

一种用于低重复频率窄脉冲的脉冲稳偏技术

王建军^{1,2} 许党朋² 李明中² 林宏奂² 张锐² 邓颖² 谭敬³ 孙力军³ 周寿桓¹

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064; ² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

³ 中国电子科技集团第四十四研究所, 重庆 400060

摘要 新一代高功率固体激光装置前端系统大多采用了先进的全光纤全固化技术路线, 为了实现单模光纤系统长期稳定输出, 需要对系统中的偏振态有针对性地进行控制。提出一种主动偏振控制实现单模光纤系统低重复频率窄脉冲偏振稳定的方法。利用该技术开发的脉冲稳偏器在重复频率大于 100 Hz, 脉冲宽度大于 1.5 ns 的情况下, 系统输出稳定性可控制在均方根(RMS)为 1% 和峰谷值(PV)为 7% 左右。所开发的脉冲稳偏器成功应用于我国第二代高功率固体激光装置前端系统中, 输出稳定性指标优于国家点火装置(NIF)。该技术可广泛应用于窄脉冲和低重复频率系统中实现偏振态的主动控制。

关键词 光纤光学; 脉冲稳偏; 主动偏振控制; 前端系统

中图分类号 TN241 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0102005

A Novel Technique Applied to Low Repetition Narrow Band Pulse Polarization Stabilization

Wang Jianjun^{1,2} Xu Dangpeng² Li Mingzhong² Lin Honghuan² Zhang Rui²
Deng Ying² Tan Jing³ Sun Lijun³ Zhou Shouhuan¹

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

² Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

³ No.44 Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China

Abstract The all-fiber and all-solidified technique was installed to the front end of the next generation high power laser system. Appropriate control to the polarization was required to maintain the stabilization of the fiber system. In order to maintain low repetition narrow band pulses' polarization stabilization, a novel active control technique applied to single mode fiber laser system which worked with low repetition narrow band pulses was proposed. A root-mean-square of 1% and a peak to valley ratio of 7% stability were achieved, when the pulse polarization stabilizer based on this novel technique was used to 1.5 ns pulses at repetition above 100 Hz. The new polarization stabilizer was applied to fiber front end of the second generation high power laser system. The performance index was better than national ignition facility (NIF), and this technique could be used to control the polarization of the narrow-band and low-repetition system actively.

Key words fiber optics; pulse polarization stabilization; polarization active control; front end system

OCIS codes 140.3510; 140.3538; 320.7150; 060.2420

1 引 言

随着激光聚变驱动器的发展和光纤光波导技术的进步, 从美国国家点火装置(NIF)的原型样机(BEAMLET)的研发开始, 新一代的高功率激光聚变驱动器光脉冲产生系统(前端系统)大多采用了先

进的全光纤光波导的全固化系统方案^[1]。为了实现多路光脉冲产生的系统输出稳定, 系统的偏振控制至关重要, 美国 NIF 装置光脉冲产生系统大量采用了单偏振光纤、保偏器件及偏振控制器来实现光纤系统的偏振稳定^[2]。法国 LMJ 激光装置光脉冲产

收稿日期: 2010-03-03; 收到修改稿日期: 2010-05-31

基金项目: 国家 863 计划(42002)资助课题。

作者简介: 王建军(1974—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事全光纤光脉冲产生系统总体技术方面的研究。

E-mail: wjjcaep@126.com

生系统主要也是基于保偏器件来实现稳定的偏振输出^[3]。由于国内针对 $1\ \mu\text{m}$ 波导的偏振元器件体系的研究还不健全,因此神光 III 激光装置光脉冲产生系统采用全单模光纤进行脉冲信号传输,其中系统输出的偏振稳定性尤为关键。

本研究提出了一种采用主动偏振控制实现单模光纤系统低重复频率脉冲偏振稳定的方法,有效地提高了系统输出的稳定性,通过验证单路输出并与 NIF 装置输出指标对比,结果表明,稳定度指标明显优于 NIF 系统。

2 光纤系统结构

基于时分复用技术的前端系统结构如图 1 所示。利用 $1053\ \text{nm}$ 分布反馈(DFB)单纵模光纤激光器产生系统所需要的单纵模连续激光信号,经 1×6 分束器将输入连续激光信号 1 分为 6,然后再经光纤放大器将功率提升至 $10\ \text{mW}$ 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,采用 1×8 分束器将每组序列脉冲信号分成 8 路输出。然后经声光调制器进行选单,第 1 路选第 1 个脉冲,第 2 路选第 2 个脉冲,依次进行选单,第 8 路选第 8 个脉冲,从而实现 8 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波导相位调制器,最终实现具有一定带宽的任意整形的 48 束光脉冲输出。

其中波导幅度调制器通常采用铌酸锂调制器,主要实现对连续单纵模激光信号进行强度调制从而获得所需要的光脉冲输出。波导相位调制器的主要作用是对单纵模激光信号进行梳状光谱展宽,以抑制后续系统大口径光学元件的横向受激布里渊散射(SBS)效应。波导幅度调制器和波导相位调制器均为偏振敏感的单元器件,因此要求注入该器件的激光信号偏振度稳定不变。

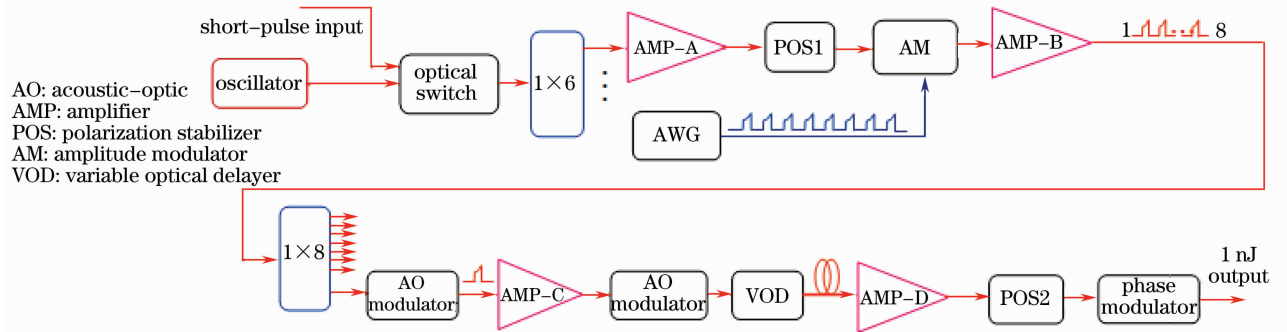


图 1 神光 III 激光装置光脉冲产生系统示意图

Fig. 1 Architecture of the optical pulse generation system for SG-III laser device

从图 1 光纤系统结构中可以看出,系统中的激光信号注入波导幅度调制器与注入波导相位调制器是完全不同的,前者是连续激光信号注入,而后者是脉冲信号注入,因此针对不同的信号特点需要采取不同的偏振控制技术来实现系统的稳定输出。

3 系统偏振控制技术

3.1 系统偏振特性分析

神光 III 激光装置光脉冲产生系统主要由光纤振荡器、波导幅度调制器、声光调制器、光纤放大器与波导相位调制器等组成,其中波导幅度调制器与波导相位调制器是偏振敏感器件,其余单元均为偏振无关型。系统末级输出需要进行准直起偏,确保稳定的线偏振输出。由于系统包含偏振敏感器件波导调制器,会因入射光的偏振态变化而使输出强度发生较大变化,从而使得整个系统的输出强度出现

很大的起伏,这将严重影响后续放大系统的运行安全性和输出稳定性。

光纤振荡器输出激光信号可沿光纤截面方向分解为 2 个相互正交的偏振分量 $\text{HE}_{x,11}$ 和 $\text{HE}_{y,11}$,其光场分布可用高斯分布来表示

$$E_{x/y} = A \exp(-r^2/W^2) \exp(i\beta_{x/y}z), \quad (1)$$

式中 A 为常数, W 为模场半径, r 为径向半径。

两正交本征偏振模的方向角 θ_{xy} (θ_x 与 θ_y 相差 $\pi/2$),可写为

$$\theta_{xy} = \arctan \left[\frac{\frac{k}{M} \sin ML}{\cos ML \mp \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta\beta}{2M} \sin ML\right)^2}} \right], \quad (2)$$

式中 $M = \sqrt{(\Delta\beta/2)^2 + k^2}$, L 为传输光纤长度, k 为光在光纤中传播的波矢, $\Delta\beta$ 为相互正交的偏振分量传播常数差。由(2)式可见,合成偏振方向角 θ_{xy} 随 $\Delta\beta$ 的

改变而变化^[4]。

一束偏振光在光纤中传播时,可以分成沿 x 和 y 方向相互垂直的线偏振光的合成。在光纤中由于芯径的不均匀导致光在这 2 个相互垂直的方向传播速度略有差别,在相位关系上体现为出现相位差 δ_{xy} ,

$$\delta_{xy} = (n_x - n_y)k_0L, \quad (3)$$

式中 n_x 和 n_y 分别为光纤 x 和 y 方向上的折射率。实际的单模光纤由于纤芯芯径沿轴向的微小变化或纤芯所受的非均匀压力,导致光在这 2 个相互垂直的方向传播速度具有随机性的变化,从而使注入光纤中的线偏振光很快变成任意偏振状态的光。当注入信号偏振态随机改变时,将引起系统输出激光脉冲信号的不稳定。

3.2 脉冲稳偏技术

光纤系统偏振控制有 2 种方式:1)全系统采用保偏光纤,光纤系统各级偏振态均稳定不变,如美国 NIF 及法国 LMJ 激光装置;2)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。前一种方式的建造成本较高,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^[5]。后一种方式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。连续激光信号的稳偏

技术目前已经非常成熟^[6~13],并成功应用于激光聚变驱动器的全光纤、全固化光脉冲产生系统中^[14]。对于较低重复频率的脉冲信号需要采用脉冲稳偏技术才能有效提高输出功率的稳定性。

针对光纤系统输出脉冲宽度短(1~10 ns),重复频率低(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。工作原理如图 2(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(EO)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(ECPC)内置反馈电路检测该峰保信号。当光纤偏振状态发生改变后,峰保信号幅度降低,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,使检测的峰保信号保持最大,从而动态稳定光纤的偏振态,稳偏器插入损耗约 1 dB。通常对偏振比较敏感的波导幅度调制器或波导相位调制器输入端均为保偏光纤,而稳偏器需要放置在波导幅度调制器或波导相位调制器之前才会发挥其稳偏的重要作用。因此将稳偏器的输出尾纤设计为保偏光纤,这样与后级偏振敏感的单元连接时才不会改变光信号的偏振态。由于脉冲稳偏器在设计中增加了起偏器外加保偏光纤输出,只要监测稳偏器输出功率的稳定性,就能直接反映出偏振控制的效果来。

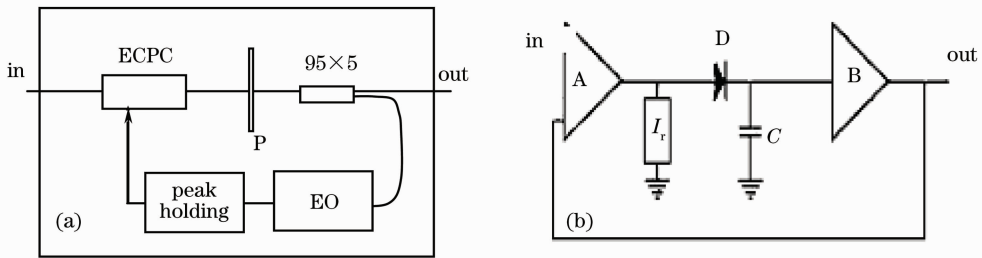


图 2 脉冲稳偏器原理图。(a)稳偏器原理图,(b)跨导型峰值保持电路

Fig. 2 Principle of the pulse polarization stabilizer. (a) principle of stabilizer, (b) transconductance peak-holding circuit

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和动态范围小(小幅度响应差)和通频带小等缺点,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图如图 2(b)所示。其中 I_r 为电流源,提供跨导放大器的静态回路,对该电路有

$$V_p = \int_0^{t_0+t_1} g \cdot [V_i(t) - V_o(T)] \cdot C^{-1} dt, \quad (4)$$

式中 g 为跨导放大器的跨导系数,一般较小,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 0,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。

4 实验结果

4.1 脉冲稳偏器的考核结果

针对不同脉冲宽度的脉冲稳偏效果进行了考核测试,不同脉冲宽度采用共计 2000 发实验数据进行分析,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,如表 1 所示。这是由于在相同的峰值光功率注入情况下,脉冲宽度越窄,峰值保持输出的幅度越低,这样电噪声影响就增大,导致控制精度下降;脉冲宽度越宽,峰值保持输出的幅度越高,信噪比得到提高,从而提高了控制精度。因此系统采用脉冲稳偏器后输出稳定性与信号的脉冲宽度有关。对于 1 ns 及更短脉冲宽度信号需要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验证结果

Table 1 Test results of the pulse polarization stabilizer for low repetition rate pulse

Pulse width /ns	Output power stability (PV) /%	Output power stability (RMS) /%
3	6.95	1.05
2	6.56	1.16
1.5	14.1	1.54

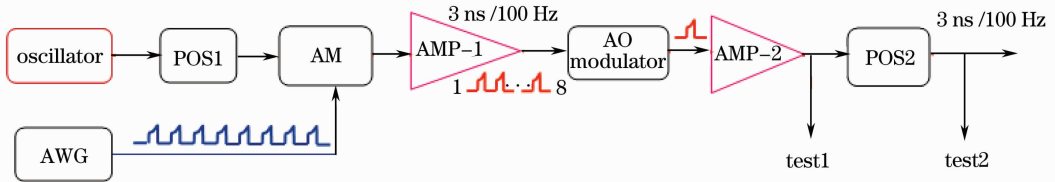


图 3 验证系统光路结构图

Fig. 3 Architecture of the optical pulse generation system test experiment

表 2 光脉冲产生系统设计指标与输出指标对比

Table 2 Specifications of optical pulse generation system for SG-III laser device and its output tests

No.	Parameter	SG-III Spec	Demonstrated
1	Wavelength /nm	1053.5±0.5	1052.981 (Thermal tuning function)
2	Repetition rate /Hz	1~1000	100
3	Rising edge /ps	≤100	<100
4	Pulse length /ns	1.0~10.0	1.0~10.0
5	Reshaping capacity	High independence	High independence and precision
6	Peak/foot contrast	>80:1	>100:1 for sunken pulse
7	SNR /dB	≥45	47
8	Spectrum width /nm	0.3	0.3
9	Beam synchronization precision	≤2.0 ps(RMS)	Adjusting precision 0.22 ps/step
10	Power stabilization/%	≤2.0 (RMS)	1.05 (RMS)

5 结 论

根据神光 III 激光装置前端系统的特点,提出采用跨导型的峰值采样保持电路技术,开发完成了满足光纤系统输出脉冲宽度短(1~10 ns)和重复频率低(1 Hz~1 kHz)的脉冲稳偏器。并成功应用于我国第二代高功率固体激光装置前端系统,输出稳定性指标优于美国 NIF 系统。该技术可广泛应用于窄脉冲和低重复频率系统中的偏振态主动控制。

4.2 系统应用结果

按照图 1 所示的总体光路结构搭建了单束的验证系统,验证系统结构如图 3 所示。其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、传输和脉冲稳偏后注入波导相位调制器将光谱加宽至 0.3 nm 输出,验证系统输出综合性能指标如表 2 所示。

与 NIF 光脉冲产生系统输出指标相比,NIF 光脉冲产生系统输出功率稳定度均方根(RMS)小于 5.5%^[15],而采用脉冲稳偏技术神光 III 激光装置单路验证系统输出功率稳定度明显优于 NIF,其余指标与 NIF 相当。

参 考 文 献

- 1 C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach *et al.*. National Ignition facility laser performance status[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3276~3303
- 2 John T. Hunt. National Ignition Facility Performance Review [R]. UCRL-ID-138120-98. 1998, 2~15
- 3 A. Jolly, J. F. Gleyze, J. Luce *et al.*. Front-end sources of the LIL-LMJ fusion lasers: progress report and prospects fiber lasers integration for LMJ[J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(5): 1427~1438
- 4 Wang Jianjun, Li Mingzhong, Deng Qinghua *et al.*. Polarization

- control technology of fiber front-end system in ICF driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(5): 803~806
- 王建军, 李明中, 邓青华等. ICF 驱动器光纤前端系统偏振控制技术[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(5): 803~806
- 5 Li Feng, Wang Jianjun, Ji Fan *et al.*. Analysis of the unbalanced sidebands of phase modulation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(11): 1818~1822
- 李 锋, 王建军, 纪 帆等. 相位调制边带失衡问题研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(11): 1818~1822
- 6 Yao Yi, Shi Kun, Lu Weidong *et al.*. In-line single mode fiber polarization controller [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(5): 636~640
- 姚 毅, 施 昆, 路伟东等. 在线单模光纤偏振控制器研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(5): 636~640
- 7 He Jingyi, Liu Deming, Zhang Xinliang *et al.*. Polarization state auto-compensated optical fiber current transducer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(12): 1678~1681
- 何竞翼, 刘德明, 张新亮等. 光纤偏振态自动补偿的光纤电流互感器[J]. *光学学报*, 1999, **19**(12): 1678~1681
- 8 Zhou Xiaodong. Theoretical analysis of interferometric fiber-optic sensor's input polarization control [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(6): 794~798
- 周效东. 干涉型光纤传感器输入偏振态反馈控制的理论分析 [J]. *光学学报*, 1997, **17**(6): 794~798
- 9 Mario Martinelli, Paolo Martelli, Angelo Barberis. Passive Polarization Stabilizer [P]. United States Patent, No: US6941032B2, 2005-9-6
- 10 Zhang Hong, Zhang Litai. Theoretical and experimental research on polarizing stabilizer [J]. *J. Civil Aviation University of China*, 2005, **23**(3): 46~49
- 张 弘, 张立台. 偏振稳定器的理论分析与实验研究[J]. *中国民航学院学报*, 2005, **23**(3): 46~49
- 11 Tian Feng, Xi Lixia, Zhao Xinyuan *et al.*. Analysis on the performance of the polarization controller controlled by DSP [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 278~282
- 田 风, 席丽霞, 赵鑫媛等. 基于数字信号处理器控制的偏振控制器的性能分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 278~282
- 12 Zhang Xiaoguang, Duan Gaoyan, Xi Lixia. Research on least number of degrees of freedom for transformation among arbitrary state of polarizations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1173~1176
- 张晓光, 段高燕, 席丽霞. 偏振控制器完成任意偏振态变化的最小自由度研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1173~1176
- 13 Tiecheng Wang, Shoufeng Lan, Junfeng Jiang *et al.*. A novel method of polarization state control for polarization division multiplexing system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 812~814
- 14 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
- 15 John T. Hunt. National Ignition Facility Performance Review [R]. UCRL-ID-138120-99, 1999. 2-4