

# 高精度整形激光脉冲产生技术研究

宗兆玉, 许党朋\*, 田小程, 张锐, 周丹丹, 范孟秋, 朱娜, 谢亮华, 李宏勋

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 研究了一种用于惯性约束聚变激光驱动器的纳秒级、高精度整形激光脉冲产生技术。采用中心波长为980 nm的激光二极管作为参考光,以自动调控幅度调制器的偏置工作点,实现了脉冲工作体制的幅度调制。基于高速电光调制技术,采用两级幅度调制器设计了主振荡功率放大型全光纤激光脉冲产生装置。其中,第1级幅度调制器用于对输入连续运转的单纵模激光进行初始精密脉冲整形,第2级幅度调制器用于对激光脉冲进行二次精密整形和时域噪声抑制。实验研究表明,该激光脉冲产生装置可输出脉冲宽度在“0.1~50.0 ns”范围内连续可调、对比度大于2000:1的高精度任意整形激光脉冲,满足了激光脉冲产生装置较强脉冲控制能力的要求。

**关键词** 激光光学; 整形脉冲; 幅度调制器; 对比度

**中图分类号** TN248

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0105001

## Laser Pulse Generation Technology with High Adjustment Precision

Zong Zhaoyu, Xu Dangpeng, Tian Xiaocheng, Zhang Rui, Zhou Dandan,  
Fan Mengqiu, Zhu Na, Xie Lianghua, Li Hongxun

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

**Abstract** The nanosecond-scale laser pulse generation technology with high adjustment precision for laser fusion driver is investigated. By employing a laser diode with central wavelength of 980 nm as reference light and controlling the bias point automatically, an amplitude modulator operating in the pulse mode is implemented. All-fiber laser pulse generation device based on the master oscillator power amplifier structure is established by using high speed electro-optic modulation technology and two-level amplitude modulators simultaneously. The initial precise pulse shaping of input single frequency continuous laser is done by the first amplitude modulator, and the secondary pulse shaping and decreasing noise of temporal shaped pulses are done by the other one. The experimental results show that the device can generate arbitrary shaped pulses with contrast ratio larger than 2000:1 and pulse duration of 0.1~50.0 ns, which satisfies the requirement of powerful control capability of laser pulse generation device.

**Key words** laser optics; pulse shaping; amplitude modulator; contrast ratio

**OCIS codes** 140.4480; 140.3300; 140.3570; 140.3510

## 1 引言

在惯性约束聚变(ICF)驱动器激光脉冲产生系统中,对单纵模激光器输出的连续波激光进行精密脉冲整形是必不可少的一个环节。精密调整激光脉冲的形状,能够使驱动器最大限度地利用激光脉冲的能量,从而实现聚变点火<sup>[1-2]</sup>。激光整形脉冲的对比度是一个非常重要的参数,尤其是在超强激光脉冲与微靶丸相互作用过程中<sup>[3-4]</sup>。根据聚变点火物理需求,驱动器需要输出一个对比度足够高的纳秒级精密整形激光脉冲<sup>[5]</sup>。然而,由于激光脉冲产生系统输出的激光整形脉冲在后续光学链路中传输时将受到多级放大器的增益饱和等非线性效应的影响,脉冲对比度将不可避免地持续下降,因此要求激光脉冲产生系统输出更高对比

收稿日期: 2016-09-09; 收到修改稿日期: 2016-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(61475145)

作者简介: 宗兆玉(1991—),男,硕士,研究实习员,主要从事光纤激光技术方面的研究。E-mail: zhaoyuzong\_803@163.com

\* 通信联系人。E-mail: xudangpeng803@caep.cn

度的整形脉冲。

随着研究的深入,研究人员提出了多种激光时域整形方法。20世纪90年代,Nova装置利用高压普克尔盒削波整形技术产生了“0.5~5 ns”的激光整形脉冲,该方法整形能力有限,并且需要数千伏的高压驱动,稳定性较差<sup>[6]</sup>。2007年,林宏奂等<sup>[7-8]</sup>报道了一种啁啾脉冲堆积方法,该方法输出的整形光脉冲上升沿陡峭、时间抖动小,但由于相邻子脉冲间的堆积重叠将引起较大的调制效应。目前ICF驱动器激光脉冲产生系统多采用波导电光幅度调制技术来对单纵模激光进行时域整形<sup>[9-14]</sup>。神光Ⅲ原型装置最初采用两级LiNbO<sub>3</sub>幅度调制器紧密串联来产生整形脉冲,连续波激光通过第1级幅度调制器产生的20 ns方波脉冲输入到第2级幅度调制器后削波产生“1~10 ns”的任意整形脉冲<sup>[11]</sup>。随着幅度调制元器件消光比等性能参数的优化提高,兆焦耳(LMJ)装置以及神光Ⅲ主机装置采用单级幅度调制器来产生整形脉冲<sup>[12-13]</sup>。国家点火装置(NIF)也采用紧密相连的两级幅度调制器对激光信号进行时域整形,其中第1级幅度调制器用于产生目标波形,第2级幅度调制器由方波电脉冲驱动以提升光脉冲的上升沿和下降沿<sup>[14-15]</sup>。利用上述波导电光幅度调制技术可产生时域调节能力较强的激光整形脉冲,如NIF装置,由上述方法产生的激光整形脉冲的最高对比度为275:1<sup>[14]</sup>,但其整形精度、对比度以及信噪比仍不足以支撑苛刻条件下精密物理实验的研究需要<sup>[16]</sup>。

本文从满足精密物理实验的需求出发,研究激光脉冲精密整形的原理,采用980 nm的激光作为参考光以调控幅度调制器的偏置工作点,实现脉冲工作体制幅度调制。设计了主振荡功率放大(MOPA)型全光纤激光脉冲产生系统,采用高速任意波形发生器并级联两级幅度调制器的方法产生了高对比度、高整形精度的激光脉冲,并对实验结果进行了分析。

## 2 激光时域精密整形原理与调制器设计

### 2.1 马赫-曾德尔光强度调制器工作原理

激光脉冲产生系统在电脉冲信号的驱动下采用高消光比波导幅度调制器实现脉冲精密整形,幅度调制器则是基于高速光强度调制器实现的。光强度调制器通常采用马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪型,通过外电场改变其两臂光程差来实现对输入信号的调制。如图1所示,信号光经一段光程后在第1个Y波导分支(3 dB耦合器)处被分成2个完全相等的分量,每个分量分别经过光波导支路的相位调制,在第2个Y波导处干涉叠加,输出强度调制信号。

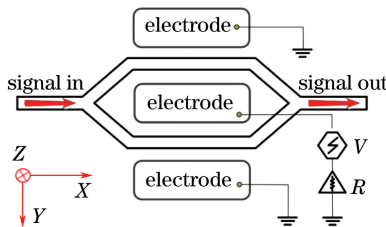


图1 电光波导光强度调制器示意图

Fig. 1 Schematic of electro-optic waveguide light intensity modulator

干涉叠加后输出的光强度调制信号可表示为  $I = I_0 \cos^2 \Delta\varphi$ , 其中,  $I_0$  表示初始光强,  $\Delta\varphi$  表示两支路的相位差,  $\Delta\varphi$  与加在电极上的电压  $V$  成正比, 即  $\Delta\varphi \propto V$ 。当  $\Delta\varphi = \pi/2$  时, 2分支光波干涉相消, 输出光强为0, 此时对应的电压称为半波电压  $V_\pi$ ; 当  $\Delta\varphi = 0$  或  $\pi$  时, 2分支光波干涉相长, 输出光强最大。

对于光强度调制器, 由于调制电压与输出光强之间有着严格的对应关系, 当在光强度调制器上施加一个沿时域变化的电脉冲时, 输出光强在时域上也将发生相对应的变化。因此, 通过光强度调制器精密控制输入的电脉冲形状, 就可以实现光信号的时域精密整形输出。由于光强度调制器的半波电压  $V_\pi$  较低, 因此只需注入数伏的电脉冲即可实现强度调制, 大大提高了光电器件的稳定性和可靠性。

### 2.2 脉冲工作体制幅度调制器设计

脉冲工作体制幅度调制器的结构如图2所示, 它由光学调制模块和电路驱动模块等2个部分构成。其中, 光学调制模块由980 nm激光二极管、980/1053 nm波分复用器(WDM)、LiNbO<sub>3</sub>光强度调制器、1:99分束器、1053 nm带通滤波器和光电探测器PIN管等组成, 电路驱动模块由射频(RF)驱动电路、自动偏置控

制电路、微处理器以及相应的电源伺服电路等构成。

输入的 1053 nm 脉冲光信号与 980 nm 激光二极管输出的固定功率线偏振光经过 980/1053 nm WDM 耦合后,进入 LiNbO<sub>3</sub> 光强度调制器,在外加电场的作用下,输出光波在时域上发生相对应的变化,形成激光整形脉冲。在光强度调制器的输出端,整形脉冲被分束器分路,其中第 1 个 1:99 分束器的小功率端口连接光电探测器 PIN 管,用于反馈光强度调制器的偏置电压调节效果;大功率端口输出光通过 1 个 1053 nm 带通滤波器滤除光路中的放大自发辐射(ASE)噪声后和 980 nm 分量用于主光路信号输出。主光路信号再经另一个 1:99 分束器输出,其中,99%端输出光信号,1%端用作光能量监控。在电路驱动模块中,RF 驱动器将高精度任意波形发生器(AWG)产生的低幅值、高对比度电脉冲进行无失真幅度放大后注入到光强度调制器的 RF 电极端口,调节 RF 放大倍数可以满足强度调制器不同半波电压的需要。

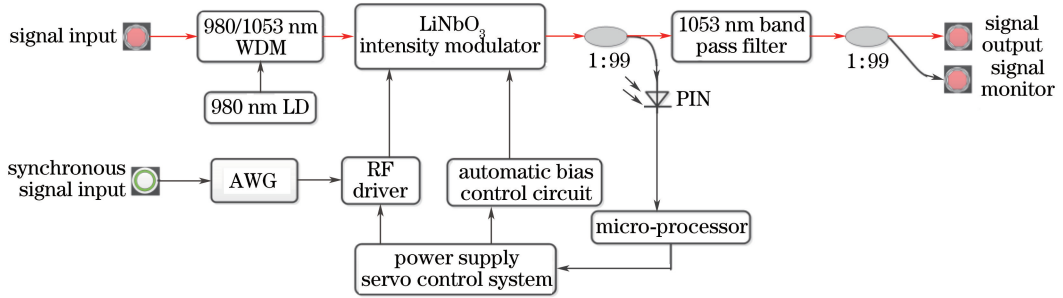


图 2 脉冲工作体制幅度调制器结构示意图

Fig. 2 Schematic of amplitude modulator operating in the pulse mode

由 2.1 节可知,光强度调制器输出激光的强度与输入电脉冲的相位相反,如图 3(a)所示,因此无法通过调节电脉冲形状的方法直观地对激光信号进行时域调制。为了便于系统集成调试,需要将输出激光的强度高与输入电脉冲的相位起伏相统一,此时在光强度调制器的第 1 对电极上施加半波偏置电压,光波导 2 支路在初始状态下干涉相消;然后再对第 2 对电极施加整形电脉冲信号,这样就可以直观地控制激光脉冲的形状,如图 3(b)所示。基于电光效应,通过精确控制高消光比光强度调制器的直流(DC)电压偏置点可以产生高对比度的精密整形激光脉冲,但是光强度调制器在长时间工作时,器件内部的静电电荷累积以及温度变化会导致偏置电压发生缓慢的定向漂移,如图 3(c)所示。在这种状态下,光强度调制器光波导 2 支路的初始相位差不再是  $\pi/2$ ,在相同幅度电脉冲信号的调制下,输出的平均光功率增加,光脉冲功率降低,从而影响输出脉冲的消光比和信噪比。

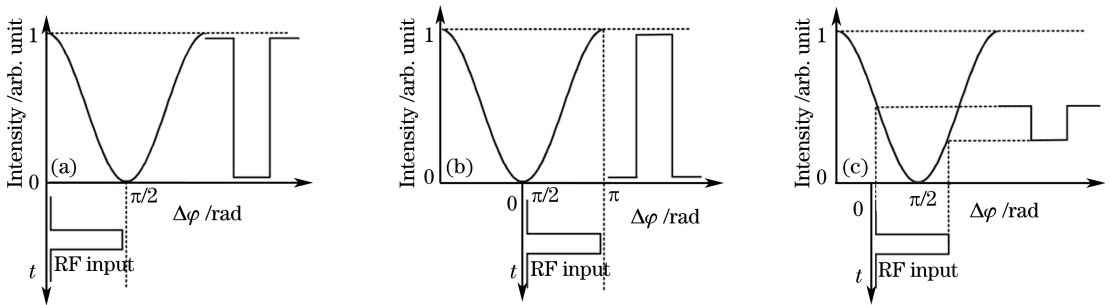


图 3 光强度调制器输出光强与输入电脉冲相位间的关系。(a)不施加直流偏置电压;(b)施加直流偏置电压;(c)直流偏置电压漂移

Fig. 3 Relationship between light intensity output of intensity modulator and electric pulse input.

(a) Without DC bias voltage; (b) with DC bias voltage; (c) DC bias voltage drifting

为了确保输出整形激光脉冲的高信噪比和高稳定性,这里采用光强度调制器直流偏置电压高稳定跟踪控制技术来进行偏置电压自动跟踪控制。在所设计的调制器中输入的 1053 nm 主激光信号为脉冲信号,而光强度调制器主要对输入的 980 nm 线偏振光进行调制,因此,消光比最高的时候,调制器的输出功率并不在最小值,而是在一个比最小值稍大的固定值,所以,需要将光强度调制器的偏置点控制在输出功率固定值。

在自动偏置控制电路设计中,需要对光强度调制器输出光功率循环读取以判断和控制其偏置电压。如

图 4 所示,光强度调制器的输出光经过分束器后,1%的光功率输出连接至光电探测器 PIN 管,用来反馈光强度调制器的偏置电压调节效果。由于光强度调制器设计于低重复频率纳秒级脉冲输出,其输出平均光功率变化可以反映偏置点的漂移特性。因此,电路中采用较低响应速率的光电探测器 PIN 管可以确保它仅反映输出光功率的时域平均值,从而使自动偏置控制电路仅对偏置点的变化产生响应。PIN 管可以将采样光信号转化为探测电流,探测电流需要通过电学放大、滤波处理后才能进入模数转换器(ADC)电路采样,这里采用利于 ADC 采样的对数放大器,可以直接将光电流转换为电压输出。微控制单元(MCU)采样 ADC 输出后,根据输出光功率的变化情况,按照一定的算法再经数模转换器(DAC)电路对偏置电压进行跟踪控制,以保证输出光功率的稳定。设计中所选取的 DAC 输出范围为 $\pm 10$  V,同时光强度调制器的直流半波电压为 5 V,因此 DAC 输出至少可以包含两个最佳工作偏置点,满足了使用需求。经过技术验证,所研制的幅度调制器具有频带宽、驱动电压低、稳定性好,以及不受电磁干扰的特点。该幅度调制器采用脉冲工作体制,不仅可以提高器件的消光比和信噪比,还可以对非连续波激光进行时域调制,大大拓展了幅度调制器的应用范围。

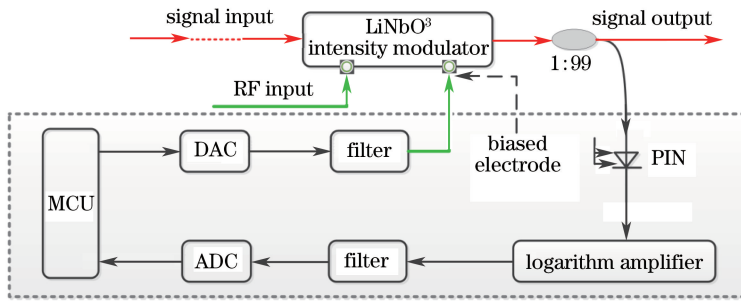


图 4 自动偏置控制电路原理图

Fig. 4 Schematic of automatic bias control circuit

### 3 实验装置

基于 MOPA 结构的全光纤激光脉冲产生实验装置如图 5 所示。实验中采用中心波长为 1053 nm、输出功率为 10 mW 的分布反馈(DFB)光纤激光器作为主振荡源。DFB 光纤激光器发射的单频长连续波激光信号经由稳偏器(PS)进行偏振态保持后,注入到掺镱光纤放大器(YFA)中作增益补偿和放大,然后经由波导相位调制器(PM)将单频长激光信号展宽为大于 0.30 nm 的小宽带连续波信号。在任意波形发生器通道 1 产生的初始整形电脉冲的驱动下,小宽带连续波激光信号经由第 1 级幅度调制器进行时域整形后获得初始整形激光脉冲。然后,初始整形激光脉冲沿激光传输链路由 3 级掺镱光纤放大器将脉冲能量提升至 50 nJ 左右。采用 3 级放大器进行脉冲能量提升是为了尽量降低整形激光脉冲在传输放大过程中的增益饱和效应,防止脉冲信号的波形畸变。掺镱光纤放大器之间连接声光调制器(AOM)是为了将建立于粒子数反转基础上的放大器产生的 ASE 噪声进行初步滤除。最后,在任意波形发生器通道 2 产生的二次整形电脉冲的驱动下,第 2 级幅度调制器对初始整形激光脉冲进行二次精密整形和时域噪声抑制,由此得到的精密整形激光

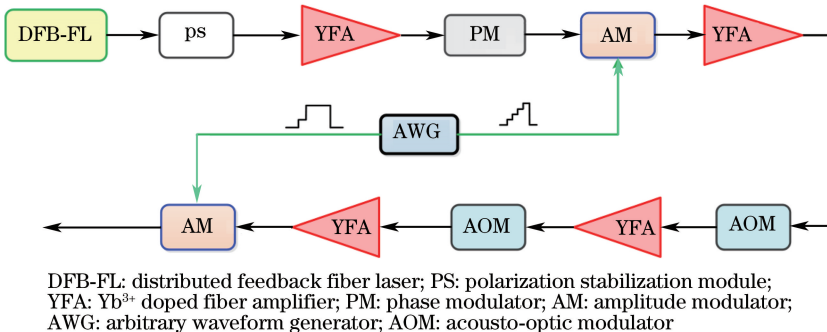


图 5 全光纤激光脉冲产生系统实验装置图

Fig. 5 Experimental setup of all-fiber laser pulse generation system

脉冲的输出能量可达 10 nJ。

实验装置中,各器件内部均采用保偏光纤熔接,各器件之间均采用单偏振跳线连接,因此该装置为全域偏振型,系统偏振消光比、能量稳定性得到了显著提高,幅频效应也得到了合理的抑制。该装置的创新之处在于采用高速电光调制技术并级联两级幅度调制器的方法来产生高对比度精密整形激光脉冲。因为幅度调制器具有响应速度快、消光比高、时间窗口可由电脉冲信号精密调控的特点,所以采用幅度调制器作为装置末级的二次整形削波器件可以将各级放大器产生的 ASE 噪声滤除干净,从而大大提高了装置输出脉冲的整形精度、对比度以及信噪比。

#### 4 实验结果与讨论

精密调控加载到两级幅度调制器上的电脉冲信号,利用实验装置可产生高精度的整形激光脉冲信号。在时域上精密调节电脉冲各点幅值可产生任意整形激光脉冲,图 6(a)~(c)分别为精密物理实验中典型的指数波形、多台阶形以及栅栏形整形激光脉冲。图 6(d)为利用该实验装置输出的时间间隔为 25.0 ns 的 5.0 ns 方波和 3.0 ns 指数波组合而成的双脉冲整形激光波形,先于 3.0 ns 指数波前 3.0 ns 处存在 1 个脉冲宽度为 86 ps 的预脉冲,该预脉冲为此装置输出的最小脉宽激光脉冲,其取决于幅度调制器的性能和电脉冲的最短持续时间,而最大脉冲宽度由各级声光调制器的最小时间窗口(50.0 ns)决定。由此可得,该实验装置具备输出脉冲宽度在“0.1~50.0 ns”范围内连续可调、脉冲横向分辨率优于 100 ps 的高精度任意整形激光脉冲的能力。

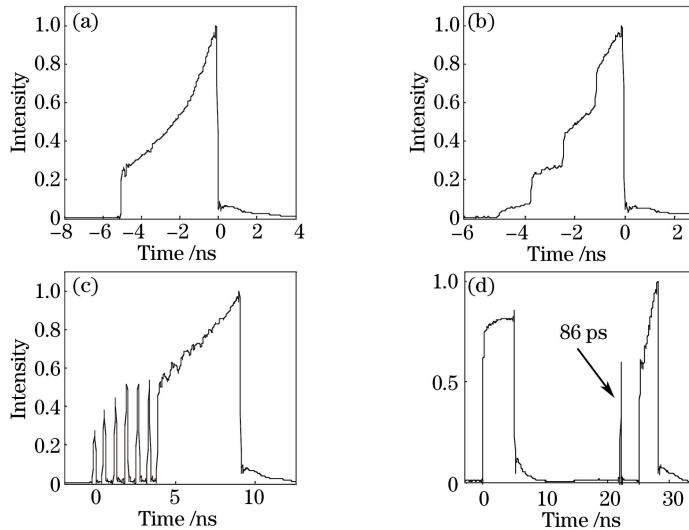


图 6 不同时间波形的激光整形脉冲输出。(a)指数波形;(b)多台阶形;(c)栅栏形;(d)双脉冲

Fig. 6 Output of laser shaped pulses with different time waveforms. (a) Exponent shape; (b) multi-step shape; (c) fence shape; (d) dual shape

实验装置中采用两级脉冲工作体制幅度调制,第 1 级幅度调制器用于对连续波激光信号进行精密脉冲整形,第 2 级幅度调制器对初始整形激光脉冲进行二次精密整形和时域噪声抑制,这样,一方面可以实现高对比度激光脉冲产生,另一方面可有效实现 ASE 噪声时域滤除。定义主激光脉冲与噪声光的强度比例为激光脉冲对比度。图 7 为实验中产生的高对比度激光整形脉冲,其中小图是其局部放大图。从图中可以看出,其脉冲对比度为  $(956 - 1.32) / (0.524 - 0.08) = 2150 > 2000$ 。可见脉冲对比度大于 2000:1,是现有技术的脉冲对比度(275:1)的数倍。该激光整形脉冲的信噪比为  $20\lg(V_s/V_n) = 20\lg[(986 - 1.32) / 0.08] = 82$  dB,远大于 NIF 装置的 50 dB,其中  $V_s$  和  $V_n$  分别代表信号和噪声电压幅度的有效值。

此前的幅度调制器只能工作在连续波激光注入模式下,应用范围较窄,不支持本文中激光脉冲产生实验装置构型。在高精度二次整形电脉冲信号的驱动下,仅仅在系统末级采用一级脉冲工作体制的幅度调制器即可滤除各级放大器产生的 ASE 噪声,实现高对比度、高信噪比和高整形精度的激光脉冲输出,满足驱动器装置激光脉冲产生系统较强脉冲控制能力的要求。

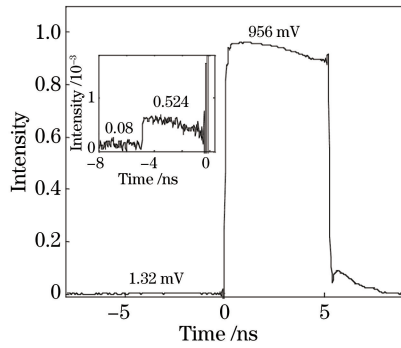


图 7 高对比度激光整形脉冲输出

Fig. 7 Output laser shaped pulses with high contrast ratio

## 5 结 论

通过研究激光时域精密整形的原理,提出了一种适应于脉冲工作体制的幅度调制器,主要特点是采用 980 nm 的激光作为参考光调控幅度调制器的偏置工作点,完成了脉冲工作体制幅度调制。基于高速电光调制技术并级联两级幅度调制器的方法,设计了 MOPA 型全光纤激光脉冲产生实验装置。利用该实验装置产生了指数字波形、多台阶形、栅栏形等任意波形,可编程,脉宽在“0.1~50.0 ns”范围内连续可调,脉冲对比度大于 2000:1,信噪比大于 80 dB 的高整形精度激光脉冲,满足了激光脉冲产生系统较强脉冲控制能力的要求,有效推动了新一代 ICF 驱动器的研制。

## 参 考 文 献

- [1] Nuckolls J O, Wood L O, Thiessen A L, *et al.* Laser compression of matter to super-high densities: thermonuclear (CTR) applications[J]. *Nature*, 1972, 239(5368): 139-142.
- [2] 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.
- [3] Zhang Fuling, Ouyang Xiaoping, Xie Xinglong, *et al.* Contrast measurement of ultrashort laser pulse with third order correlation technique[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(5): 1171-1174.  
张福领, 欧阳小平, 谢兴龙, 等. 超短激光脉冲对比度的三阶相关测量[J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1171-1174.
- [4] Hu Yun, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.* ASE suppression in the high power excimer laser MOPA system based on electro-optical switch[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0102008.  
胡云, 赵学庆, 薛全喜, 等. 基于电光开关的高功率准分子激光 MOPA 系统 ASE 抑制[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0102008.
- [5] Spaeth M L, Manes K R, Bowers M, *et al.* National ignition facility laser system performance[J]. *Fusion Science and Technology*, 2015, 69(1): 366-394.
- [6] Lawson J K, Speck D R, Bibeau C, *et al.* Temporal shaping of third-harmonic pulses on the Nova laser system[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(24): 5061-5068.
- [7] Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun, *et al.* Optical pulse shaping by chirped pulse stacking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(3): 466-470.  
林宏奂, 隋展, 王建军, 等. 啁啾脉冲堆积用于光脉冲整形[J]. *光学学报*, 2007, 27(3): 466-470.
- [8] Tian Xiaocheng, Zhang Kun, Zhu Na, *et al.* Research on linear chirped pulse generated by direct phase modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0302002.  
田小程, 张崑, 朱娜, 等. 直接相位调制产生线性啁啾脉冲特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0302002.
- [9] Qiao Z, Wang X C, Wei F, *et al.* Demonstration of a high-energy, narrow-bandwidth, and temporally shaped fiber regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4214-4217.
- [10] Wang Jiangfeng, Zhu Haidong, Li Xuechun, *et al.* Time-synchronization technique between shaped optical pulse and probe optical pulse[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(1): 31-34.  
王江峰, 朱海东, 李学春, 等. 整形激光脉冲与激光探针同步技术[J]. *中国激光*, 2008, 35(1): 31-34.
- [11] Lin Honghuan, Wang Jianjun, Sui Zhan, *et al.* Integrated all fiber optical pulse generation system for laser fusion

- driver[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(3): 1771-1777.
- 林宏奂, 王建军, 隋展, 等. 用于激光聚变驱动器的全光纤, 全固化光脉冲产生系统[J]. *物理学报*, 2008, 57(3): 1771-1777.
- [12] Gleyze J F, Hares J, Vidal S, *et al.* Recent advances in the front-end sources of the LMJ fusion laser[C]. SPIE, 2011, 7916: 79160I.
- [13] Hu D X, Dong J, Xu D P, *et al.* Generation and measurement of complex laser pulse shapes in the SG-III laser facility [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(4): 041406.
- [14] Brunton G, Erbert G, Browning D, *et al.* The shaping of a national ignition campaign pulsed waveform[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2012, 87(12): 1940-1944.
- [15] Moses E I. The national ignition campaign: status and progress[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53(10): 104020.
- [16] Batani D, Baton S, Casner A, *et al.* Physics issues for shock ignition[J]. International Atomic Energy Agency, 2014, 54(5): 054009.