

# 基于时分复用技术的甚多束光脉冲产生系统\*

王建军<sup>1)2)</sup> 许党朋<sup>2)†</sup> 林宏奂<sup>2)</sup> 张 锐<sup>2)</sup> 邓 颖<sup>2)</sup> 李明中<sup>2)</sup> 周寿桓<sup>1)</sup>

1)(四川大学电子信息学院,成都 610064)

2)(中国工程物理研究院激光聚变研究中心,绵阳 621900)

(2009 年 12 月 24 日收到;2010 年 5 月 25 日收到修改稿)

提出了一种基于时分复用技术的全光纤、全固化的用于惯性约束聚变驱动器的甚多路光脉冲产生系统. 系统中采用单纵模振荡器输出连续激光信号,利用时分复用技术结合高速电光调制技术实现序列脉冲的产生和甚多束脉冲的独立整形. 采用偏振无关的声光调制技术实现甚多束脉冲的独立输出. 每个序列脉冲包含 8 个子脉冲,子脉冲间隔设置为 120 ns,对子脉冲独立整形和选单后将其传输放大至微焦耳量级输出. 实验成功验证了采用时分复用技术完全可以实现序列脉冲输出,各子脉冲可以独立任意整形且最后的单束输出能量为 1.275  $\mu\text{J}$ .

**关键词:** 激光聚变驱动器, 光脉冲产生系统, 时分复用

**PACC:** 5250J, 4260

## 1. 引 言

光脉冲产生系统(前端系统)作为高功率惯性约束激光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甚多路已初步整形并具有一定能量、带宽、高信噪比和高光束质量的激光脉冲,它的性能决定了整个驱动器的多项关键参数. 激光驱动器不但要求前端系统能够输出任意整形光脉冲,同时还要求束间具有良好的波形一致性,从而实现束间功率平衡. 另外,还要求前端系统输出光脉冲具有一定的带宽以抑制后级主放大系统大口径光学元件的横向受激布里渊散射以及为靶面焦斑束匀滑提供条件<sup>[1-3]</sup>.

高功率激光聚变驱动器前端系统的开发大体上可以分为两个阶段. 在 1995 年之前,各国开发的聚变驱动器前端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<sup>[4-8]</sup>. 随着激光聚变驱动器的发展和光纤光波导技术的进步,1995 年之后开发的激光聚变驱动器的输出激光束数都非常多(一般多于 60 束),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,从美国国

家点火装置(NIF)原型样机的研发开始,新的高功率激光聚变驱动器前端系统大都采用了先进的全光纤光波导的全固化系统方案<sup>[9]</sup>.

为了实现甚多路光脉冲产生系统具有各路独立整形的能力,美国 NIF 在前端系统末级输出采用每路设置一个精密时间整形单元来实现<sup>[10,11]</sup>,法国激光兆焦耳(LMJ)装置也采用了相同的技术路线<sup>[12]</sup>. 这两套装置均要求每路配置一个波导幅度调制器及任意波形发生器,这大大增加了系统的造价.

本文提出一种基于时分复用技术的全固化、全光纤的用于惯性约束聚变驱动器的甚多路光脉冲产生系统. 采用单纵模光纤激光器作为光脉冲产生系统的主光源,采用高速电光调制技术实现光脉冲任意时间整形,利用高精度任意波形发生器产生任意整形序列脉冲输出,该序列脉冲包含 8 个子脉冲,序列脉冲间隔设置为 120 ns,8 个子脉冲可以实现独立任意整形调整,然后经选单器选单作为各束的独立输出,最后经放大、分束、传输、光谱展宽实现八束输出. 由于采用了基于时分复用技术的全光纤光波导的全固化技术路线,这种新型前端系统具有性价比高、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、任意扩展输出束数以及对环境无特殊要求等优点. 该系统已经完成工程样机的研制,是国内外首

\* 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金(批准号:9140C6803010905)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xudangpeng@yahoo.com.cn

次采用电光调制结合时分复用技术实现甚多束光脉冲产生的全固化、全光纤前端系统。

## 2. 系统结构及原理

基于时分复用技术的前端系统结构如图 1 所示. 利用波长为 1053 nm 的分布式反馈光纤激光器产生系统所需要的单纵模连续激光信号, 经  $1 \times N$  分束器将输入连续激光信号根据需要分为  $N$  组, 再经光纤放大器将功率提升至 10 mW 左右. 经连续波稳偏器后注入波导幅度调制器实现由 8 个子脉冲构成的序列脉冲输出. 序列脉冲由高精度任意波形发

生器产生并作用在波导幅度调制器上, 序列脉冲间隔设置为 120 ns, 8 个子脉冲可以实现独立任意整形调整. 然后采用一分八分束器将每组序列脉冲信号分成八路输出, 一分八分束器相邻两路光程差设置为 120 ns. 经声光调制器进行选单, 第一路选第一个脉冲, 第二路选第二个脉冲, 依次进行选单, 第八路选第八个脉冲, 从而实现八路脉冲独立整形. 最后分别通过可编程光纤延迟线、光纤放大器、低重复频率脉冲稳偏器及功率光纤放大器, 最终实现具有一定带宽的任意整形甚多束光脉冲输出. 为了兼顾系统的功能扩充, 系统结构上采用光开关实现超短脉冲与单纵模激光信号进行切换选择.

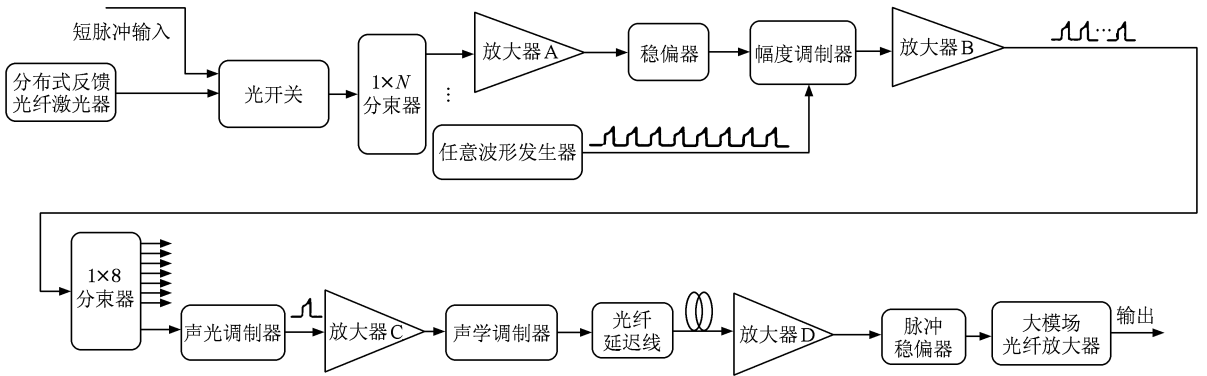


图 1 基于时分复用技术的甚多束光脉冲产生系统结构示意图

### 2.1. 序列光脉冲产生技术

时分复用技术在通信中被广泛采用, 如同步数字体系、异步传递模式等都是利用了时分复用技术, 电话就是其中最经典的应用例子. 所谓时分复用就是采用同一物理连接的不同时段来传输不同的信号, 从而实现多路传输的目的. 借用电信通讯的成熟技术, 将所需要的任意整形光脉冲在时间上进行有次序的排列, 共形成含 8 个子脉冲的序列脉冲 (也可以根据需要设置更多的脉冲), 脉冲间隔根据声光调制器的响应时间来确定, 一般需要大于 100 ns 的间隔, 而产生序列的电脉冲由高精度的任意波形发生器来完成.

激光脉冲进入幅度调制器 (图 2) 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  $E(t) = A \cos \omega_0 t$ , 在注入口有

$$E_1(t) = E_2(t) = \frac{A}{2} \cos(\omega_0 t), \quad (1)$$

则在调制器的输出口激光场为

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

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

式中  $\phi$  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  $\pi$  时所加的直流偏置电压. 于是, 从调制器输出的瞬时光强为

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

$$= A^2 \cos^2\left(2\omega_0 t + \frac{V}{V_{\lambda/2}}\right) \cos^2\left(\frac{V}{V_{\lambda/2}}\right). \quad (3)$$

在不考虑时间的快变项时, 得到瞬时光强为

$$I = I_0 \cos^2(V/V_{\lambda/2}). \quad (4)$$

从 (4) 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, 这说明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, 脉冲上升时间可达 100 ps. 图 3 为可编程产生的 8 个完全一致的子脉冲组成的光脉

冲序列. 图 4 为对图 3 序列脉冲中各子脉冲进行放大后一致的时间波形.

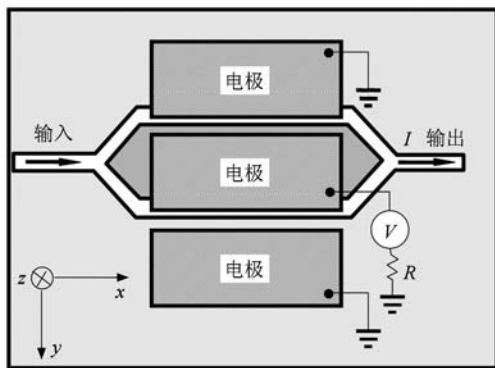


图 2 幅度调制器结构示意图

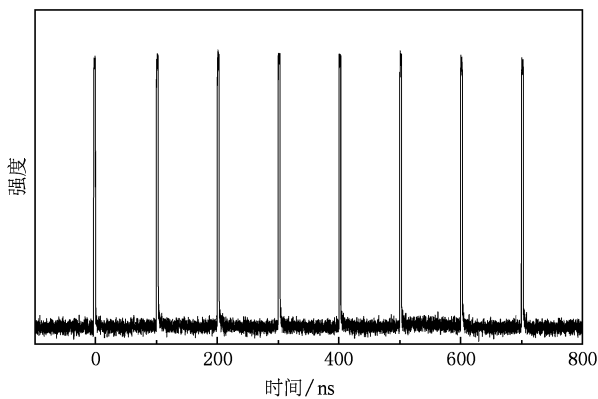


图 3 可编程产生的序列光脉冲

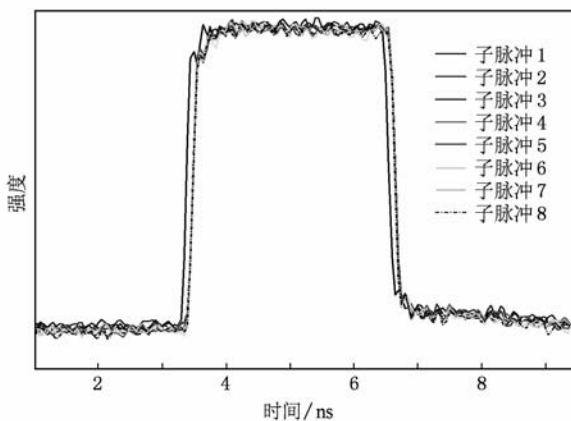


图 4 序列脉冲的子脉冲时间波形

### 2.2.1 $1 \times 8$ 光纤分束器的设计

为了实现甚多路输出, 系统设计中采用  $1 \times 8$  光纤分束器将一束序列脉冲分成八束, 并且相邻每束

信号之间的延时差设置为  $120 \text{ ns}$  以补偿 8 个子脉冲的延时差, 达到在下一级选单器后每个脉冲同步输出的目的, 如图 5(a) 所示. 设计中采用  $1 \times 2$  分束器和  $1 \times 4$  分束器级联并用光纤延迟的方案实现, 如图 5(b) 所示.

### 2.3. 选单器的设计

传统设计中一般采用波导幅度调制器作为选单的理想器件, 它具有响应时间快、消光比高等优点, 同时具有开门时间短的特点. 因此, 对于序列脉冲中子脉冲间隔小于  $20 \text{ ns}$  的序列脉冲基本上采用幅度调制器进行选单. 然而幅度调制器由于是偏振相关器件, 这就要求注入信号的偏振态非常稳定. 为了获得稳定的偏振输出, 需要在幅度调制器前增加带反馈控制的稳偏器以提高输出稳定性, 这无疑会导致系统更加复杂以及建造成本的增加. 根据序列脉冲的特点, 设计中选择声光调制器作为选单器件, 既保证了高的消光比(不低于  $50 \text{ dB}$ ), 又具有插入损耗小(小于  $3 \text{ dB}$ )、偏振无关(小于  $0.1 \text{ dB}$ )的优点, 从而实现系统简洁化设计.

声光调制是利用声光效应将信息加载于光频载波上的一种物理过程, 调制信号是以电信号形式作用于电-声换能器上, 电-声换能器将相应的电信号转化为变化的超声场, 当光波通过声光介质时, 由于声光作用使光载波受到调制而成为“携带”信息的强度调制波. 使用数字射频驱动器及外控同步信号可以快速开关激光束, 声光调制原理如图 6 所示.

### 2.4. 系统偏振控制技术

光纤系统偏振控制有以下两种方法: 一种方法是全系统采用保偏光纤, 光纤系统各级偏振态均稳定不变; 另一种方法是全系统采用单模光纤传输, 在偏振敏感的器件前进行主动偏振控制. 前一种方法的建造成本较高, 且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<sup>[13,14]</sup>. 后一种方法需要开发适应脉冲工作的稳偏器才能确保系统输出的稳定性.

针对光纤系统输出脉冲宽度短( $1\text{--}10 \text{ ns}$ )、重

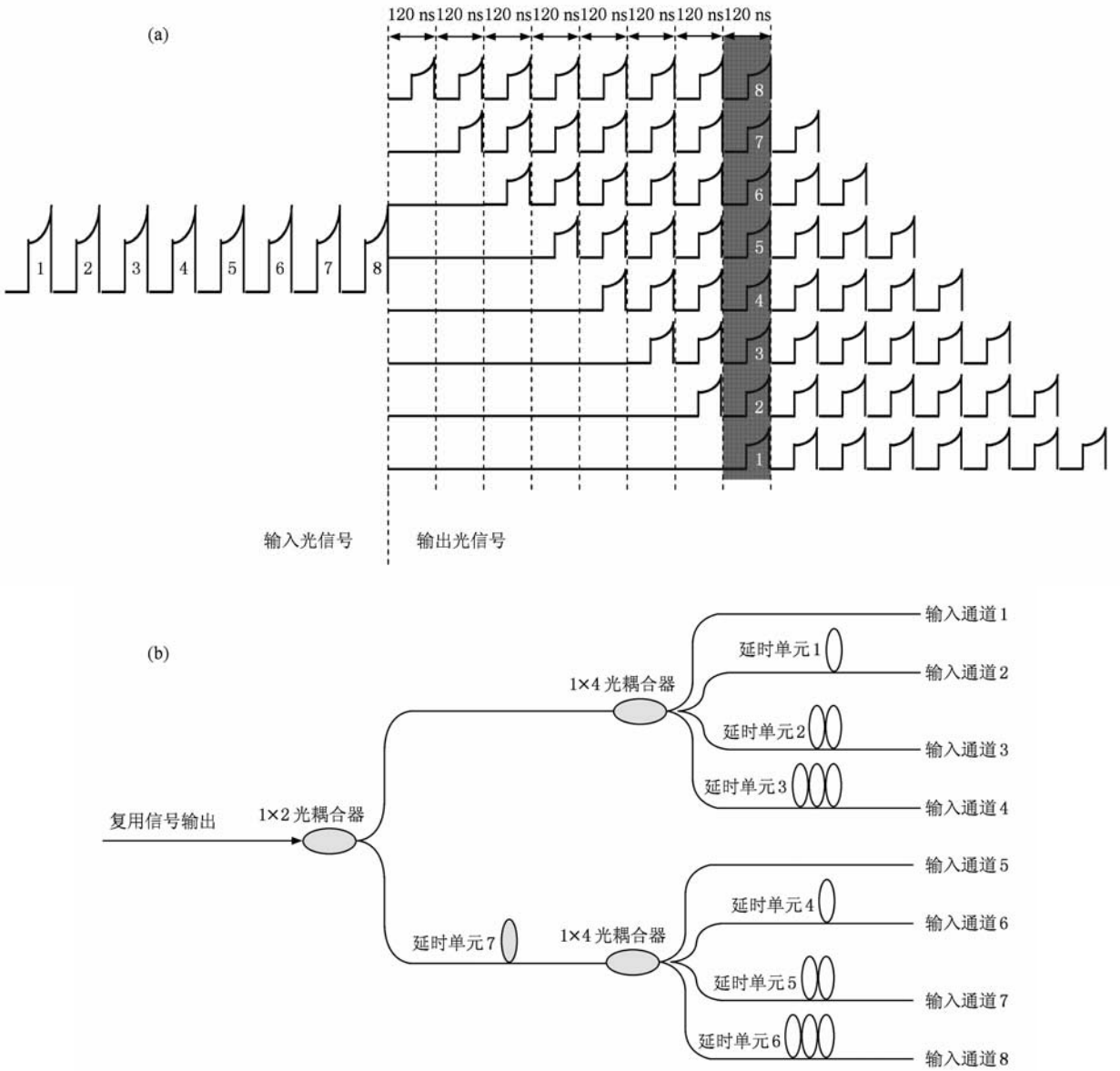


图5 1×8 光纤分束器延时及光路图 (a)1×8 光纤分束器延时示意图,(b)延时光路图

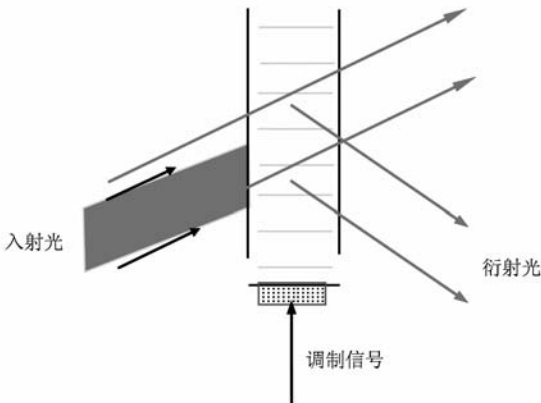


图6 声光调制器布拉格型调制原理

复频率低(1 Hz—1 kHz)的特点开发完成了适用于较低重复频率(大于 100 Hz)的脉冲稳偏器. 脉冲稳偏器的工作原理如图 7(a)所示,输入脉冲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,再通过跨导型的峰值采样保持电路对该信号进行采集与保持,动态偏振控制器内置反馈电路检测该信号. 当光纤偏振状态发生改变后,峰值保持信号幅度降低,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,使检测的峰值保持信号保持最大,从而动态稳定光纤的偏振态. 稳偏器插入损耗约为 1 dB,输出尾纤为保偏光纤,偏振不受环境变化的影响.

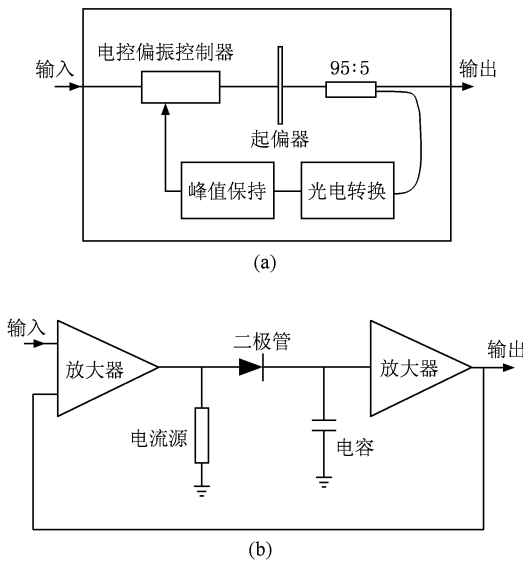


图7 脉冲稳偏器工作原理示意图及跨导型峰值保持电路图  
(a) 稳偏器工作原理示意图, (b) 跨导型峰值保持电路图

采用跨导型的峰值采样保持电路避免了传统的电压型峰值保持电路积分非线性大、动态范围小(小幅度响应差)、通频带小等缺点,同时跨导型峰值保持电路还具有过冲电流小的优点. 跨导型峰值保持电路如图 7(b) 所示, 其中电流源为跨导放大器提供静态回路. 对于该电路, 有

$$V_p = \int_0^{t_0+t_1} (g(V_i(t) - V_o(t))/C) dt, \quad (5)$$

式中  $V_p$  为峰值电压,  $g$  为跨导放大器的跨导系数, 一般为  $10^{-2}$  s,  $V_i$  为输入电压,  $V_o$  为输出电压. 当电容器上的电压  $V_c$  达到峰值时, 电流已趋于零, 所以基本无过冲. 另外, 跨导型运算放大器的第一转折频率容易做得很高, 所以整个电路的通频带较高, 且稳定性好, 适于处理快信号.

针对不同脉冲宽度的脉冲稳偏效果进行了考核测试, 当脉冲宽度大于 1 ns 的情况下稳偏效果非

常明显, 脉冲宽度越宽稳偏效果越好, 验证结果如表 1 所列. 对于 1 ns 及更短脉冲宽度信号, 根据信号的强弱对跨导型峰值采样保持电路的参数进行优化同样也能够达到满意的稳偏效果.

表 1 低重复频率脉冲稳偏器的验证结果

脉冲宽度/ns	稳定性的峰值值/%	功率稳定度均方根值/%
3.0	6.95	1.05
2.0	6.56	1.16
1.5	14.10	1.54
1.0	无法统计	无法统计

### 3. 联机实验结果

按照图 1 所示的总体光路结构搭建了单束的验证系统, 验证系统如图 8 所示. 图 8 中幅度调制器输出为含 8 个子脉冲的序列脉冲, 首先经第一级放大器放大后经设置的第一级声光调制器进行选单, 再经放大、传输、脉冲稳偏后注入功率光纤放大器将输

表 2 单路验证系统设计指标与测试指标对比

指标名称	设计指标	测试结果
激光波长/nm	1053.5 ± 0.5	1052.981
重复频率/Hz	1—1000	1—1000
脉冲上升时间/ps	≤100	<100
脉冲宽度/ns	1.0—10.0	1.0—10.0
整形能力	具有较强的独立整形能力	每束脉冲独立精密整形
脉冲对比度	优于 80:1	凹型脉冲对比度优于 100:1
脉冲信噪比/dB	≥45	47
脉冲能量/μJ	≥1.0	1.275
束间同步精度/ps	≤2.0	0.22
功率稳定度的均方根值	≤2.0%	1.38%

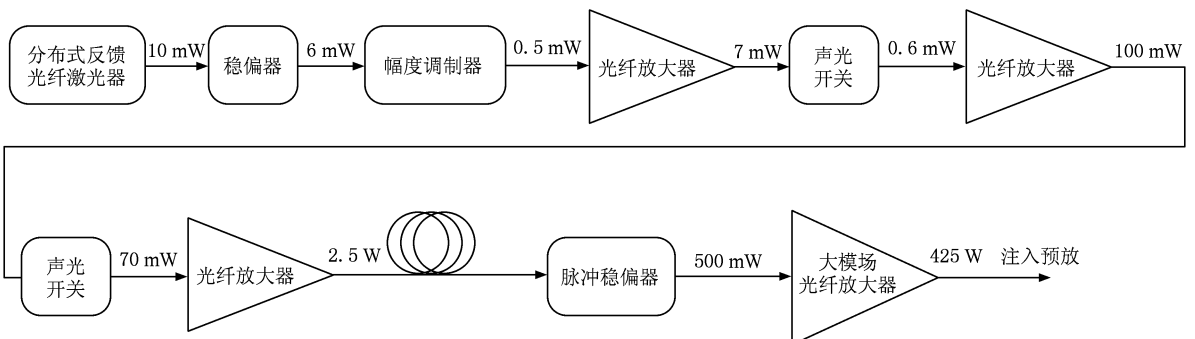


图 8 验证系统光路图

输出功率提升至微焦耳级输出,验证系统输出综合性能指标如表 2 所列. 与 NIF 光脉冲产生系统的输出指标进行了比较,NIF 光脉冲产生系统的输出脉冲能量约为 1 nJ,功率稳定度的均方根值小于 5.5%<sup>[15]</sup>,而基于时分复用技术光脉冲产生系统的输出能量与功

率稳定度均优于 NIF,其余指标与 NIF 相当.

为了验证时分复用技术的序列脉冲特性,实验编制了 8 个完全一致的子脉冲,幅度调制器输出的具体结果如图 3 和图 4 所示. 同时编制了 8 个完全不一样的子脉冲,输出时间波形如图 9 所示. 从图 4

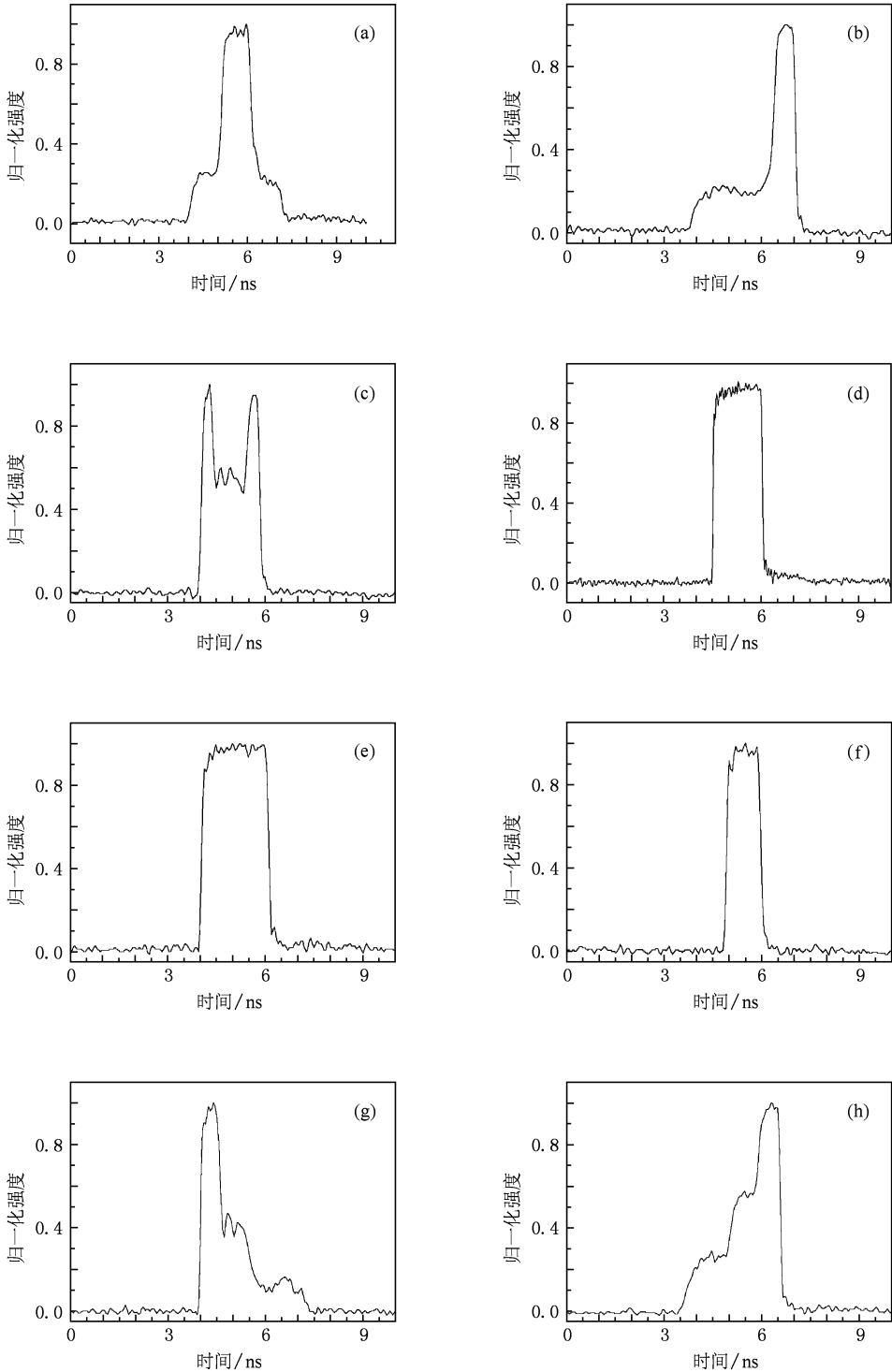


图 9 具有独立整形能力的序列脉冲 (a)第 1 个子脉冲,(b)第 2 个子脉冲,(c)第 3 个子脉冲,(d)第 4 个子脉冲,(e)第 5 个子脉冲,(f)第 6 个子脉冲,(g)第 7 个子脉冲,(h)第 8 个子脉冲

和图 9 可以看出, 根据需要可以使八路输出时间波形完全一致也可以完全不同, 具有极强的脉冲输出灵活性. 这可以为物理实验提供灵活多样的激光信号.

#### 4. 结 论

利用时分复用、高速电光调制、偏振无关声光调制脉冲选单、低重复频率脉冲稳偏等技术成功研制了一种全固化、全光纤的光脉冲产生系统. 利用上述单元技术所开发的系统具有以下一些特点: 将

通信常用的时分复用技术应用到高功率激光系统中, 在兼顾功率平衡要求的情况下大大提高了系统建造的性价比; 具备各束独立整形的能力, 有利于功率平衡; 具备单纵模脉冲或宽带脉冲输出的能力; 系统大量采用单模光纤利于系统集成, 同时采用低重复频率脉冲稳偏技术大大提高了系统输出的稳定性; 系统输出束数具备任意扩展的能力. 该技术已经成功地应用于我国“神光-III”激光装置上, 因此在具有甚多束需求的高功率固体激光驱动器光脉冲产生系统的设计中具有一定的应用参考价值.

- 
- [1] Nuckolls J, Wood L, Hiessen A T 1972 *Nature* **239** 139
- [2] Chuang Y H, Kessler T J, Skupsky S 1993 *Proc. SPIE* **1870** 34
- [3] Deng X M, Yu W Y 1981 *IEEE J. Quantum Electron.* **17** 1650
- [4] Speck D R, Bliss E S, Glaze J A 1981 *IEEE J. Quantum Electron.* **17** 1599
- [5] Wilcox R B, Behrendt W, Browning D F 1993 *Proc. SPIE* **1870** 53
- [6] Soures J, Kumpan S, Hoose J 1974 *Appl. Opt.* **13** 2081
- [7] Mourou G, Bunkenburg J, Seka W 1980 *Opt. Commun.* **34** 252
- [8] Bunkenburg J, Boles J, Brown D C 1981 *IEEE J. Quantum Electron.* **17** 1620
- [9] Wilcox R B, Browning D F 1995 *Report of Livermore National Laboratory* (Livermore: Livermore National Laboratory) p115
- [10] 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** 3281
- [11] Wisoff P J, Bowers M W, Erbert G V, Browning D F, Jedlovec D R 2004 *Proc. SPIE* **5341** 146
- [12] Jolly A, Gleyze J F, Luce J, Coic H, Deschaseaux G 2003 *Opt. Eng.* **42** 1431
- [13] Lin H H, Wang J J, Sui Z, Li M Z, Chen G H, Ding L, Tang J, Deng Q H, Luo Y M, Dong Y F, Li F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1771 (in Chinese) [林宏奂、王建军、隋展、李明中、陈光辉、丁磊、唐军、邓青华、罗亦明、董一方、李峰 2008 物理学报 **57** 1771]
- [14] 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]
- [15] John T H 1999 *Report of Livermore National Laboratory* (Livermore: Livermore National Laboratory)

# Multibeam optical pulse generation system based on time division multiplexing<sup>\*</sup>

Wang Jian-Jun<sup>1)2)</sup> Xu Dang-Peng<sup>2)†</sup> Lin Hong-Huan<sup>2)</sup> Zhang Rui<sup>2)</sup>

Deng Ying<sup>2)</sup> Li Ming-Zhong<sup>2)</sup> Zhou Shou-Huan<sup>1)</sup>

1) (*School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

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

(Received 24 December 2009 ; revised manuscript received 25 May 2010)

## Abstract

By time division multiplexing (TDM) technique, an all-solid-state all-fiber multibeam optical pulse generation system used for an inertial confinement fusion driver is developed. The continuous wave signal is provided by a single longitudinal mode oscillator. The TDM technique and the high speed electro-optic modulation technique are utilized to realize the train pulse and arbitrary pulse-shaping. The polarization independent acoustooptic modulation technique is adopted to independently output the multibeam. Eight sub-pulses which may be shaped arbitrarily are included in each train pulse, and the time delay between adjacent sub-pulses is 120 ns. A single pulse selection module is used so that each beam turns into an independent output beam and then each beam is amplified and transmitted to output. Finally, it is successfully verified that the train pulse can be produced by the TDM technique, and its sub-pulse can be shaped arbitrarily and independently. The each beam energy is 1.275  $\mu\text{J}$ .

**Keywords:** laser fusion driver, optical pulse generation system, time division multiplexing

**PACC:** 5250J, 4260

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Foundation of Key Laboratory of National Defense Science and Technology for High-Temperature and High-Density Plasma Physics, China (Grant No. 9140C6803010905).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: xudangpeng@yahoo.com.cn