

高功率激光驱动器中幅频效应及其抑制技术研究进展

许党朋^{1,2}, 张锐¹, 田小程¹, 周丹丹¹, 朱娜¹, 宗兆玉¹, 王建军¹,
李明中¹, 胡东霞¹, 朱启华¹, 张小民¹

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088

摘要 采用相位调制技术产生的具有一定光谱分布的相位调制脉冲可以有效抑制高功率激光驱动器中大口径光学元件的横向受激布里渊散射和满足光束平滑需求, 但该脉冲在装置各系统传输放大过程中, 由于光谱畸变会引起幅频调制(FM-to-AM)效应, 这种效应严重影响了激光装置的输出性能及实验效果。介绍了相位调制脉冲产生原理、引起 FM-to-AM 效应的根本原因及因素, 综述了目前美国的国家点火装置、法国的兆焦耳装置以及我国的神光-III 主机装置在 FM-to-AM 效应抑制技术方面取得的重要进展。

关键词 激光光学; 惯性约束聚变; 激光驱动器; 前端系统; FM-to-AM 效应

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.020005

Progress on FM-to-AM Effect and Its Suppression in High Power Laser Driver

Xu Dangpeng^{1,2}, Zhang Rui¹, Tian Xiaocheng¹, Zhou Dandan¹, Zhu Na¹, Zong Zhaoyu¹,
Wang Jianjun¹, Li Mingzhong¹, Hu Dongxia¹, Zhu Qihua¹, Zhang Xiaomin¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Beijing Postgraduate Department, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract Laser pulse generated by phase modulation with certain spectrum distribution can suppress buildup of stimulated Brillouin scattering in large aperture laser optics and smooth the speckle pattern illuminating the target by spectral smoothing dispersion, but spectral distortion happening during the pulse transmission and amplification in each system of the laser facility can induce FM-to-AM effect, which will seriously affect the performance of the laser facility and physics experiments. The principal of phase modulated pulse, the reason why FM-to-AM effect happened and the factors which induced the FM-to-AM effect are introduced. And also the progress on suppression of FM-to-AM effect in National Ignition Facility, Laser Mégajoule laser megajoule facility and SG-III laser facility are reviewed.

Key words laser optics; inertial confinement fusion; laser driver; front-end system; FM-to-AM effect

OCIS codes 140.3510; 140.3580; 190.2640; 190.4360

1 引言

激光惯性约束聚变(ICF)是利用输出能量数兆焦耳的高功率激光驱动氢的同位素制成的氘-氚靶实现激光聚变^[1-2]。目前, 美国已建成的国家点火装置(NIF)^[3]和在建的法国兆焦耳激光装置(LMJ)^[4]是世界上规模最大的激光驱动器。在 ICF 激光驱动器中, 一方面, 为了抑制高功率窄带激光脉冲工作体制下, 熔石英大口径光学元件中产生的受激布里渊散射(SBS)效应, 需要在系统前级采用相位调制技术, 将单纵模激光能量

收稿日期: 2016-09-18; **收到修改稿日期:** 2016-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(61475145)

作者简介: 许党朋(1982—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事高功率光纤激光技术方面的研究。

E-mail: xudangpeng803@caep.cn

重新分配到模间距超过 SBS 带宽(约 200 MHz)的多个模式之上,使每个模式的峰值功率都低于 SBS 阈值^[5-6];另一方面,为了匀滑辐照靶丸的焦斑形态需要采用光谱色散匀滑技术(SSD),该技术的核心就是在系统前级对激光脉冲进行高频相位调制^[7]。如果相位调制得到的梳状光谱其边带在传输过程中受到不均匀传输而出现丢失或幅度失衡导致频谱对称结构被破坏,将使输出脉冲的顶部出现高频起伏,从而引起幅度调制,称之为幅频调制(FM-to-AM)效应^[6]。这种幅度调制对驱动器的影响主要体现在光学元件的破坏和驱动器的物理实验效果两方面,对物理实验效果的影响也体现在两个方面:一方面伴随着时间波形调制,参量不稳定性可能被放大,另一方面,调制可能改变黑腔的辐射温度^[8]。相位调制技术可以满足激光驱动器对光谱特性的需求,但与此同时这种脉冲在后续的传输放大过程中带来了不期望的时间调制,因此如何抑制 FM-to-AM 效应也是近十余年激光聚变驱动器研究的主要科学技术问题之一。本文从相位调制脉冲产生的原理出发,分析引起 FM-to-AM 效应的根本原因及影响因素。重点介绍目前世界各大激光装置在 FM-to-AM 效应及其抑制技术方面所取得的重要研究进展。

2 相位调制脉冲产生的基本原理

相位调制脉冲的产生是基于电光晶体相位调制原理,通过外加电场改变铌酸锂电光晶体折射率,进而改变出射激光的相位。若入射光脉冲表示为

$$E_{in} = A_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2t_0^2}\right) \exp(i\varphi_0), \quad (1)$$

式中 φ_0 表示光脉冲的初始相位,若外加射频信号呈正弦分布,波导相位调制器进行电光调制后,输出光脉冲可以表示为

$$E_{out} = A_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2t_0^2}\right) \exp[im \sin(2\pi f_m t) + i\varphi_0], \quad (2)$$

式中 m 表示电光调制深度, f_m 表示调制频率。将(2)式以贝塞尔函数的形式展开,可以得到脉冲的光谱呈贝塞尔函数分布。

相位调制器分为波导相位调制器和体相位调制器两种。波导相位调制器中加载于相位调制器的射频信号由独立的射频信号发生器产生,经过两级放大之后加载波导相位调制器晶体上。而体相位调制器则需要更高功率的射频源驱动来产生相位调制脉冲。

3 FM-to-AM 效应

3.1 引起 FM-to-AM 效应的根本原因

FM-to-AM 效应就是频率调制转换为幅度调制。FM-to-AM 效应主要体现在时间波形顶部出现周期性的调制,调制的形状取决于加载在相位调制器晶体上的微波驱动信号的形状,若是正弦信号,则时间波形顶部调制表现为正弦周期,该周期的长度取决于波导相位调制器的调制频率。为了定量描述 FM-to-AM 效应,定义 FM-to-AM 效应调制深度为^[9]

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

式中 I_{max} 、 I_{min} 分别表示光强的最大值和最小值, α 的范围为 0~200。理想情况下,即无调制时, α 为零。

理想情况下,单纯相位调制不会引起 FM-to-AM 效应。实际上,相位调制是在中心模式周围对称产生了很多“边带”,这些边带具有对称的幅度分布,相邻边带间的频率差等于调制频率。具有这种光谱特性的相位调制脉冲在装置各系统传输过程中,由于系统中光学元器件光谱透过率、相位不均匀传输等引起的光谱成分丢失,会引起 FM-to-AM 效应,一般地,相位调制脉冲在激光系统传输放大过程中,引起脉冲时间调制并不是某个边带的丢失,而是存在光谱透过率函数对梳状光谱轮廓的调制,这就打破了每个边带所占总体能量的份额比,从而引起较大的时间调制。也就是说引起 FM-to-AM 效应的根本原因在于相位调制脉冲光谱在传输过程中产生了光谱畸变。如果透过率线型中心和相位调制脉冲光谱中心接近,引起的时间调制深度较小,偏离越大则调制深度越大^[10]。在大型复杂的激光系统中,某个光学模块或者元件都存在光谱透过率,特

别是对光谱、相位等敏感的单元。所以针对不同系统中引起幅频效应的因素要逐一分析,并针对不同的因素提出抑制或预补偿幅频效应的方法。

3.2 引起 FM-to-AM 效应的主要因素

上述引起 FM-to-AM 效应最根本的原因为相位调制脉冲光谱的不均匀传输,造成光谱不均匀传输的主要因素包括光纤系统中的群速度色散、光谱带宽内的增益不均匀性、保偏光纤中的偏振模色散,弱标准具效应、光学元件膜层透过率以及频率转换过程等。

3.2.1 群速度色散

激光系统中光纤及其他色散介质的群速度色散(GVD)效应都可以引起 FM-to-AM 效应,这主要是由于这些传输媒介中群速度色散效应引起相位变化,造成梳状光谱传输不均匀。Rothenberg 等^[6]给出了由于群速度色散引起的 FM-to-AM 效应计算公式为

$$A_{\text{peak-to-peak}} = 2.3 \times 10^{-8} \cdot D \cdot z \cdot \Delta\nu_{\text{bw}} \cdot \nu_{\text{mod}}, \quad (4)$$

式中 D 表示色散量,单位为 $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, z 表示脉冲传输距离,单位为 m , $\Delta\nu_{\text{bw}}$ 表示相位调制脉冲的带宽, ν_{mod} 表示调制频率,两者的单位都为 GHz 。比如,带宽为 0.5 nm ,调制频率为 17 GHz 的相位调制脉冲在长度为 100 m ,色散量为 $40 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的光纤传输后引起约 21% 的时间调制。在不考虑光纤中非线性效应的情况下,这种由于群速度色散引起的 FM-to-AM 效应可以用色散补偿光纤或者负群速度色散光纤布拉格光栅(FBG)光栅对来补偿。

3.2.2 偏振模色散

由于保偏光纤的双折射效应,两偏振分量相互垂直的激光脉冲在光纤内传输到同一位置处存在时间差,称作差分群时延(DGD),典型值在 $1.5 \sim 2 \text{ ps/m}$ 。事实上,光纤中的偏振消光比(PER)可以高达 50 dB ,但是由于光纤末端光纤连接器、焊点等的存在使得其偏振消光比只有 20 dB 左右^[6]。

如果保偏光纤之间的连接不能严格保证快慢轴对准将大大降低整个链路的偏振消光比,即有一部分“鬼光”不在入射光的偏振态上传输,同时,还将使信号产生严重畸变。产生这种畸变的原因为保偏光纤中的偏振模色散效应(PMD)。如图 1 所示,在一根保偏跳线内,设 x, y 轴的方向分别为光纤快慢轴的方向,若入射线偏振光的偏振方向与光纤的快慢轴一致,则光在这段保偏光纤中传输时其偏振态保持不变;实际情况下,在接头处由于对接误差、应力等因素,有部分光耦合进入 y 轴,光在 x, y 轴的群速度不同,导致 DGD 产生。在光纤的出射端,有相位差的两个偏振态光会发生干涉,这个过程类似于迈克耳孙干涉。 x, y 轴的光功率取决于信号光与“鬼光”的相位差,此相位差是与波长相关的,因为它与光程差相关,即与 DGD 相关,如图 1 所示。因此,保偏光纤的偏振消光比也是与波长相关的。不同频率的光在 x, y 轴上的光谱透过率不同,因此信号光会产生畸变。

利用光的琼斯矩阵,推导出光纤连接器以及保偏光纤对信号作用的传递函数为^[11]

$$H(f) = 1 + \frac{1}{P} \exp[-i(2\pi f \Delta\tau + \varphi)], \quad (5)$$

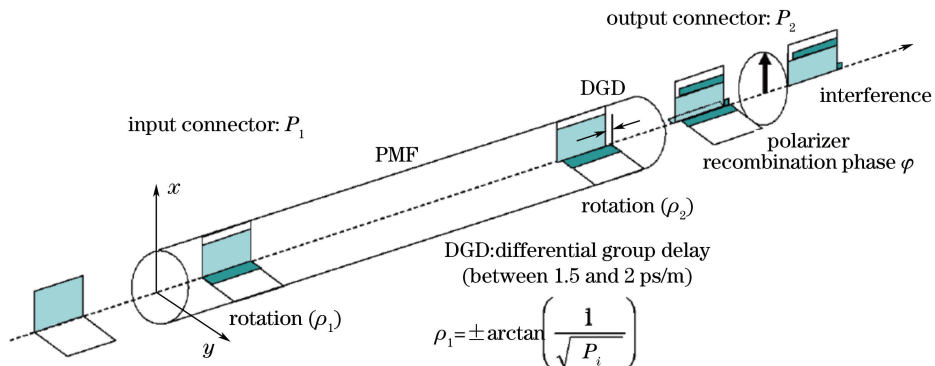


图 1 光脉冲在保偏光纤跳线中传输

Fig. 1 Pulse propagation over one polarization maintaining patch cord

式中 f 表示光谱频率, φ 表示快慢轴之间的相位差。 $P = \sqrt{P_1 \cdot P_2}$, P_1, P_2 分别为输入和输出光纤连接器的偏振消光比。 $\Delta\tau$ 表示差分群时延。利用(2)、(5)式可以推导出输出光强的表达式为

$$I_{\text{out}}(t) = 1 + \frac{1}{P^2} + \frac{2}{P} \cos \left\{ 2m \cdot \sin(\pi f_m \Delta\tau) \cos \left[2\pi f_m \left(t - \frac{\Delta\tau}{2} \right) \right] \right\}. \quad (6)$$

(6)式中,影响输出脉冲强度的因素主要是光纤连接器的偏振消光比、相位调制脉冲的调制深度、调制频率以及差分群时延。经分析,在光纤连接器的偏振消光比一定的情况下,保偏光纤越长,幅频效应转换因子越大;达到一定长度时,保持不变。当连接头的偏振消光比为 20 dB,保偏光纤长约 20 m 时,幅频效应转换因子几乎达到最大值 4%。而实际情况下,多个光纤器件之间需要连接多根保偏光纤,这会进一步引发严重的幅频效应。

3.2.3 增益窄化效应

对于激光频率非常接近增益介质增益峰值,增益发射截面可以按泰勒级数展开,并且只保留第一项,增益可以写为^[11]

$$G(\Delta\lambda) = \exp [g_0 (1 - b \cdot \Delta\lambda^2)], \quad (7)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为增益谱宽, g_0 为中心频率处的小信号增益系数, b 表示与增益线型有关的常数。则相对于增益线型峰值处的光谱透过率为

$$T(\Delta\lambda) = \exp(-g_0 b \cdot \Delta\lambda^2). \quad (8)$$

然而,相位调制脉冲光谱宽度相对于激光增益带宽较小时,上式中的指数形式可以简化,并写成 dB 的形式为

$$T(\Delta\lambda) = -g_0 [\text{dB}] \cdot (\Delta\lambda / \lambda_{\text{hw}})^2, \quad (9)$$

式中 $g_0 [\text{dB}]$ 是换算为 dB 形式的中心频率处小信号增益系数,代表增益窄化的贡献。 λ_{hw} 表示在不考虑增益窄化时,测量的增益半宽。比如,对于 LG760 其增益半宽约为 5.8 nm,而对于 LG750 约为 8 nm。取 $g_0 [\text{dB}]$ 为 100 dB,并且假设增益介质采用 LG760,对于带宽为 0.5 nm 的相位调制脉冲,若在增益线型的中心,则产生 FM-to-AM 效应的时间调制约为 3.8%。然而,同样是带宽为 0.5 nm 的相位调制脉冲,如果偏离增益线型中心 0.5 nm,则时间调制将增加到约 30%。当然,在增益线型可准确测量之后,可以在插入光谱滤波器来预补偿。

3.2.4 弱标准具效应

由于光学元件前后表面存在比较微弱的反射,这样就相当于一个反射率较低的“弱标准具”,对于标准具都存在一定的透过率曲线

$$T = 1 / \left(1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2} \right), \quad (10)$$

$$F = 4R / (1 - R)^2, \quad (11)$$

$$\delta = 4\pi n d / \lambda, \quad (12)$$

式中 R 为两个表面的反射率, d 表示波片或者偏振片的厚度。

当系统中存在多个(k 个)具有标准具效应的光学元件时,总的透过率就是所有波片的透过率的乘积

$$T = T_1 \times T_2 \times \cdots \times T_k. \quad (13)$$

当相位调制脉冲传输经过具有标准具效应的光学系统时,光谱受到调制,会引起 FM-to-AM 效应。本课题组在 2010 年分别在理论和实验上研究了复杂光学系统中波片的弱标准具效应引起的 FM-to-AM 效应^[12]。

4 FM-to-AM 效应抑制技术

FM-to-AM 效应严重影响了激光装置输出脉冲时间波形、束间功率平衡等性能,并且有可能影响装置的物理实验效果,一直以来,FM-to-AM 效应抑制技术是 ICF 激光驱动器领域研究热点之一。实际上 FM-to-AM 效应抑制技术也称为 FM-to-AM 效应预补偿技术。近十余年来美国 NIF 装置、法国 LMJ 装置以及我国的 SG-III 在 FM-to-AM 效应抑制技术方面都取得了较大进展。

4.1 NIF 激光装置 FM-to-AM 效应抑制技术

目前国际上知名的激光驱动器装置都在前端系统中采用相位调制脉冲技术方案实现具有一定带宽的激光脉冲产生,在前端系统设计之初都考虑了如何最大化抑制 FM-to-AM 效应。图 2 所示为 2007 年报道的美国 NIF 装置前端系统技术方案^[9]。该方案采用两级相位调制器(分别是 3 GHz 和 17 GHz)产生总带宽约为 0.5 nm 的相位调制脉冲。NIF 装置前端系统最为重要的就是其绝大多数光纤采用的是单偏振光纤,很大程度上提升了消光比,从而有效抑制了由于偏振模式色散引起的 FM-to-AM 效应。另外,分别采用一个色散补偿单元和 FM-to-AM 补偿单元来补偿前端系统光纤色散、预放系统中再生放大器引入的时间调制。其中色散补偿单元利用色散补偿光纤,而 FM-to-AM 补偿单元则是基于法布里-珀罗(F-P)干涉滤波技术实现,如图 3 所示^[13],结果显示,这种预补偿技术可以将脉冲 FM-to-AM 效应的时间调制从 45% 抑制到约 4%,如图 4 所示。这两种技术的结合在最初很大程度上预补偿了系统中的 FM-to-AM 效应。但是随着研究的深入和建设规模的增大发现不能实现每束光路的精细补偿。

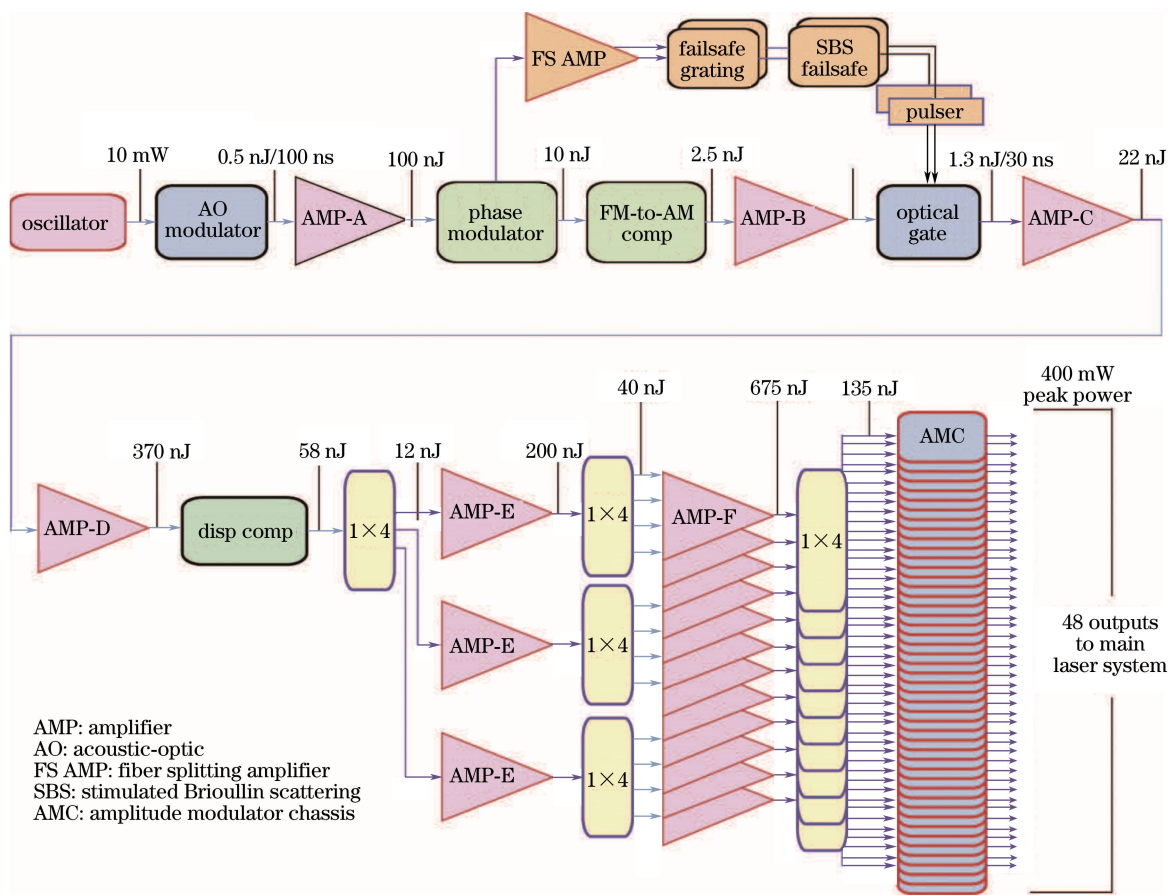


图 2 NIF 装置主振荡器和脉冲整形系统方案图

Fig. 2 Schematic of the master oscillator and NIF pulse-shaping system

2012 年 NIF 装置的前端系统研究团队报道了最新进展。采用图 5 所示的基于保偏光纤偏振模式色散的调幅(AM)补偿单元^[14]。图中绿色的光纤表示单偏振光纤,蓝色的表示滤波器温度控制的高双折射保偏光纤,红色的部分表示用于补偿滤波器损耗的保偏光纤放大器。

该单元采用严格温度控制的长度为 1.5 m 高双折射保偏光纤作为该光谱滤波器的核心部分,保偏光纤两个轴之间的色散为 $D=1.67$ ps/m,自由光谱范围为 1.5 nm。该滤波器用严格的温度控制实现温度调谐,温度控制稳定性要求小于 0.004 °C。该滤波器的补偿传递函数为

$$H(\lambda) = a + b \cos [2\pi c L D \lambda / \lambda_0^2 + \varphi(T)] . \quad (14)$$

图 6 表示利用该补偿单元的补偿效果图。理论模拟结果显示,针对图 6(a)中红色线条表示的斜率为 2.2 nm^{-1} 的光谱透过率,只考虑抑制横向受激布里渊散射(TSBS)的相位调制频率,带宽为 30 GHz 情况下,

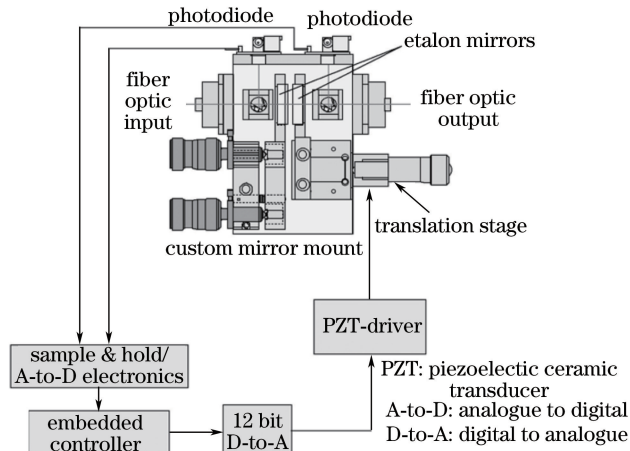


图 3 NIF 激光装置幅度调制补偿单元图

Fig. 3 Block diagram of AM compensator

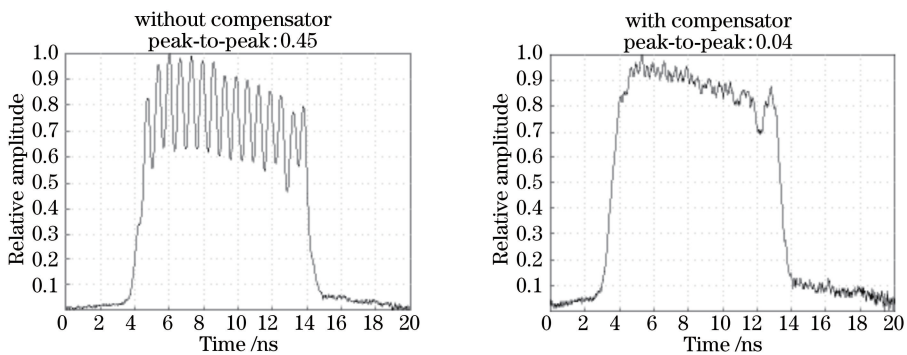


图 4 NIF 激光装置预放大系统再生放大后输出采用抑制技术前后时间波形

Fig. 4 Temporal pulse shape at the output of the pre-amplification regenerative amplifier with and without compensator installed

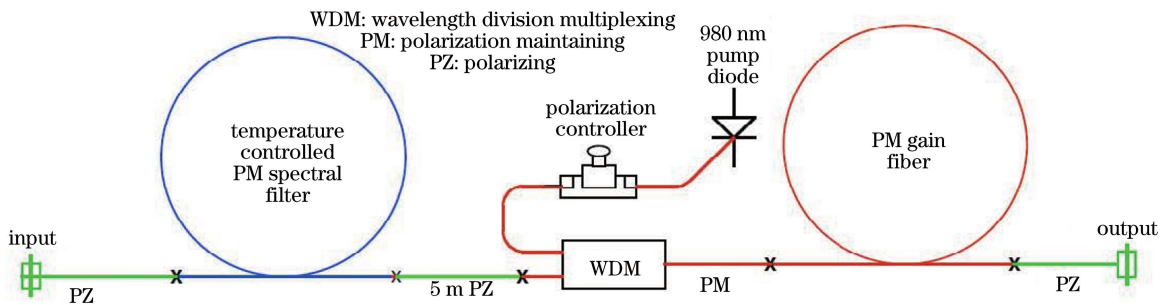


图 5 基于保偏光纤的 AM 补偿单元光路示意图

Fig. 5 Fibered AM compensator layout

该补偿单元有效地将 12.2% 的时间调制抑制到 0.3%。

同时, NIF 装置在每路预放系统中插入一个可调滤波器用于进一步抑制系统中的相位调制脉冲的 FM-to-AM 效应^[14]。在每次中心波长发生改变之后, F-P 补偿单元需要 18 h 来重新调节, 可调滤波器取代了原来基于术的补偿单元, 提升了装置的运行效率。

以上两种补偿措施可以针对 NIF 装置前端-预放系统每路输出进行独立补偿, 然而, 由于 NIF 装置前端-预放系统是一拖四的构型设计, 该补偿单元还不能针对 192 路进行独立补偿, 因此, 这就对每个四束的光学元件透过率一致性提出了很高的要求。

图 7 表示 NIF 采用基于保偏光纤的 AM 补偿单元技术和可调滤波器技术的实验结果。只考虑抑制 TSBS 效应的调制频率时, 2009 年采用以前的抑制手段, 装置输出脉冲波形时间调制最大值达到 18.1%, 最

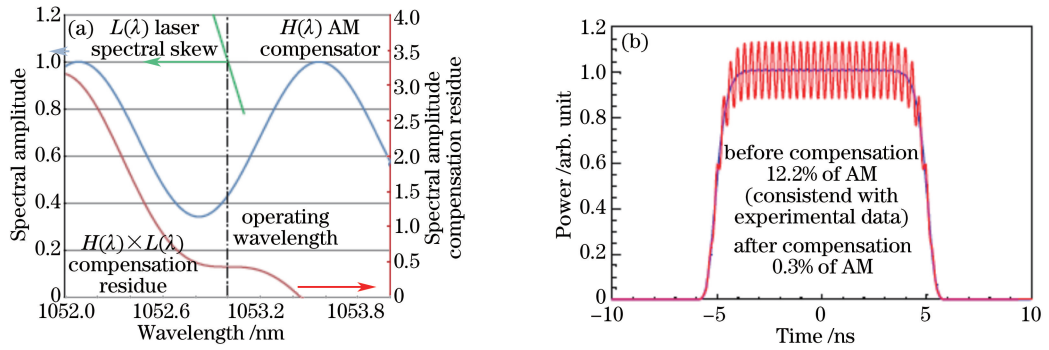


图6 理论研究 AM 补偿单元的补偿效果。(a) AM 补偿单元应用于斜率为 2.2 nm^{-1} 的光谱透过率的例子;(b) 补偿前后的时间调制状况

Fig. 6 Theoretical analysis of fibered AM compensator. (a) Example of AM compensator for 2.2 nm^{-1} slope; (b) before and after compensation for 2.2 nm^{-1} slope

小值为 2.1%，平均值为 6.8%。2011 年在前端系统 48 路上采用了基于保偏光纤偏振模色散的 AM 补偿单元后，脉冲波形时间调制最大的为 5%，最小为基本无调制，平均值为 1.8%。若考虑用于 SSD 的相位调制频率后，相位调制脉冲光谱带宽为 45 GHz，评估后时间调制约增加 3.4 倍，也就是说脉冲波形的时间调制将约增大 6%。这就预示着相位调制脉冲光谱带宽进一步增大的同时 FM-to-AM 效应时间调制也将进一步增加。为了保障装置的输出性能与光学元件的安全，理论模拟研究显示要将脉冲波形时间调制控制在 10%~15%，图 7 显示，此时装置输出 3ω 功率可达到 500 TW。

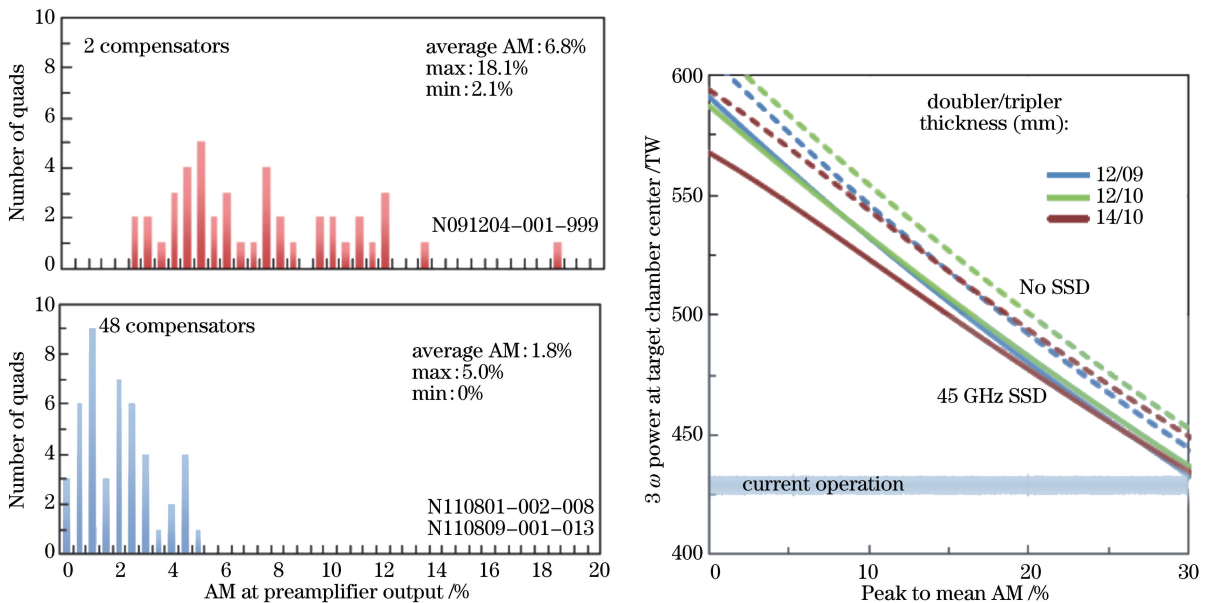


图7 NIF 装置 FM-to-AM 效应抑制效果及评估

Fig. 7 Estimation of effect for suppressing FM-to-AM effect in NIF

NIF 装置从前端系统两个单元模块(色散补偿单元模块和 FM-to-AM 补偿模块)发展到每个四束一组独立的补偿模块(基于保偏光纤偏振模色散的 AM 补偿器和预放系统中的可调滤波器),在装置建设过程中性能不断完善。

4.2 LMJ 激光装置 FM-to-AM 效应抑制技术

图 8 所示为法国 LMJ 激光装置前端系统技术方案^[15-16]。该方案也是采用两级波导相位调制器(分别为 2 GHz 和 14.25 GHz)产生总带宽约为 203 GHz,谱宽 0.75 nm 的相位调制脉冲。

与 NIF 装置前端系统不同的是,LMJ 激光装置前端系统全部采用保偏光纤及保偏光纤器件。LMJ 激光装置光脉冲产生技术相关研究人员在保偏光纤传输特性方面开展了大量的重要研究。Penninckx 等^[17-18]

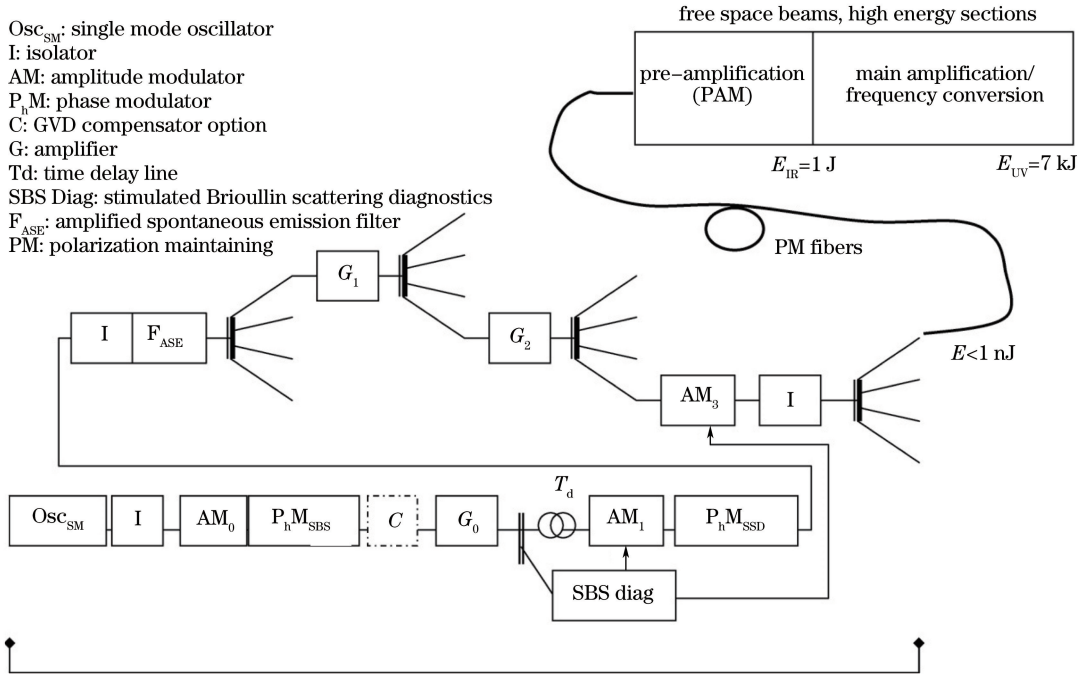


图 8 LMJ 激光装置光纤注入系统技术方案

Fig. 8 Architecture of the fibered injection system design on LMJ

建立了相位调制脉冲在保偏光纤及级联保偏光纤中的传输模型,分析了相位调制脉冲在保偏光纤中的受差分群时延的影响,两轴之间存在相位差,在保偏光纤之间连接器起偏就会发生偏振光干涉,造成光谱畸变,从而引起 FM-to-AM 效应。研究表明在设计全保偏光脉冲产生系统时,应通过采用长度较短的保偏光纤、插入起偏器、优化保偏光纤连接器以及轴交替等方式抑制 FM-to-AM 效应。

系统中还采用了一个色散补偿单元来补偿光纤系统中由于群速度色散引起时间调制,与 NIF 不同的是,该色散补偿单元利用光纤布拉格光栅制成,如图 9 所示。

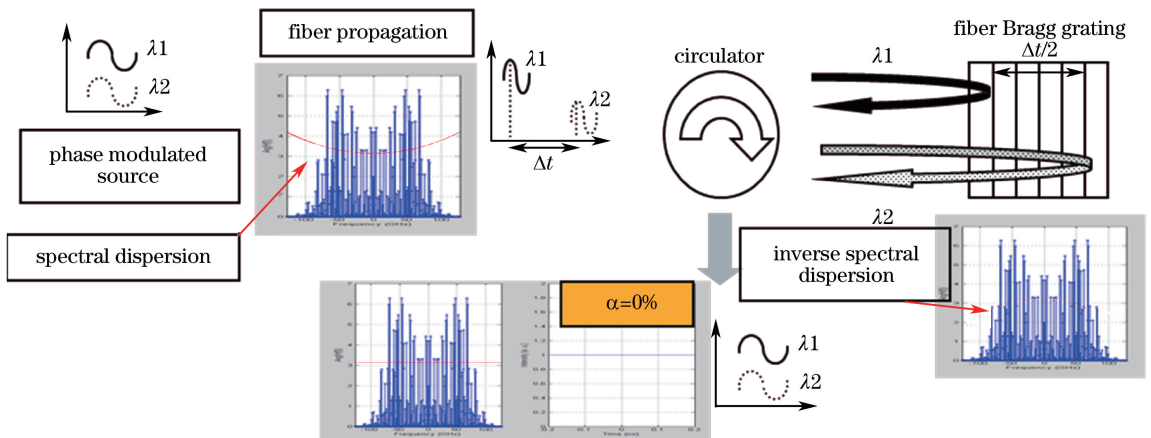


图 9 基于光纤布拉格光栅的色散补偿技术方案图

Fig. 9 Schematic of fiber dispersion compensation based on fiber Bragg grating

另外, Vidal 等^[19]在 2011 年提出并实验验证了利用线性滤波函数预补偿由频率转换过程相位失配引起频域的非线性传递函数,补偿原理如图 10 所示,横坐标表示相位调制脉冲的光谱频率,纵坐标分别表示输入光谱[图 10(a)]和输出的二次谐波光谱[图 10(b)],光谱的边带部分在传输过程中透过率较低,图 10(a)红色曲线表示线性传递函数预补偿相位调制脉冲光谱,图 10(b)表示 KTP 晶体在 10 MW/cm² 的传递函数调制相位调制脉冲光谱。

基于上述预补偿原理,设计了一种基于保偏光纤偏振模式色散的干涉滤波器,该滤波器原理图如图 11

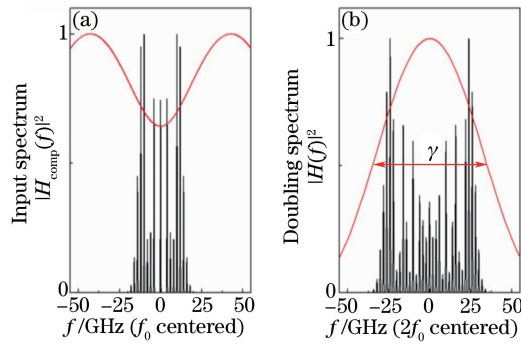


图 10 在频域预补偿 FM-to-AM 效应原理

Fig. 10 Precompensation of FM-to-AM effect conversion in the spectral domain

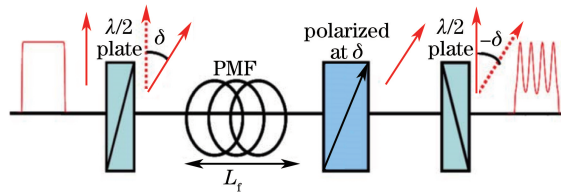


图 11 基于保偏光纤的干涉滤波器示意图

Fig. 11 Schematic of the interferometric filter based on polarization-maintaining fiber

所示。主要由保偏光纤、两个 $\lambda/2$ 波片以及起偏器构成。第一个半波片用来设定输入脉冲的偏振方向角 δ ，光纤起偏器沿着 δ 方向起偏，第二个半波片设定输出脉冲的偏振态与输入的偏振态方向一致。保偏光纤长度 L_f 决定了两轴之间的差分群延时量，而起偏器使这两个方向发生偏振光干涉。

图 12 表示补偿前后相位调制脉冲时间调制情况。图 12(a) 表示输入光强度为 10 MW/cm^2 二次谐波脉冲时间波形，调制深度约为 52%，图 12(b) 表示补偿后时间波形调制小于 6%。图 12(c) 和图 12(d) 分别是补偿前后的模拟结果。

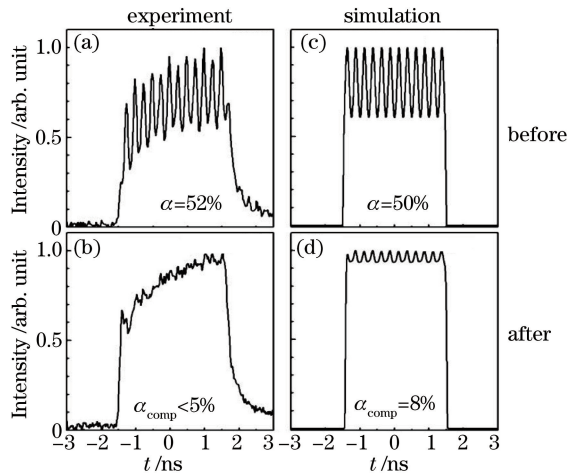


图 12 预补偿前后相位调制脉冲时间调制的实验和模拟结果

Fig. 12 Experimental and simulation results before and after suppression of FM-to-AM modulations

在 LMJ 激光装置频率转换系统中，如图 13 所示，相位调制脉冲的光谱宽度大于频率转换系统的带宽^[9]。为了提升转换效率，在晶体之间加入了一块平面光栅，该光栅主要将相位调制光谱实现角色散来补偿相位失配。最后采用一块聚焦光栅实现 3ω 激光与 1ω 和 2ω 的分离，同时避免光学元件暴露于实验产生的中子中。

频率转换系统引起 FM-to-AM 效应主要有两个来源：一是系统前级 1ω 脉冲波形时间调制的放大；二是非线性晶体中的相位失配引起的传递函数。此外平面光栅的空间色散也会引起时间调制，这主要是由于平面光栅主要用来空间上分离不同波长的光，光栅上产生的相位因波长差异而不同。不同的是聚焦光栅能很大程度上抑制 FM-to-AM 效应，这主要是由于在聚焦光栅成为一个线性低通滤波器，如图 14 所示，在聚焦光栅后时间调制小于 10%。

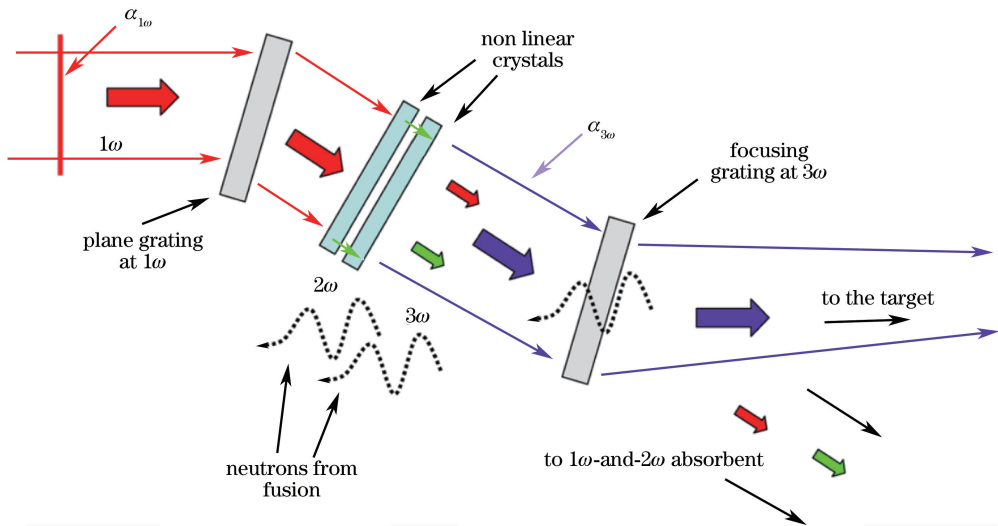


图 13 LMJ 激光装置的频率转换和聚焦系统光路示意图

Fig. 13 Simple description of the frequency conversion and focusing system on LMJ

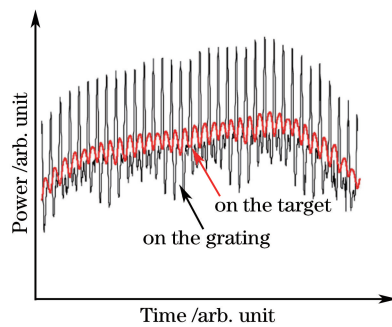


图 14 聚焦光栅前后时域脉冲波形时间调制

Fig. 14 Details of temporal shapes before and after the focusing grating in the LMJ configuration

4.3 SG-III 激光装置 FM-to-AM 效应抑制技术

与 NIF 装置前端系统和 LMJ 装置前端系统不同的是,SG-III 激光装置包含 48 束激光输出,紫外激光能量达 180 kJ 的 SG-III 激光装置前端系统采用普通单模光纤体系,同时,为了尽可能好地抑制由于群速度色散和偏振模色散引起的 FM-to-AM 效应,将光谱展宽单元——波导相位调制器置于系统末级,使相位调制脉冲尽可能少地在光纤中传输,系统技术方案如图 15 所示^[20-21]。

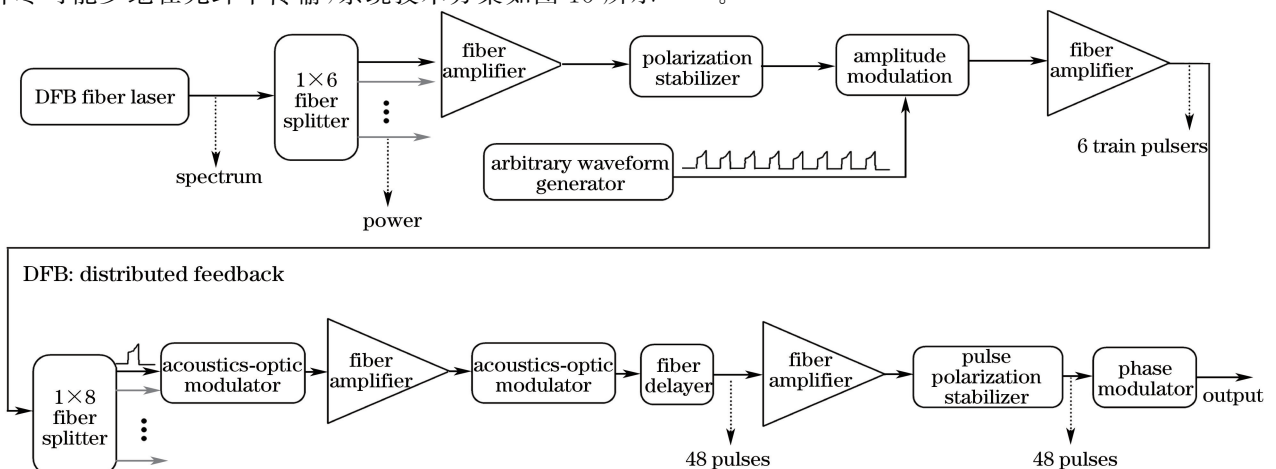


图 15 SG-III 激光装置光脉冲产生系统技术方案示意图

Fig. 15 Schematic of SG-III optical pulse generation system

前端系统末级采用调制频率为 2.488 GHz 锁相波导相位调制器将单纵模激光展宽为约 90 GHz。波导相位调制器输出采用长度 4.2 m 的保偏光纤,输出至预放系统。为了抑制后续系统的时间调制并实现 48 路可独立补偿,研制了一种基于保偏光纤的偏振旋转滤波器,如图 16 所示,该滤波器由起偏器(FPZ),保偏光纤(PMF),光纤耦合器(FC),半波片以及偏振分束器组成^[22]。

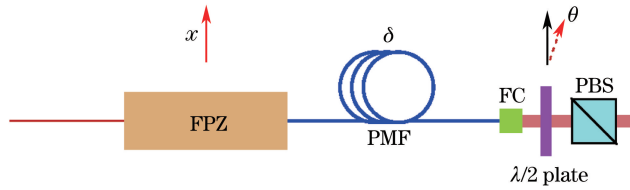


图 16 基于保偏光纤的偏振旋转滤波器原理示意图

Fig. 16 Schematic of the fiber-based polarization-rotation filter

理论分析了预补偿滤波器的设计要求:光纤长度的选取决定了滤波器周期,波片角度决定了滤波器的透过率,如图 17 所示。实验研究了基于保偏光纤的偏振旋转滤波技术实现预补偿,结果表明这种滤波器可以有效地将前端-预放系统输出调制控制在 5% 左右,如图 18 所示。

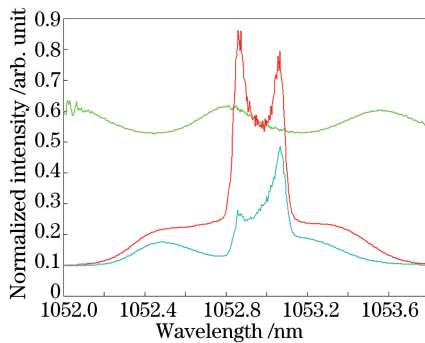


图 17 输入输出滤波器的光谱以及滤波器的透过率

Fig. 17 Optical spectrum with and without the filter and the transmission curve

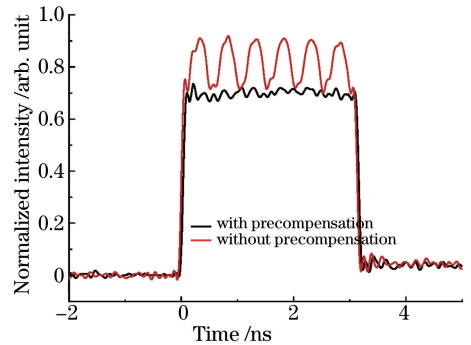


图 18 预补偿前后脉冲时间波形

Fig. 18 Output temporal envelope of the preamplifier module with and without precompensation of the filter

5 结束语

由于相位调制脉冲光谱畸变引起的 FM-to-AM 效应严重影响了高功率固体激光驱动器的输出时间特性、实验效果以及运行安全。因此,FM-to-AM 效应抑制技术是高功率激光驱动器研究领域关键科学技术问题之一。系统介绍了 FM-to-AM 效应产生的根本原因、表征方法、形态特征以及影响因素。分别介绍了美国 NIF 装置、法国 LMJ 装置以及中国 SG-III 激光装置 FM-to-AM 效应抑制技术的研究进展。美国 NIF 装置采用以单偏振光纤为核心的技术路线实现了前端系统,采用色散补偿、保偏光纤偏振模色散干涉滤波以及可调滤波器等方式有效抑制了装置中的幅度调制,并评估得出高功率固体驱动器须将时间调制抑制在 10%~15%,至目前 NIF 装置自评为简单易用装置。法国 LMJ 激光装置则采用以保偏光纤及器件为核心的技术路线实现了前端系统,采用基于光纤布拉格光栅的色散补偿技术、线性补偿技术等有效抑制了装置中的时间调制,目前时间调制水平小于 10%。SG-III 激光装置为了尽可能避免光纤中群速度色散、偏振模色散等影响,采用了单模光纤体系,在系统末级波导相位调制技术实现光谱展宽,同样采用了基于保偏光纤的线性偏振旋转滤波技术实现每路独立补偿功能。为了尽可能降低平板型光学元件弱标准具效应引起的时间调制,系统优化设计减少了易发生弱标准具效应的数量,如波片,同时针对用于空间整形的液晶光阀进行了镀膜透膜以减少弱标准具效应引起的时间调制,目前装置输出时间波形的时间调制小于 10%。总之,相位调制脉冲光谱非常敏感,在传输放大过程中微弱的光谱畸变就会引起较大的调制,目前世界上重要的驱动器装置都在该方面取得了重要的研究结果,但是为了应对高功率激光驱动器对光谱性能要求的不断提高,还需在 FM-to-AM 效应抑制技术方面深入研究。

参 考 文 献

- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, *et al.* The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [2] Zhang Bo, Peng Zhitao, Lü Jiakun, *et al.* Multi-beams time-synchronization measurement for inertial confinement fusion laser facility[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(2): 0208003.
张波, 彭志涛, 吕嘉坤, 等. 惯性约束核聚变激光驱动器多路光束时间同步测试方法[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0208003.
- [3] Haynam C A, Sacks R A, Wegner P J, *et al.* The National Ignition Facility 2007 laser performance status[C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, 112: 032004.
- [4] André M L. The French megajoule laser project (LMJ)[J]. *Fusion Engineering and Design*, 1999, 44(1-4): 43-49.
- [5] Pan Xingchen, Tao Hua, Liu Cheng, *et al.* Applications of iterative algorithm based on phase modulation in high power laser facilities[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(1): 0108001.
潘兴臣, 陶华, 刘诚, 等. 基于相位调制的单次曝光波前测量在高功率激光驱动器中的应用[J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0108001.
- [6] Rothenberg J E, Browning D F, Wilcox R B, *et al.* Issue of FM to AM conversion on the National Ignition Facility[C]. *SPIE*, 1999, 3492: 51-61.
- [7] Wen Ping, Li Zelong, Zhong Zheqiang, *et al.* Parameters optimization for multi-color multi-central frequency smoothing by spectral dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0614001.
文萍, 李泽龙, 钟哲强, 等. 多色, 多频光谱角色散匀滑技术的参数优化[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0614001.
- [8] Jiang Shaoen, Dong Yunsong, Huang Tianxuan, *et al.* Initial indirect-driven implosion integrated experiment on Shengguang III laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(8): 080101.
江少恩, 董云松, 黄天暄, 等. 神光 III 主机装置首次间接驱动内爆集成实验[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(8): 080101.
- [9] Hocquet S, Penninckx D, Bordenave E, *et al.* FM-to-AM conversion in high-power lasers[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(18): 3338-3349.
- [10] Li J, Wang J J, Xu D P, *et al.* Impact of spectral filter on phase modulation pulse in fiber front end system[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(3): 034205.
- [11] Penninckx D, Beck N, *et al.* Axis alternation for signal propagation over polarization-maintaining fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(7): 856-858.
- [12] Xu D P, Wang J J, Li M Z, *et al.* Weak etalon effect in wave plates can introduce significant FM-to-AM modulations in complex laser systems[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6621-6627.
- [13] Wisoff P J, Bowers M W, Erbert G V, *et al.* NIF Injection Laser System[C]. *SPIE*, 2004, 5341: 146-155.
- [14] Hayman C, Nicola J D, Wegner P, *et al.* NIF laser capabilities[R]. Livermore: the National Ignition Facility, 2012.
- [15] Jolly A, Gleyze J F, Luce J, *et al.* Front-end sources of the LIL-LMJ fusion lasers: progress report and prospects[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(5): 1427-1438.
- [16] Jolly A, Gleyze J F, Penninckx D, *et al.* Fiber lasers integration for LMJ[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, 7(2): 198-212.
- [17] Penninckx D, Beck N. Definition, meaning, and measurement of the polarization extinction ratio of fiber-based devices[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(36): 7773-7779.
- [18] Penninckx D, Beck N, Gleyze J F, *et al.* Signal propagation over polarization-maintaining fibers: problem and solutions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(11): 4197-4207.
- [19] Vidal S, Luce J, Penninckx D, *et al.* Experimental demonstration of linear precompensation of a nonlinear transfer function due to second-harmonic generation[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(1): 88-90.
- [20] Wang Jianjun, Xu Dangpeng, Lin Honghuan, *et al.* Multibeam Optical pulse generation system based on time division multiplexing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(12): 8725-8732.
王建军, 许党朋, 林宏环, 等. 基于时分复用技术的基多束光脉冲产生系统[J]. *物理学报*, 2010, 59(12): 8725-8732.
- [21] Xu D P, Zhang R, Tian X C, *et al.* Progress on the suppression of FM-to-AM modulations in SG-III laser facility[C]. *SPIE*, 2015, 9255: 925505.
- [22] Xu D P, Huang Z H, Wang J J, *et al.* A fiber-based polarization-rotation filter utilized to suppress the FM-to-AM effect in a large-scale laser facility[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(8): 085702.