少锋, 陆启生, 周萍, 曾学文, 邓少永, 程湘爱 2004 物理学报 **53** 3766]
- [4] Zhang R, Wang J J, Su J Q, Liu L Q, Ding L, Tang J, Liu H, Jing F, Zhang X M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6290 (in Chinese) [张锐, 王建军, 粟敬钦, 刘兰琴, 丁磊, 唐军, 刘华, 景峰, 张小民 2010 物理学报 **59** 6290]
- [5] Jiang X J, Zhou S L, Lin Z Q, Zhu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5824 (in Chinese) [江秀娟, 周申蕾, 林尊琪, 朱俭 2006 物理学报 **55** 5824]
- [6] Hocquet S, Lacroix G, Penninckx D 2009 *Appl. Opt.* **48** 2515
- [7] Murray J R, Smith J R, Ehrlich R B, Karazys D T, Thompson C E, Weiland T L, Wilcox R B 1989 *J. Opt. Soc. Am. B* **6** 2402
- [8] Rothenberg J E, Browning D F, Wilcox R B 1999 *Proc. SPIE* **3492** 51
- [9] Peter J W, Mark W B, Gaylen V E 2004 *Proc. SPIE* **5341** 146
- [10] Hocquet S, Penninckx D, Bordenave E, Gouedard C, Jaouen Y 2008 *Appl. Opt.* **47** 3338
- [11] Huang X D, Zhang X M, Wang J J, Xu D P, Zhang R, Lin H H, Deng Y, Geng Y C, Yu X Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1857 (in Chinese) [黄小东, 张小民, 王建军, 许党朋, 张锐, 林宏焕, 邓颖, 耿远超, 余晓秋 2010 物理学报 **59** 1857]
- [12] Lu X H, Wang J F, Jiang Y E, Fan W, Li X C 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 502012 (in Chinese) [卢兴华, 王江峰, 姜有恩, 范薇, 李学春 2011 中国激光 **38** 502012]
- [13] Li F, Ji F, Gu C, Zheng H, Gao K, Xu L X, Ming H 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1818 (in Chinese) [李锋, 纪帆, 顾春, 郑欢, 高昆, 许立新, 明海 2006 强激光与粒子束 **18** 1818]
- [14] Xu D P, Wang J J, Li M Z, Lin H H, Zhang R, Deng Y, Deng Q H, Huang X D, Wang M Z, Ding L, Tang J 2010 *Opt. Express* **18** 6621
- [15] Hocquet S, Penninckx D, Gleyze J F, Gouédard C, Jaouën Y 2010 *Appl. Opt.* **49** 1104
- [16] Geng Y C, Su J Q, Zhang R, Mo L, Wang F, Liu L Q, Wang W Y 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 302 (in Chinese) [耿远超, 粟敬钦, 张锐, 莫磊, 王方, 刘兰琴, 王文义 2009 中国激光 **36** 302]
- [17] Cao H B, Lu X Q, Li L B, Yin X H, Ma W X, Zhu J, Fan D Y 2011 *Appl. Opt.* **50** 3609
- [18] Sébastien V, Jacques L, Denis P 2011 *Opt. Lett.* **36** 88
- [19] Shi S X, Wang X E, Liu J S 2008 *Physical Optics and Applied Optics* (1st Ed.) (Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press) p69 (in Chinese) [石顺祥, 王学恩, 刘劲松 2008 物理光学与应用光学 (第一版) (西安: 西安电子科技大学出版社) 第 69 页]

# Investigation on FM-to-AM conversation of the optical flat plates in complex laser systems\*

Wang Yu-Lei<sup>1)2)†</sup> Zhang Yun<sup>2)</sup> Fu Wan-Qin<sup>2)</sup> Lü Zhi-Wei<sup>2)</sup> Zhou Yu<sup>2)</sup>  
Deng Qing-Hua<sup>3)</sup> Ding Lei<sup>3)</sup>

1) (*School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

2) (*National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China*)

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

(Received 18 April 2011; revised manuscript received 23 September 2011)

## Abstract

At present, in most high-power laser drivers the phase modulation is used to suppress the effect of stimulated Brillouin scattering and meet the requirement for target surface light intensity uniformity. However, the modulated pulses show intense FM-to-AM effect after transmitted through a complex laser system. Analyzing the source of this effect is essential to the improvement of the output performance of whole laser system. In this paper, the theoretical analysis and the numerical simulation of the FM-to-AM conversion of the optical flat plates are investigated, which has been ignored by many researchers. The simulation results show that the more the laser passes through the optical flat plates, the deeper the modulation will be (for example, the modulation depth will be as high as 22.2% when transmitting ten times), and it follows a linearly increasing trend. What's more, the different flat optical elements have different spectral filtering effects. When the central wavelength of the front-end is chosen to be 1054 nm, the spectral filtering effect is very weak. To our knowledge, the reduction of the FM-to-AM conversion by changing the central wavelength is presented for the first time.

**Keywords:** FM-to-AM effect, phase modulation, weak etalon effect

**PACS:** 42.60.Jf, 42.25.Bs

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61008005), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 20090450966) and Special Foundation (Grant No. 201003428), the Heilongjiang Postdoctoral Science Foundation, China (Grant No. LBH-Z09128), Natural Scientific Research Innovation Foundation in Harbin Institute of Technology, China (Grant No. HIT. NSRIF. 2009010) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. HIT. KLOF. 2010037).

† E-mail: wyl@hit.edu.cn