

用于激光聚变驱动器的全光纤、 全固化光脉冲产生系统*

林宏奂^{1)†} 王建军¹⁾ 隋 展¹⁾ 李明中¹⁾ 陈光辉²⁾ 丁 磊¹⁾
唐 军¹⁾ 邓青华¹⁾ 罗亦鸣¹⁾ 董一方¹⁾ 李 峰³⁾

1) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) 中电集团第 23 研究所, 上海 200437)

3) 中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

(2007 年 4 月 15 日收到 2007 年 7 月 5 日收到修改稿)

报道一种全固化、全光纤的用于高功率激光驱动的惯性约束聚变驱动器的光脉冲产生系统, 采用单纵模振荡器输出连续激光信号, 经过相位调制器和振幅调制器, 得到一个时间波形上已整形且具有一定带宽(约 0.1 nm)的激光脉冲, 经光纤放大器放大并经光纤分束器分束后同时输出四路激光脉冲, 各路激光脉冲先通过时间同步调整单元精确控制时间同步关系后, 经可编程光纤衰减器调节各路之间的功率平衡后再通过光纤放大器做进一步放大并通过 150 m 光纤传输输出至预放系统, 该光纤系统可输出 0.3—20 ns、带宽 0.1 nm、能量数纳焦的几乎任意整形的激光脉冲, 并已作为神光 III 原型激光装置的前端系统成功发射近 260 余万发次. 该系统结构紧凑, 具有很高的稳定性和可靠性.

关键词: 激光聚变驱动器, 前端, 光纤激光系统

PACC: 5250J, 4260, 4255N

1. 引 言

光脉冲产生系统(前端系统)作为高功率激光驱动的惯性约束聚变驱动器的“种子光源”, 是驱动器最核心的系统之一, 其主要功能是为后续系统提供数路已初步整形, 并具有一定能量(纳焦耳量级)、带宽、高信噪比和高光束质量的激光脉冲, 它的性能参数决定了整个驱动器的多项关键参数^[1-3].

在 1995 年之前, 各国开发的激光聚变驱动器光脉冲产生系统大都采用传统的桌面光路型的固体激光器系统. 这种系统需要非常稳定和复杂的机械结构并且要求苛刻的环境条件, 以保证其稳定性和可靠性^[4-9]. 随着激光聚变驱动器的发展, 到 1995 年之后, 新开发的激光聚变驱动器的输出激光束数都非常多, 技术要求也十分复杂和苛刻. 为了适应新的需求, 结合光纤光波导技术和器件的发展, 美国国家点火装置(NIF)的原型样机(BEAMLET), 采用了

先进的全光纤、全固化系统方案^[10].

本文报道一种全固化、全光纤的光脉冲产生系统, 采用光纤激光器作为光脉冲产生系统的主光源, 利用波导调制器对激光脉冲的时间和光谱特性进行可编程的调整, 再用光纤分束器阵列进行分束, 掺铒光纤放大器阵列进行放大, 获得适当的输出能量. 由于采用了全光纤光波导的全固化技术路线, 这种新型前端系统具有技术先进、功能全、指标高、可编程控制、分束可靠、光纤传输灵活稳定、系统稳定可靠、体积小、对环境无特殊要求等优点. 该系统自 2003 年底开始作为神光 III 原型激光装置的前端系统, 已成功发射 260 余万发次, 是继 NIF 后, 世界第二个实现工程化稳定运行的全固化、全光纤前端系统.

2. 系统结构及原理

光纤前端系统的结构如图 1 所示. 光纤单纵模振荡器输出连续激光经相位调制器调制产生具有梳

* 国家高技术研究发展计划(863)重点项目基金资助的课题.

† E-mail: Happylin2003@yeah.net

状光谱特征的连续激光,该连续激光输入铌酸锂波导幅度调制器调制产生 20 ns 的方波激光脉冲信号后输入后一级铌酸锂幅度波导幅度调制器削波产生 1—10 ns 任意整形脉冲.加在幅度调制器上的 20 ns 方波脉冲电信号和 1—10 ns 任意整形脉冲电信号由任意波形发生器产生.整形的光脉冲经过光纤放大器后,分束为 4 路,每路激光脉冲分别经过光纤延迟线、光纤放大器和可变光衰减器后,再经过约 150 m

传输光纤传输至预放系统.通过调节光纤延迟线和可变光衰减器可实现路间时间同步调节功能和 4 路功率平衡调节功能.光纤前端系统每个单元均可通过标准 RS-422 串行通信接口以光传输方式与远端计算机连接.仅用一台计算机便可对现场光纤系统各单元的工作情况进行远程控制、调整、测试、显示、告警和保护.

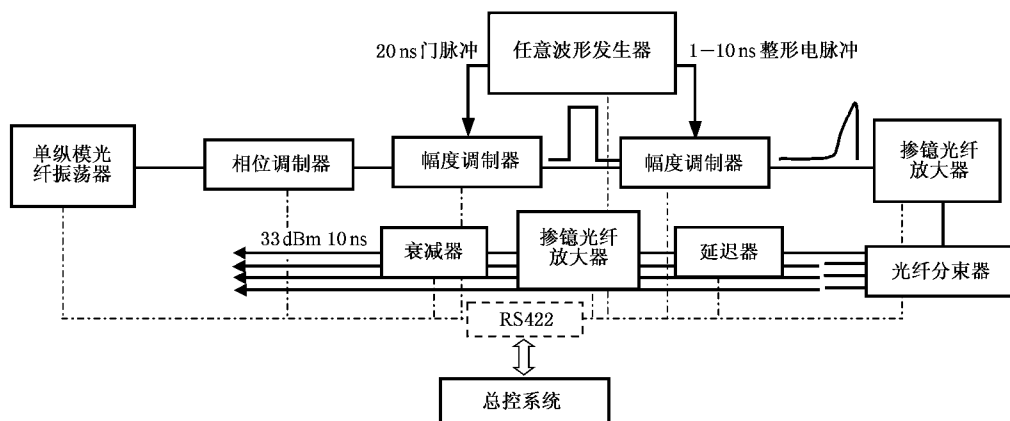


图 1 光纤前端系统结构

2.1. 单纵模激光的产生

光纤振荡器采用光纤环形腔的设计(如图 2 所示),为保证腔内激光的单向行波腔功能,采用光纤隔离器、光耦合器作激光输出及窄带滤波反射器的入射和反射光路.利用窄带反射光纤光栅(带宽 0.05 nm,HR@1053.11 nm)进行线宽限制,在光栅前增加一段掺铌光纤作为吸收介质来实现稳频^[11]从而实现稳定的单纵模激光输出.为实现激光器中心波长的稳定输出,光栅工作于 25℃ ± 0.1℃ 的温控盒中,通过温度的主动控制提高光栅输出波长的稳定性.光栅的中心波长漂移(3 个月内)小于 0.01 nm.通过调节光栅的温度,可实现激光器中心波长

的连续调谐输出(1052.912—1053.317 nm).25℃ 时振荡器输出激光中心波长为 1053.116 nm,用扫描 F-P 测得的光谱线宽为 40 MHz.由于环形腔长度为 4 m,纵模间隔约为 53 MHz,因此激光器输出为单纵模.采用分辨率 6 pm 的光谱仪测得的光谱如图 2(b)所示,3 dB 带宽已为光谱仪的测量极限.光纤振荡器输出光功率的(3 个月内)变化率最大为 3.44% (P-V 值),光纤振荡器(3 个月内)输出光波长的变化量最大为 0.015 nm.

2.2. 频谱展宽

相位调制器结构如图 3 所示,当正弦微波信号输入铌酸锂相位调制器后,其折射率满足

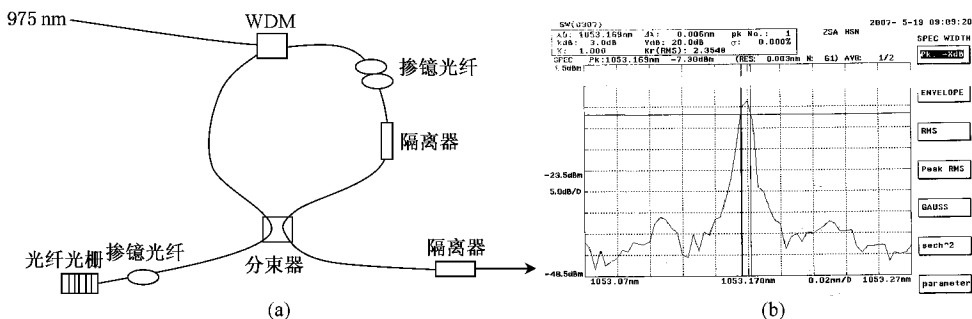


图 2 光纤振荡器结构

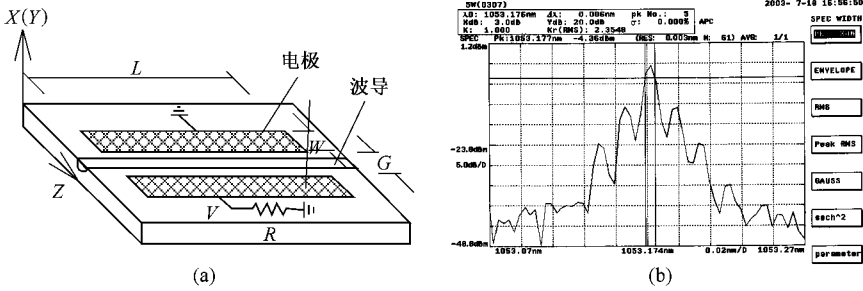


图 3 相位调制器结构(a)及调制产生的梳状光谱(b)

$$n = n_e + n_m \cos(\omega_m t + \phi_m),$$

$$n_m = -\frac{n_e^3 \gamma}{2} \frac{dV}{dz}, \quad (1)$$

式中 n_e 为未加微波信号时的折射率, γ 为电光系数, $\frac{dV}{dz}$ 为调制微波信号的电场振幅, ϕ_m 为附加相位, ω_m 为微波信号的频率. 所以光场的角频率 $\alpha(t)$ 为

$$\alpha(t) = \frac{2\pi c}{\lambda} n$$

$$= \frac{2\pi c}{\lambda} n_e + \frac{2\pi c}{\lambda} n_m \cos(\omega_m t + \phi_m)$$

$$= \omega_0 + \frac{2\pi c}{\lambda} n_m \cos(\omega_m t + \phi_m), \quad (2)$$

故光场信号为

$$E(t) = A \exp\left[i \int_0^t \alpha(t) \lambda dt\right]$$

$$= A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) \cos[(\omega_0 + n\omega_m)t + n\phi_m] \quad (3)$$

式中 A 为光场振幅, $J_n(\beta)$ 为 n 阶贝塞尔函数, $\beta = 2\pi c n_m / \lambda \omega_m$ 为调制深度. 可见, 利用正弦波进行调制可获得 $\omega = \omega_0 \pm n\omega_m$ 的边带分量, 即获得的激光信号具有宽的频谱. 连续单纵模激光经过频谱展宽之后, 可以获得边频分量, 从而减少或消除打靶过程中所产生的布里渊散射和提供光谱色散以平滑靶室的聚焦点^[12, 13]. 目前系统相位调制器插入损耗小于 4 dB, 调制频率 4.3 GHz, 可产生 0.1 nm 的调制带宽.

2.3. 幅度调制

激光脉冲进入幅度调制器(结构如图 4 所示)后, 在注入口被分成振幅相等的两束, 通过给调制器的偏置电极加直流电压, 使两束光的相位发生相对改变, 然后在输出口进行叠加. 假定入射激光场分布为布为 $E(t) = A \cos \omega_0 t$, 在注入口有

$$E_1(t) = E_2(t) = \frac{A}{2} \cos(\omega_0 t), \quad (4)$$

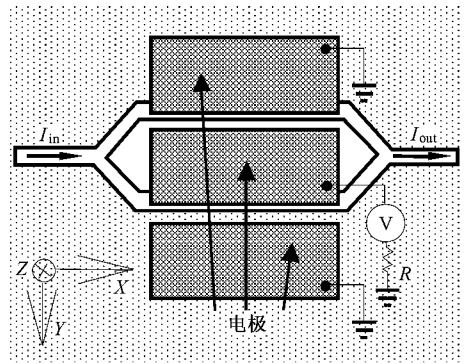


图 4 幅度调制器结构

则在调制器的输出口激光场为

$$E'_1(t) = \frac{A}{2} \cos(\omega_0 t + \phi),$$

$$E'_2(t) = \frac{A}{2} \cos\left(\omega_0 t + \phi + \frac{V}{V_{\lambda/2}}\right), \quad (5)$$

式中 ϕ 为光场经过调制器后所引入的相位, V 为调制器上所加的偏置电压, $V_{\lambda/2}$ 为调制器的半波电压, 也就是相位变化为 π 时所加的直流偏置电压. 于是从调制器输出的瞬时光强为

$$I(t) = |E'_1 + E'_2|^2$$

$$= A^2 \cos^2\left(2\omega_0 t + \frac{V}{V_{\lambda/2}}\right) \cos^2\left(\frac{V}{V_{\lambda/2}}\right), \quad (6)$$

在不考虑与时间的快变项时, 得到瞬时光强为

$$I = I_0 \cos^2(V/V_{\lambda/2}). \quad (7)$$

从上式可知, 通过改变调制器的偏置电压, 可以控制输出激光的强度, 也就是说只要在调制器上加一个形状合适的偏置电脉冲, 就可以获得形状符合要求的激光脉冲. 系统幅度调制器的消光比大于 30 dB, 插入损耗小于 6 dB, 脉冲前沿可达 150 ps.

2.4. 高速任意形状电脉冲的产生

波导调制器输出的整形激光脉冲的形状和宽度主要取决于输入调制器的任意整形电脉冲的形状和

宽度.利用 GaAs 场效应管的电压控制电流和开关的两个特性可以实现电脉冲的任意整形,原理如图 5 所示.300 ps 的快脉冲通过触发脉冲传输线加在 GaAs 场效应管的栅极,GaAs 场效应管被触发后产生相同的快脉冲并在传输线产生两个相反方向传播的快脉冲.左行快脉冲被终端负载吸收,右行脉冲形成堆积的基元脉冲.单个基元脉冲的幅度由加在栅

极的电压 V_1, V_2, \dots, V_n 调节,这样通过设计相邻 GaAs 场效应管间触发脉冲传输线的时间延迟及调整单个 GaAs 场效应管的偏置电压,在传输线可形成任意形状的堆积电脉冲.电脉冲的长度取决于 GaAs 场效应管的个数和传输线的长度,前后沿取决于触发脉冲的前后沿,整形精度取决于触发脉冲的宽度^[14].

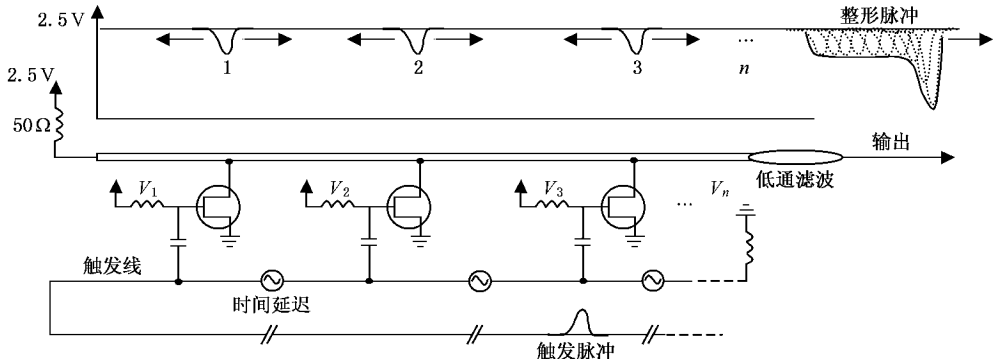


图 5 高速任意形状电脉冲的产生

系统的任意波形发生器时域调节精度优于 300 ps,输出电脉冲幅度的稳定性小于 1%(RMS),输出脉冲宽度为 0.3 ns—20 ns,脉冲前后沿小于 150 ps,可提供 2 路独立可调的整形电脉冲.

2.5. 高增益低噪声的光纤放大器

幅度调制器输出的脉冲激光信号需要通过后续的放大器进行放大至数 W 才能被预放系统的高增益放大器放大^[15].由于后续系统要求前端输出脉冲有高的信噪比,因此低噪声高增益的光纤放大器是系统的关键单元之一.

高增益低噪声的光纤放大器如图 6(a)所示.通过优化放大器长度,采用高掺镱光纤(300 dB/m@975 nm,芯径 5 μm,长度 2 m)作为放大介质,大大缩短了光纤长度,从而进一步降低了 ASE.放大后的光

经过带通反射式滤波器,仅能通过中心波长 $\lambda_c \pm \Delta\lambda$ 波长范围内的光,从而限制了噪声水平,提高了放大器输出的信噪比.考虑到系统输出脉冲经过相位调制器带宽宽至 0.1 nm,为避免放大的过程中由于增益窄化及多级放大器中心波长不匹配使脉冲调制边带的丢失造成脉冲的畸变^[6],带通反射式滤波器采用带宽为 0.4 nm 的光纤光栅.另外,放大器采用了双程放大的结构,可以在增加增益的同时抑制噪声,实验结果如图 6(b)所示.系统中放大器的抽运功率为 65 mW,小信号增益达 26 dB,噪声系数优于 5 dB,增益稳定性(脉冲放大)小于 1%(RMS).

2.6. 偏振控制

系统由于采用相位调制器和幅度调制器相当于起偏器,其偏振相关损耗为 15 dB,因此,相位调制

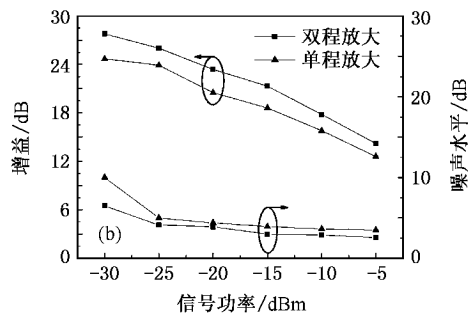
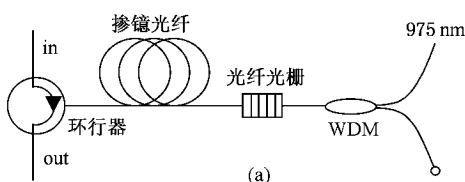


图 6 高增益低噪声的光纤放大器

器、两级幅度调制器前光纤的偏振态发生改变,系统输出脉冲的幅度将改变,从而影响系统的输出稳定性,如图 7(b)所示。

偏振控制可以采用将各偏振敏感器件间用保偏光纤并辅以偏振控制器从而实现偏振匹配稳定,但这种方法成本高,光纤系统需要全面改造,并且由于保偏光纤中不同波长信号具有不同的双折射拍长,激光信号经相位调制后产生的光谱边带经过很长保偏光纤传输后偏振态不同,再经过后续系统的起偏器件后光脉冲中各光谱边带的幅度不同,将造成光脉冲时间波形畸变。针对系统窄光谱、短脉冲的特点,我们提出一种稳定光纤前端系统输出偏振态的新方法:注意这样一个特点,即光纤前端系统的脉冲是通过连续单纵模激光器调制产生的,脉冲激光与连续激光经过相同的光纤传输,因此两者具有相同的偏振态,即使光纤状态由于外界环境变化而改变后,两者偏振态的改变也是相同的。所以,如果检测连续激光的偏振态,发现其变化后通过改变光纤的

应力将连续激光的偏振态纠正到外界环境变化前的状态,也相当于对脉冲激光进行了稳偏。通过光纤偏振稳定装置在线检测相位调制器和幅度调制器泄漏 CW 激光的偏振态进行自动调整,实现了光纤前端系统偏振态的自动稳偏。如图 7(a),输入连续激光经过起偏器起偏后经 95:5 分束器取样输入光电转换器转换成直流电信号。动态偏振控制器内置反馈电路检测该直流信号,当光纤偏振状态发生改变后,直流信号幅度降低,反馈电路控制偏振控制器对光纤施加应力,改变光纤的偏振,使检测的直流信号保持最大,从而动态稳定光纤的偏振态。稳偏器插入损耗约 1 dB,输出尾纤很短(约 10 cm),偏振不受环境变化影响。采用稳偏器后,对输入两级幅度调制器和相位调制器前的光纤施加应力模拟运行环境改变造成的光纤偏振态的改变,光纤前端的输出幅度不发生变化,如图 7(c)所示,波形为脉冲多次累积的结果,可见光纤偏振态的变化已经不影响光纤前端输出的稳定性。

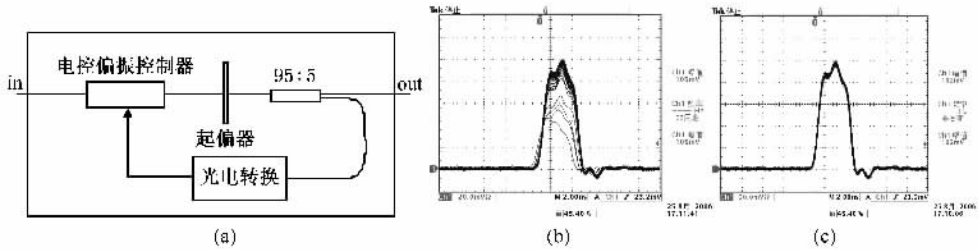


图 7 稳偏器的工作原理(a)及稳偏前(b)后(c)的系统输出

3. 系统输出

系统于 2003 年底开始应用于国家高技术项目——神光 III 原型激光装置,作为神光 III 原型装置的前端系统,该系统具有如表 1 所示的输出能力。

系统输出的典型激光脉冲如图 8 所示。

应用于神光 III 原型装置的光脉冲产生系统的总体技术路线与 NIF 系统类似,不同之处在于神光 III 原型装置主振荡器采用的是环形单纵模光纤激光器,而 NIF 采用了 DFB 激光器;光纤放大器 NIF 采用的是双泵两级串连放大,神光 III 原型装置采用的是窄带光栅加双程放大的单泵放大技术;另外神光 III 原型装置光脉冲产生系统采用普通单模光纤加主动偏振控制的方式输出,而 NIF 采用单偏振光纤输出^[10]。对比两者的输出能力,如表 2 所示。

表 1 全固化、全光纤系统的输出能力

激光束数	4			
输出波长/nm	1053.176			
输出功率/W	第一路	第二路	第三路	第四路
	5.12	5.80	4.03	5.19
重复频率/Hz	1, 10, 1000 均可工作			
脉冲波形	主脉冲宽度 1 ns—20 ns(具有强的整形能力)			
单束稳定性 (RMS)%	第一路	第二路	第三路	第四路
	1.02	0.93	1.43	1.72
信噪比(时间 dB)	第一路	第二路	第三路	第四路
	46.8	47.6	47.2	46.7
束间时间同步控制	具有束间时间同步调节功能			
束间功率平衡控制	具有 4 路功率平衡调节功能			

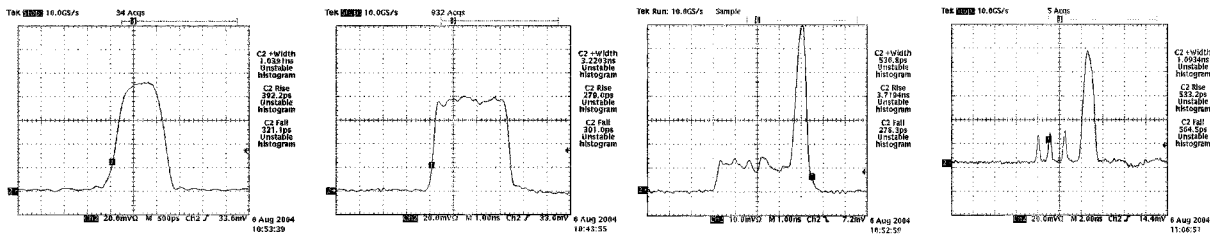


图 8 系统输出的几种典型激光脉冲

表 2 神光 III 原型装置光脉冲产生系统与 NIF 光脉冲产生系统输出指标比较

比较项目	NIF 光脉冲产生系统	神光 III 原型装置光脉冲产生系统
工作波长/nm	1053.00	1053.00
波长稳定性/pm	< ± 1.5	± 7.5
输出功率	100mW@PAM	> 4W
能量分散度/RMS	5.5%	1.72%
重复频率/Hz	960	1—1000
预脉冲消光比	未测量	46 dB
脉冲形状	整形脉冲	整形脉冲
脉冲长度/ns	4	0.3—5
波形对比度	未测量	50:1
相位调制	0.3 nm@3 GHz	0.1 nm@4.3 GHz

由表可见神光 III 原型装置光脉冲产生系统输出指标与 NIF 光脉冲产生系统的输出指标相当。

4. 结 论

成功研制了一种全固化、全光纤的光脉冲产生系统,该系统具有功能全、指标高、可编程控制、分束可靠、灵活稳定、系统稳定可靠、体积小、对环境无特殊要求的特点,应用于高功率激光驱动的惯性约束聚变驱动器。

[1] Nuckolls J , Wood L , Hiessen A T 1972 *Nature* . **239** 139

[2] Chuang Y H , Kessler T J , Skupsky S 1993 *SPIE* **1870** 34

[3] Deng X M , Yu W Y 1981 *IEEE J. Q. E.* **11** 1628

[4] Speck D R , Bliss E S , Glaze J A 1981 *IEEE J. Q. E.* **17** 1599

[5] Wilcox R B , Behrendt W , Browning D F 1993 *SPIE* **1870** 53

[6] Soures J , Kumpan S , Hoose J 1974 *Appl. Opt.* **13** 2081

[7] Mourou G , Bunkenberg J , Seka W 1980 *Opt. Commun.* **34** 252

[8] Bunkenberg J , Boles J , Brown D C 1981 *IEEE J. Q. E.* **17** 1620

[9] Xu F M , Cheng S H , Cheng L R , Lu Q R , Xu S Z , Fan D Y , Deng X M , 1996 *Acta Optica Sinica* **16** 943 (in Chinese) [许发明、陈绍和、陈兰荣、逮其荣、许世忠、范滇元、邓锡铭 1996 光学学报 **16** 943]

[10] Wilcox R B , Browning D F 1995 *LLNL Report* 115

[11] Chen B , Fan W , Li X C , Liang L P , Cheng L R , Cheng S H , Lin Z Q 2002 *Chinese Journal of Lasers* **29** 583 (in Chinese) [陈 柏、范 薇、李学春、梁丽萍、陈兰荣、陈绍和、林尊琪 2002 中国激光 **29** 583]

[12] Skupsky S , Short R W , Kessler T , Craxton R S , Letzring S , Soures J M 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3456

[13] Rothenberg J E 1995 *SPIE* **2633** 634

[14] Scott C. Burkhart , Russell B. Wilcox , Donald F. Browning , and Frank A. Penko 1997 *Proc. of SPIE* **3047** 610

[15] Luo Y M , Li M Z , Tang J , Wang J J , Fu X J , Jia W , Deng Q H , 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17**(S0)45 (in Chinese) [罗亦鸣、李明中、唐 军、王建军、傅学军、贾 伟、邓清华 2005 强激光与粒子束 **17**(S0)45]

[16] Li F , Wang J J , Ji F , Gu C , Zheng H , Gao K , Sui Z , Li M Z , Xu L X , Ming H 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1818 (in Chinese) [李 锋、王建军、纪 帆、顾 春、郑 欢、高 昆、隋 展、李明中、许立新、明 海 2006 强激光与粒子束 **18** 1818]

Integrated all fiber optical pulse generation system for laser fusion driver^{*}

Lin Hong-Huan^{1)†} Wang Jian-Jun¹⁾ Sui Zhan¹⁾ Li Ming-Zhong¹⁾ Chen Guang-Hui²⁾
Ding Lei¹⁾ Tang Jun¹⁾ Deng Qing-Hua¹⁾ Luo Yi-Ming¹⁾ Dong Yi-Fang¹⁾ Li Feng³⁾

1) *Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China*

2) *China Electronics Technology Group Corporation No. 23th Research Institute, Shanghai 200437, China*

3) *Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

(Received 15 April 2007 ; revised manuscript received 5 July 2007)

Abstract

We demonstrate an integrated all fiber optical pulse generation system for laser fusion driver. CW laser signal generated from a single longitudinal fiber oscillator was modulated by phase modulator and amplitude modulator to form an optical pulse with shaped waveform and bandwidth of 0.1 nm. The pulse was amplified and split by fiber multiplexer to four pulses. Time delay of each pulse was controlled by synchronization unit and power of each pulse was adjusted by programmable variable optical attenuator. The four pulses were amplified and then transmitted through a 150 m fiber to the pre-amplify system. The fiber system can generate almost arbitrarily shaped optical pulse with duration of 0.2—20 ns, bandwidth of 0.1 nm and power of several nJ. As the front-end of the SG-III prototype facility, it has successfully lunched about 2.6 million shots of pulses. The fiber system is compact and highly stable and reliable.

Keywords : laser fusion driver, front-end, fiber laser system

PACC : 5250J, 4260, 4255N

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China.

[†] E-mail : Happylin2003@yeah.net