

精密激光脉冲驱动系统设计与稳定性研究

唐群植,魏帅,贾炳文,李晓晖*,张新立,黎志刚,杨万里

(中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西桂林 541004)

摘要:为提高惯性约束聚变(ICF)实验中光纤激光系统的脉冲稳定性和整形精度,设计了一种基于低噪声电脉冲驱动电源的精密激光脉冲驱动系统。该系统通过集成纹波抑制电路和低压差线性稳压器(LDO),优化了电脉冲驱动电源的噪声抑制性能,并结合马赫-曾德尔调制器(MZM)实现高稳定性光脉冲输出。实验结果表明:优化后的驱动系统将电脉冲纹波幅度从 ± 20 mV降低至 ± 0.5 mV,光脉冲抖动显著减小;应用于高功率光纤激光系统后,输出脉冲能量的均方根(RMS)值由2.24%降至0.72%,稳定性提升67.8%。

关键词:电光调制器;脉冲驱动源;光纤激光系统;高稳定性

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)04-0087-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of a precision laser pulse drive system and stability study

TANG Qunzhi, WEI Shuai, JIA Bingwen, LI Xiaohui*, ZHANG Xinli, LI Zhigang, YANG Wanli

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: To enhance the pulse stability and shaping accuracy of fiber laser systems in inertial confinement fusion (ICF) experiments, a precision laser pulse drive system based on a low-noise electrical pulse drive power supply is designed. By integrating ripple suppression circuits and low-dropout linear regulators (LDO), the system optimizes the noise suppression performance of the electrical pulse drive power supply. Combined with a Mach-Zehnder modulator (MZM), it achieves highly stable optical pulse output. Experimental results demonstrate that the optimized drive system reduces the electrical pulse ripple amplitude from ± 20 mV to ± 0.5 mV, significantly decreasing optical pulse jitter. When applied to a high-power fiber laser system, the root mean square (RMS) of the output pulse energy decreases from 2.24% to 0.72%, improving stability by 67.8%.

Key words: electro-optic modulator, pulse drive source, fiber laser system, high stability

0 引言

惯性约束聚变(ICF)实验对高功率光纤激光系统的脉冲整形能力和能量稳定性提出了极高要求,以实现靶丸的精确压缩和高效打靶^[1-6]。激光脉冲的时

域精密整形是 ICF 激光装置中的关键环节,其性能直接影响聚变效率。理想的整形激光脉冲需满足以下要求^[7-8]:时域精密整形能力、快速上升沿、高对比度和高能量稳定性。目前,激光脉冲时域整形主要采用脉冲堆积技术^[9-11]和电光调制技术^[12]。脉冲堆积技术通过拼接多个短脉冲实现任意波形整形,因其超短脉冲同步能力、陡峭上升沿和灵活整形特性受到广泛关注,但该技术仍面临重复频率精确控制、脉宽稳定性及偏振稳定性等挑战。相比之下,电光调制技术基于马赫-曾德尔调制器(MZM),通过外加电场调控光程差实现光强调制,具有整形能力强、稳定性高及技术成熟等优势,已成为国内外高功率激光装置的首选方案^[13-15]。具体而言,该技术利用任意波形发生器(AWG)产生单元电脉

收稿日期:2025-04-20。

基金项目:国家自然科学基金项目(U2441250)资助;广西科技计划项目(桂科 AD25069017)资助;桂林市重点研发计划项目(20230110-2)资助。

作者简介:唐群植(1992—),男,本科,工程师,主要从事幅度调制器和声光调制器驱动电路设计相关工作,参与了多项国家级和地方级重大科技专项。

*** 通信作者:**李晓晖(1998—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为高能光纤激光系统及超快光纤激光器。



冲,通过调节电脉冲数量和电压值实现不同形状的光脉冲输出^[16]。近年来,基于铌酸锂(LiNbO₃)的MZM凭借低半波电压(5~6 V)和快速响应(响应时间小于150 ps)等特性,在ICF装置中广泛应用^[17-18]。然而,MZM易受温度变化影响,导致偏置点漂移,进而降低输出功率稳定性^[19-20]。针对这一问题,已有研究提出数字累加平均、动态平衡控制等智能控制技术,显著提升了调制器的输出稳定性和对比度,并成功应用于ICF装置^[17, 21-23]。尽管如此,实验观测表明,MZM输出的整形激光脉冲仍存在细微抖动,制约了激光脉冲的稳定性。

为此,本文提出一种基于低噪声电脉冲驱动电源的精密激光脉冲驱动系统,并对其稳定性进行测试。

1 精密激光脉冲驱动系统设计

1.1 激光脉冲产生及其驱动电源噪声抑制机理

激光脉冲主要通过MZM电光调制特性产生,其具体过程如下:首先由电脉冲驱动电源生成高精度电脉冲信号,该信号输入MZM后,利用电光效应调制产生光脉冲。因此,激光脉冲的稳定性直接取决于输入MZM的电脉冲信号质量。

电脉冲发生器主要分为3类结构:基于传输线放电脉冲式、基于电感储能放电脉冲式以及基于电容器放电脉冲式。其中,前2类结构传输线结构复杂、体积大且调节不灵活,而电感储能需要高压快速开关技术,易产生电压尖峰且能量释放难以控制。相比之下,电容器放电脉冲式结构简单紧凑、能量密度高、参数易调,通过成熟开关器件即可实现稳定高效的脉冲输出,在成本、可靠性和适应性上显著优于前两者。

然而,电容器放电式脉冲发生器受限于电容容量,难以完全消除电流波动导致的电压变化。电容充放电过程中产生的纹波电压与电容值成反比,其数学表达式为

$$\Delta V_{\text{out,c}} = \frac{\Delta I}{C_0 f} \quad (1)$$

其中, ΔI 为电流变化, C_0 为电容大小, f 为开关频率。当电容容量减小或开关频率降低时,纹波电压幅值增大,可能导致脉冲幅度出现周期性波动。纹波作为叠加在直流电压上的交流分量,可分为高频和低频成分,均会对脉冲信号波形产生干扰。高频纹波则可能导致脉冲上升沿或下降沿出现毛刺现象。低频纹波主要引起脉冲幅度波动,其表达式为

$$\Delta V_{\text{pulse}} = \frac{V_{\text{ripple}}}{2} \sin(2\pi f_{\text{ripple}} t) \quad (2)$$

其中, V_{ripple} 为纹波幅度, f_{ripple} 为纹波频率, t 为时间。

针对低频纹波抑制,可采用大容量电容与低压差线性稳压器(LDO)协同工作的方案。LDO作为电源管理集成电路,通过误差放大器实时比较输出电压与基准电压,动态调节功率管导通状态,有效抑制输入纹波对输出的影响。其电源抑制比直接决定了输出稳定性,该值越大表明纹波抑制能力越强。LDO的抑制机理在于利用负反馈回路,通过输出阻抗与功率管输出电阻的分压作用实现纹波衰减;低频段主要依靠负反馈机制,高频段则依赖电容的低阻抗特性。

基于上述理论分析,本文设计了一种低噪声高稳定性的电脉冲驱动电源系统,其原理图如图1所示。该系统以纹波特性优良的12 V电源模块为基础电源,通过分路设计形成3个独立供电支路。第一支路将12 V电源经纹波抑制电路及低压差线性稳压器处理后,输出11.7 V稳定电压,专用于射频放大器及部分偏置电压芯片供电;第二支路通过12 V转5 V电源芯片将12 V降至5.3 V,再经纹波抑制和稳压处理,为特定偏置电压芯片提供工作电压;第三支路采用电压反转技术生成-12.1 V电源,同样经过多重滤波和稳压处理,满足特殊偏置电压需求。为最大限度降低输出噪声,系统在所有偏置电压输出端均额外配置了纹波抑制电路,从而确保输出信号具有优异的稳定性。

1.2 精密激光脉冲驱动系统设计

本文基于图1设计了精密激光脉冲驱动系统,其

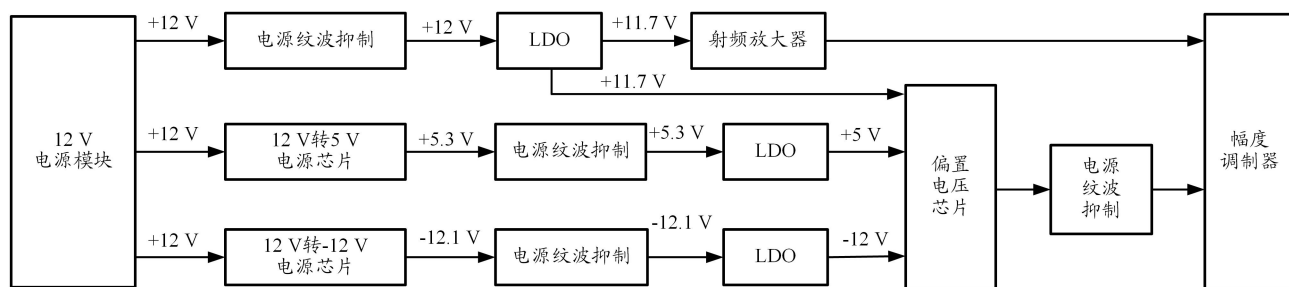


图1 低噪声高稳定电脉冲驱动电源原理图

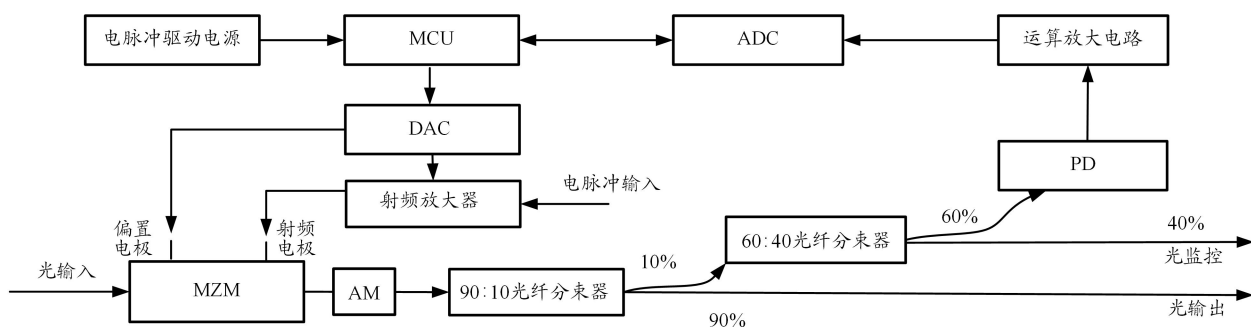


图2 精密激光脉冲驱动系统原理图

原理如图2所示。该系统主要由MZM驱动电路和光路组成。其中,MZM驱动电路包括电脉冲驱动电路、微控制器(MCU)、模/数转换芯片(ADC)、运算放大电路、光电探测器(PD)、数/模转换芯片(DAC)及射频放大器。

光路由可调衰减器(AM)、90:10 光纤分束器和 60:40 光纤分束器构成。

精密激光脉冲驱动系统的工作流程如下:

1)电脉冲驱动电源包含电源纹波抑制电路、12 V 电源模块、12 V 转 5 V 变换器和 12 V 转-12 V 变换器等电路和器件,为 MZM 提供稳定的工作电压和驱动能力。MCU 控制 ADC、DAC 芯片和射频放大器。

2)射频放大器对输入的电脉冲进行无失真的幅度放大。放大后的电脉冲被馈送到 MZM 的射频电极,通过调整注入电脉冲的形状,MZM 可以调制输出相应的光脉冲形状。射频放大器的增益可通过 DAC 输出来调节,以适应不同的射频半波电压需求。

3)MZM 输出的光脉冲经过 90:10 光纤分束器后,90%输出端作为主光路输出,而 10%输出端则进一步通过 60:40 光纤分束器。

4)在 60:40 光纤分束器中,40%的光信号用于监测目的,而 60%的光信号则连接到 PD。这些光信号经过 PD、运算放大电路和 ADC 芯片处理后输入到 MCU。MCU 采集的数据与前一次采样的平均值比较,并通过 DAC 输出偏置电压,从而实现对幅度调制器偏置电压的自动控制。

2 实验装置与结果分析

为验证所设计的精密激光脉冲驱动系统的可行性与性能,本文基于图2搭建了光纤激光系统实验平台,如图3所示。该平台由单纵模激光器、精密激光脉冲驱动系统、光纤放大器、声光调制器、AWG、射频放大器、示波器及能量计组成。单纵模激光器输出的 10 mW 连续光信号经光纤耦合至精密激光脉冲驱动系统,同

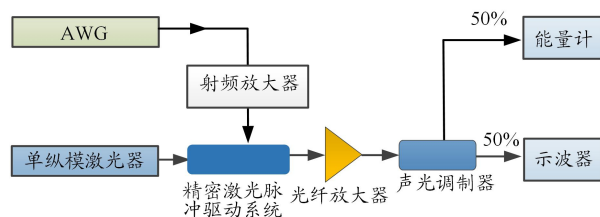


图3 光纤激光系统实验平台图

时由 AWG 生成的电脉冲信号经射频放大器后加载至该系统。通过电光调制作用,精密激光脉冲驱动系统输出的光信号在时域上发生相应变化,形成整形激光脉冲。该脉冲经光纤放大器放大后,由声光调制器滤除时域放大自发辐射噪声,最终输入至能量计和示波器进行脉冲特性表征。

2.1 脉冲波形调控能力验证

在图3所示的实验系统中,通过精确调控 AWG 加载至精密激光脉冲驱动系统的电脉冲幅值,成功在示波器上观测到 ICF 实验中常用的 3 种典型脉冲波形如图4所示。其中,5 ns 方波脉冲提供瞬时高功率平顶输出,三台阶阶梯脉冲实现多级能量精确调控,栅栏脉冲通过高频脉冲串优化能量耦合,共同满足 ICF 实验对快前沿、高稳定性和时序可控性的核心需求。实验结果证明,该精密激光脉冲驱动系统具备高精度的任意波形整形能力。

2.2 电脉冲纹波抑制效果分析

电脉冲输出纹波对比图如图5所示。从图5(a)可以看出,未采用纹波抑制电路时,电脉冲幅值波动范围为-20~20 mV;而图5(b)表明,采用纹波抑制电路后,幅值波动显著降低至 ± 0.5 mV 范围内,纹波幅度减少一个数量级。这一结果证实,所设计的纹波抑制电路有效提升了驱动电路的输出稳定性。

2.3 光脉冲抖动抑制性能评估

精密激光脉冲驱动系统输出光脉冲抖动对比图如图6所示。从图6(a)可以看出,未采用纹波抑制电路时,光脉冲顶部呈现较大的抖动;从图6(b)可以看

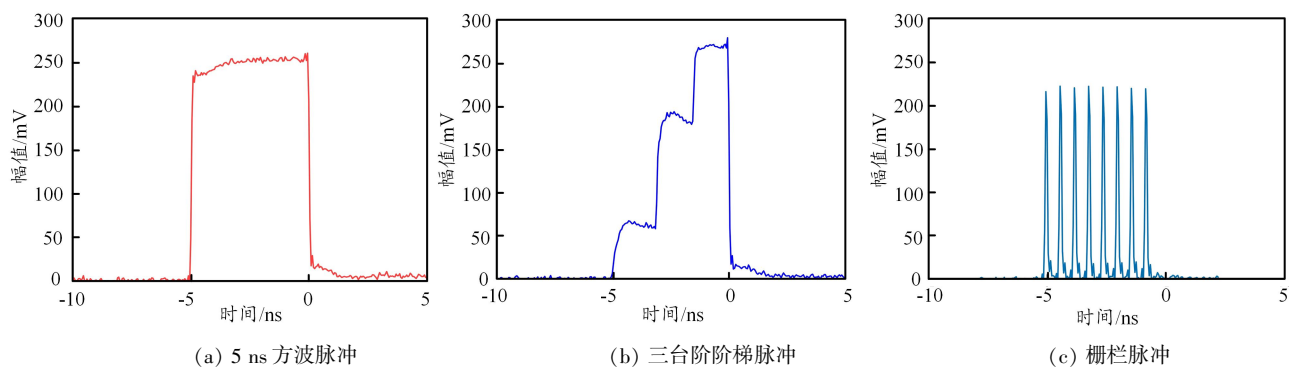
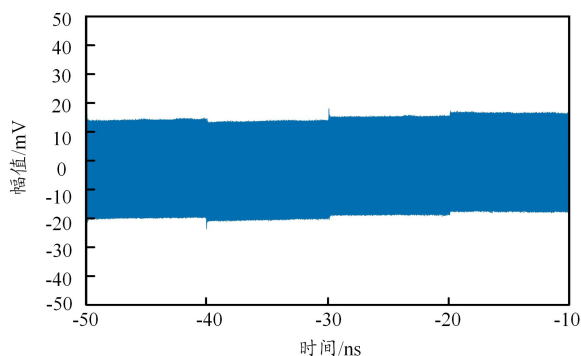
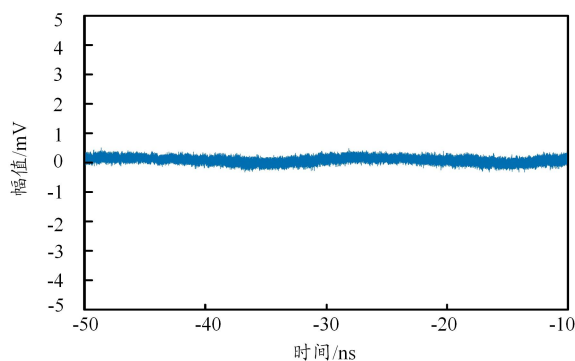


图4 3种典型脉冲波形



(a) 未采用纹波抑制电路



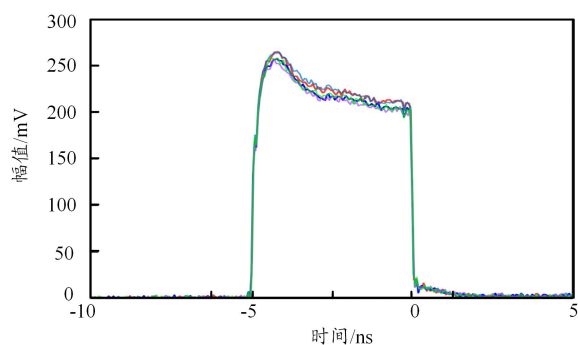
(b) 采用纹波抑制电路

图5 电脉冲输出纹波对比图

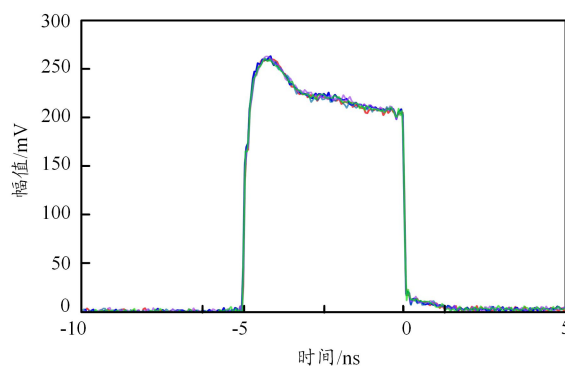
出,采用纹波抑制电路后,光脉冲顶部呈现较小波动,一致性较高。由此可见,采用纹波抑制电路后,输出光脉冲抖动得到有效抑制。

3 精密激光脉冲驱动系统在光纤激光系统的应用

为验证精密激光脉冲驱动系统对高功率光纤激光系统输出稳定性的提升效果,本文测试了系统改进前后末级输出激光脉冲能量的均方根(RMS)值。光纤激光系统连续工作1 h后,通过能量计客户端软件获取的激光脉冲能量稳定性波形如图7所示。从图7(a)可以看出,采用常规激光脉冲驱动系统时输出激光脉冲能量为0.9~1.1 nJ,折算成RMS值为2.24%;从图7(b)



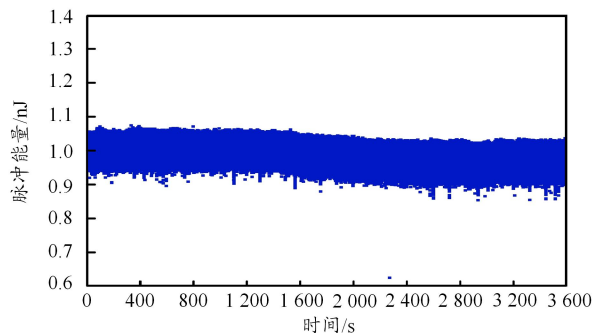
(a) 未采用纹波抑制电路



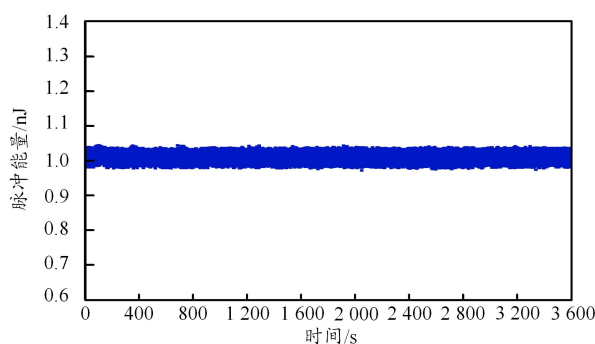
(b) 采用纹波抑制电路

图6 MZM输出光脉冲抖动对比图

可以看出,采用精密激光脉冲驱动系统后,光纤激光系统末级输出激光脉冲能量为1.0~1.05 nJ,折算成RMS值为0.72%。



(a) 常规激光脉冲驱动系统



(b) 精密激光脉冲驱动系统

图7 采用精密激光脉冲驱动系统前后输出激光脉冲能量稳定性对比图

实验结果表明,所提出的精密激光脉冲驱动系统使末级输出脉冲能量稳定性提升 67.8%,有效抑制了系统输出能量波动。该结果验证了精密驱动系统在提升光纤激光系统性能方面的显著效果。

4 结束语

本文通过在 MZM 驱动电路中集成纹波抑制电路和 LDO,成功研制出具有低噪声特性的精密激光脉冲驱动系统。实验结果表明,该系统能够实现高稳定性的光脉冲信号输出。在相同幅值电脉冲信号输入条件下,优化后的驱动电路使偏置电压纹波得到显著抑制,光脉冲信号稳定性获得明显提升。基于该驱动系统构建的高功率光纤激光系统测试显示,输出能量稳定性 RMS 值由 2.24% 降至 0.72%,系统稳定性提升幅度达 67.8%。该技术方案结构简洁、易于实现,为光纤激光系统稳定性提升提供了有效解决方案,在精密光电控制系统和高功率激光加工等领域具有重要的应用价值和推广前景。未来可进一步研究该驱动系统在不同功率等级和工作环境下的适应性表现。

参考文献:

[1] BETTI R, HURRICANE O A. Inertial-confinement fusion with lasers [J]. Nature Physics, 2016, 12(5): 435–448.
 [2] SPAETH M L, KENNETH R, MANE S, et al. National ignition facility laser system performance [J]. Fusion Science and Technology, 2015, 69(1): 366–394.
 [3] JOACHIM H, JEAN-FRANCOIS G, PERRIN A, et al. Industrial mJ-class all-fiber front end with spatially coherent top-hat beam output used as seeder for high power laser[Z]. High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology II. 2015: 1–8.

[4] ALAIN J, JEAN-FRANCOIS G, DENIS P, et al. Fiber lasers integration for LMJ [J]. Comptes Rendus Physique, 2006, 7(2): 198–212.
 [5] 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.
 [6] 林宏兔, 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(3): 1771–1777.
 [7] 宗兆玉, 许党朋, 李森, 等. 高精度整形激光脉冲产生技术研究[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 1–7.
 [8] 宗兆玉, 赵军普, 黄小霞, 等. 高稳定激光脉冲波形精密调控技术研究与应用[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(3): 1–7.
 [9] 刘必达, 黄智蒙, 张帆, 等. 光纤啁啾脉冲时域相干合成技术研究新进展[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(11): 5–20.
 [10] SUI Z, LIN H H, WANG J J, et al. A compact nanosecond-pulse shaping system based on pulse stacking in fibres [J]. 2006(8): 2074–2076.
 [11] LI F, JI F, LYU X J, et al. Shaping ability of all fiber coherent pulse stacker [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(6): 1120–1124.
 [12] 周丹丹, 许党朋, 田小程, 等. 时域-频域精密调控光纤激光脉冲产生系统 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 1–8.
 [13] DINICOLA J M, SURATWALA T, PELZ L, et al. Delivering laser performance conditions to enable fusion ignition, and beyond at the National Ignition Facility [J]. High Energy Density Physics, 2024, 52: 1–18.
 [14] YIN J H, LU L H, CUI Y W, et al. Functional gradient films on aluminum alloy with high absorption efficiencies and dMZM thresholds for inertial confinement fusion applications [J]. CeramZMics International, 2022, 48(13): 19180–19190.
 [15] GAO Y Q, CUI Y, JI L L, et al. Development of low-coherence high-power laser drivers for inertial confinement fusion [J]. Matter and Radiation at Ex-tremes, 2020, 5(6): 1–8.
 [16] GOWDA A, BUCKLEY B, DEVORE P, et al. High fidelity pulse shaping for the national ignition facility [EB/OL]. (2023–12–23)[2025–04–20]. <https://inspirehep.net/literature/2754428>.
 [17] 杨文奎, 翁巧儿. LiTaO₃ 光幅度调制器在脉冲调制中的应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2003(2): 28–29.
 [18] 王建军, 许党朋, 林宏兔, 等. 基于时分复用技术的甚多束光脉冲产生系统[J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8725–8732.
 [19] 陈海波, 余卫龙. 电光调制器的温度特性及其最优化设计[J]. 光学学报, 2004(10): 1353–1357.
 [20] 林凯燕, 许健, 王红成, 等. 单轴晶体电光调制器的温度特性[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1051–1055.
 [21] 赵灏, 刘芳, 欧阳竑, 等. 基于 P89C669 的幅度调制器自动偏置控制器设计[J]. 光通信技术, 2012, 36(7): 15–17.
 [22] 宗兆玉, 许党朋, 田小程, 等. 高精度整形激光脉冲产生技术研究[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 237–243.
 [23] 宗兆玉, 赵军普, 李森, 等. 高稳定激光脉冲波形精密调控技术研究与应用 [J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(3): 59–65.