

文章编号: 1001-3806(2008)03-0228-03

## 有源光纤环脉冲复制器工作特性分析

杨 义<sup>1</sup>, 郑 铮<sup>1</sup>, 李 铮<sup>1\*</sup>, 酆 达<sup>1</sup>, 陈宇晓<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083; 2 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 绵阳 621900)

**摘要:** 为了研究向全光等效时间采样系统提供被采样一致脉冲序列的技术, 讨论了使用有源光纤环脉冲复制器进行脉冲复制的方法。分析了利用环内注入直流光实现对复制器非线性增益与放大自发辐射噪声所导致误差的抑制。通过实验得到了复制器误差随环内注入直流光的变化趋势、复制器复制稳定性和误差分布的测量结果。结果表明, 利用有源光纤环脉冲复制器可以有效地产生被采样等效时间周期脉冲序列。

**关键词:** 光电子学; 有源光纤环脉冲复制器; 脉冲复制; 等效时间采样; 半导体光放大器

**中图分类号:** TN29 **文献标识码:** A

## Experiment study on active fiber loop replicator

YANG Yi<sup>1</sup>, ZHENG Zheng<sup>1</sup>, LI Zheng<sup>1</sup>, FENG Da<sup>1</sup>, CHEN Yu-xiao<sup>2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. China Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The all optical pulses replicating technique for equivalent-time sampling based on active fiber loop replicator was presented. The analysis showed replication error of active fiber loop replicator caused by nonlinear gain and amplified spontaneous emission of semiconductor optical amplifier could be reduced by holding light injecting. The nonlinear errors of active fiber loop replicator and amplified spontaneous emission (ASE) noise adding in output pulses sequence were discussed. The output waveform and distribution of random error caused by ASE noise were measured too. The results show that active fiber loop replicator is suitable to generate pulses sequence for equivalent-time sampling with waveform identity.

**Key words:** optoelectronics; active fiber loop replicator (AFRLR); pulse replication; equivalent-time sampling; semiconductor optical amplifier

## 引 言

近年来,全光等效时间采样技术得到了快速的发展,在进行全光等效时间采样时,需要将被测信号复制成等周期脉冲序列<sup>[1-2]</sup>。目前多使用树形耦合器延时复制器或前馈式光纤复制器对被测脉冲信号进行复制<sup>[3]</sup>。这两种结构需要对其内部的耦合器分光比与各部分光纤长度进行精确设定以避免采样抖动和复制幅度偏差,系统实现难度较大。另外其复制次数也难以实时调整。而使用有源光纤环路结构的脉冲复制器则可克服以上缺点<sup>[4]</sup>。作者研究了基于半导体光放大器的有源光纤环脉冲复制器,讨论了使用环内注入直流光实现复制误差抑制的方法,并通过实验验证了

复制器的工作能力与其误差特性。

## 1 实验装置及工作原理

有源光纤环脉冲复制器由通过单模光纤依次连接的输入输出耦合器、半导体光放大器 (semiconductor optical amplifier, SOA)、衰减器、光隔离器和光滤波器组成。环内 SOA 用于平衡由脉冲输出和其它无源器件带来的环内固有损耗,其工作电流受控制信号调制从而实现复制次数的控制。滤波器用以抑制 SOA 产生的放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 噪声在环内的积累并隔断直流光信号。一直流光激光器经由合波器向系统内注入直流光。脉冲由输入输出耦合器进入复制器内并在环行过程中得到复制。当其每一次经过输入输出耦合器时部分能量输出环外,由此产生一个时间上等间隔的脉冲序列以便后端采样器对其进行采样。脉冲序列中各脉冲时间间隔由环内光纤长度决定,该延时通常为数十纳秒到数百纳秒。有源光纤环脉冲复制器实验系统结构如图 1 所示。

基金项目:国家自然科学基金与中国工程物理研究院联合基金资助项目(10176001)

作者简介:杨 义(1978-),男,博士研究生,主要研究方向为光学非线性器件与光电系统设计。

\* 通讯联系人。E-mail: zhengli@buaa.edu.cn

收稿日期: 2007-04-29;收到修改稿日期: 2007-07-20

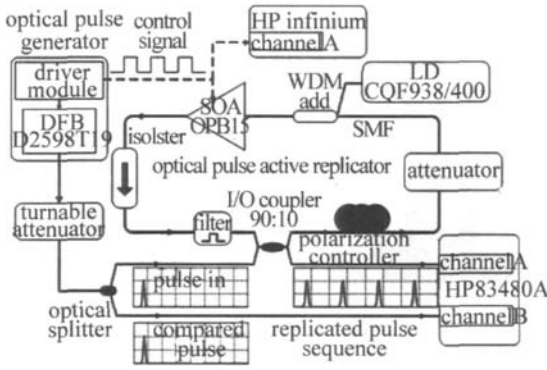


Fig 1 Experiment setup

有源光纤环脉冲复制器的误差主要来源是由 SOA 引入的非线性增益和 ASE 噪声。非线性增益使脉冲在环内复制时波形不同部分得到的增益存在差异,从而产生波形失真。而 SOA 产生的 ASE 噪声则会使输出脉冲序列基线发生漂移,并且使采样结果发生随机性的偏差。这两种误差都可以通过向环内注入直流光抑制。直流光注入波长可以选择位于增益透明波长附近或者在增益区<sup>[5-6]</sup>。由于在增益透明波长附近注入需要较大功率的直流光,并且全光等效时间采样系统被测脉冲为单一波长,所以在增益区注入有更好的效果。信号光与注入直流光在 SOA 中的放大过程和 SOA 中载流子的变化可以表示为:

$$\frac{dI_i}{dz} = \Gamma A_i (N - N_{a,i}) I_i \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{eV} - \frac{N}{\tau_c} - \sum_{i=s,p} A_i (N - N_{a,i}) \frac{I_i}{h\nu} \quad (2)$$

式中,  $I_i$  为光场强度,  $N_{a,i}$  为透明载流子密度,  $A_i$  为差分增益系数, 下标中  $i = s, p$  分别代表信号光和直流光。  $\Gamma$ ,  $\tau_c$  和  $J$  分别为模式限制因子、初始载流子寿命和 SOA 注入电流。  $e$  为电子电荷,  $V$  为 SOA 增益区体积,  $h\nu$  为光子能量。结合 (1) 式、(2) 式, 信号光在 SOA 中的传输可用下式表示<sup>[7]</sup>:

$$\frac{dI_s}{dz} = g' I_s \quad (3)$$

$$g' = \Gamma A_s \frac{\tau J / (eV) + [\tau A_p / h\nu] N_{a,p} I_p - N_{a,s}}{1 + I_s / I_0} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_c} + \frac{A_p I_p}{h\nu} \quad (5)$$

$$I_0 = \frac{h\nu}{A_s} \left[ \frac{1}{\tau_c} + \frac{A_p I_p}{h\nu} \right] \quad (6)$$

式中,  $g'$  为增益系数,  $\tau$  为载流子寿命, 结合 (4) 式和 (6) 式可以看出, 随着注入直流光  $I_p$  的增大,  $I_0$  增大, (3) 式分母中信号光  $I_s$  与直流光的比值减小, 从而使信号光变化对增益造成的影响减小, 由此抑制了增益的非线性。另外由 (5) 式也可以看出, 注入直流光降低了 SOA 中载流子的寿命, 从而提高了 SOA 的响应性能, 降低了其在对信号放大过程中的非线性增

益<sup>[8]</sup>。SOA 在脉冲每次环行中所叠加的 ASE 噪声可表示为:

$$I_{noise} = \int_0^L \sqrt{h\nu B_0 n_{sp} g [n_1 + n_2]} dz \quad (7)$$

式中,  $B_0$  为环内滤波器带宽,  $n_1, n_2$  为方差为 0.5 的独立同分布高斯白噪声源, 自发辐射因子  $n_{sp}$  为:

$$n_{sp} = \frac{g' + \Gamma A_s N_{a,s}}{g'} \quad (8)$$

结合 (4) 式、(7) 式和 (8) 式可以看出, 当直流光  $I_p$  增大, SOA 的增益系数降低, 从而导致 SOA 输出 ASE 噪声降低, 由此降低了复制器输出噪声。

## 2 实验结果与讨论

实验中激光器输出的波形为半峰全宽约 1ns 上升沿不规则的脉冲。不规则的上升沿有利于对系统的非线性误差进行直观的观察。环内光衰减器衰减值得设定在 -2dB ~ -1dB 左右, 滤波器带宽为 1nm。一周周期方波信号对 SOA 进行调制。通过设定其脉宽将输出脉冲序列中的脉冲数设定为 20 个。为防止调制信号边沿上的过冲和反冲对 SOA 造成损坏, SOA 偏置电流的最大值略小于 SOA 允许最大偏置电流 30mA, 而其最小值设定在其透明电流附近而非 0mA。实验中使用两台示波器分别监测 SOA 调制信号与激光器输出脉冲和复制器输出脉冲序列。

由于复制器输出脉冲序列中各脉冲的非线性误差和噪声误差都是逐渐增加的, 所以只需测量输出脉冲序列中第 20 个脉冲相对于原始脉冲的误差, 即可得到复制器误差随注入直流光功率的变化规律。由于全光等效时间采样系统多采用通过测量采样窗口内被测信号的平均功率来进行采样<sup>[9-10]</sup>, 所以, 可选择由随机噪声所造成波形偏差的置信边界值作为衡量标准。实验中测得的非线性平均误差和随机噪声平均误差的结果如图 2 所示。由图中可以看出, 随着环内注入直流光

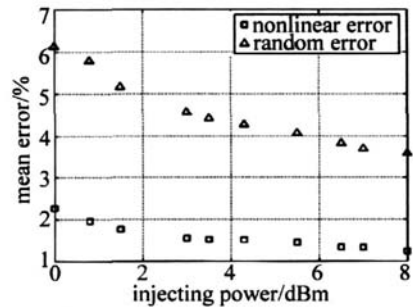


Fig 2 Replicating error of AFLR

功率的增大, 输出脉冲序列中这两种误差都呈减小趋势, 二者误差可以分别降低至约 1% 和 4% 附近。但是需要注意的是, 环内注入直流光不能无限制增大, 过大的直流光注入会使 SOA 无法提供保证脉冲等幅度复制所需要的增益。另外, 较大的输入输出耦合器分光

比和降低环内光无源器件的损耗也有利于增大注入直流光功率,减小非线性误差和 ASE 噪声随机误差。

SOA 调制信号与对应的复制器输出如图 3 所示。

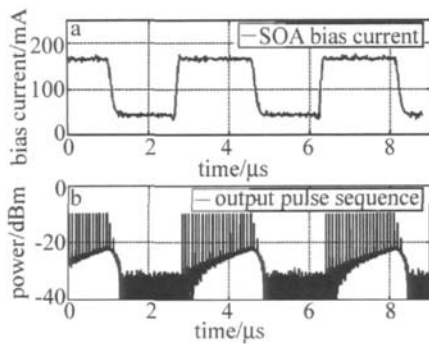


Fig 3 SOA bias current and output pulse sequence of AFLR

由图中可以看出,各次输出脉冲序列中脉冲的数量一致,幅度均匀性较好。另外由于调制波形下降沿较缓,在其到达透明电流附近前,复制器在输出所需的 20 个脉冲后依旧有数个小幅度脉冲输出。但是拖尾脉冲的幅度比前 20 个脉冲小 4dB 以上,由于全光等效时间采样器件多采用预先设定采样次数或边沿触发采样,所以较小幅度的拖尾脉冲不会对采样过程造成影响。由图 3 中还可以看到,当 SOA 偏置电流处于透明电流值附近时,环内衰减大于增益,复制器输出的 ASE 噪声幅度小于 -30dBm。当 SOA 受到调制后,其产生的 ASE 噪声逐渐在环内叠加,造成输出脉冲序列的基线漂移。在约 2μm 的复制窗口内,该噪声功率从 -30dBm 增大到 -23dBm,变化规律为线性增加。当 SOA 中调制电流降低后,该噪声的功率逐渐降低至 SOA 处于透明电流偏置时的值。该噪声造成的误差可以通过降低环内滤波器带宽的方法加以抑制,也可利用数值方法从采样结果中消去对应的基线漂移。

复制器输出脉冲序列中部分脉冲的归一化波形如图 4 所示。由图中可以看出,复制器输出序列中各脉

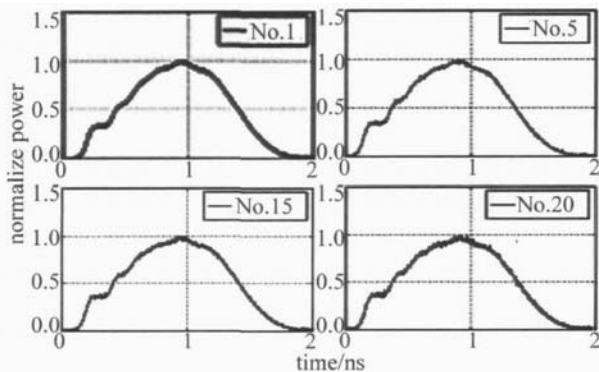


Fig 4 Pulse shape of output pulse sequence

冲形状能基本上保持一致。随着被复制脉冲在复制器内部环行次数的增加,其上叠加的 ASE 随机噪声对波形造成的影响逐渐增加。实验中实测了复制器输出序列中的随机噪声平均误差,得出的输出序列中部分脉

冲随机平均误差的分布直方图如图 5 所示。从图中可以看出随机噪声影响最大的第 20 号脉冲上的随机误差绝大多数情况下也可控制在 5% 以下。

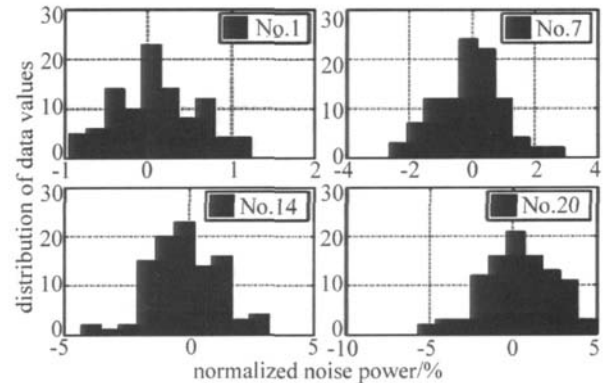


Fig 5 Random noise distribution of output pulse sequence

### 3 结论

讨论了使用 SOA 作为增益介质的有源光纤环脉冲复制器进行脉冲周期复制,为全光等效时间采样系统提供波形一致的被采样脉冲序列的方法。研究了通过环内注入直流光抑制环内 SOA 非线性增益与其输出 ASE 噪声造成的波形随机误差和基线漂移。通过实验验证了复制器的工作特性。实验结果显示复制器输出脉冲序列幅度较为均匀,其工作稳定性较好。复制器输出脉冲序列中各脉冲波形失真较小。实验证明有源光纤环脉冲复制器可以有效地从被采样脉冲产生符合等效时间采样要求的周期性脉冲序列。

### 参考文献

- [1] JANG A L, IPPEN P E, FEISTE U, *et al* Sampling pulse with semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE J Q E, 2001, 37 (1): 118-126.
- [2] LI J, HANSRYD J, HEDEKVIST O, *et al* 300Gbit/s eye-diagram measurement by optical sampling using fiber-based parametric amplification [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13 (9): 987-989.
- [3] FENG D, LI Z, ZHENG Z, *et al* Optical pulse active replicator based on fiberoptic delay-time [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31 (2): 212-217 (in Chinese).
- [4] CHEN Y X, FENG D, LI Z, *et al* Study on the fiber-optic periodic pulse replication techniques [J]. Laser Technology, 2005, 29 (6): 604-607 (in Chinese).
- [5] DUPERTUISA, PLEUMEEKERS L, HESSLER P, *et al* Extremely fast high-gain and low current SOA by optical speed-up at transparency [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12 (11): 1453-1455.
- [6] YU J J, JEPPESEN P. Improvement of cascaded semiconductor optical amplifier gates by using holding light injection [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2001, 19 (5): 614-623.
- [7] YOSHINO M, NOUE K. Improvement of saturation output power in a semiconductor laser amplifier through pumping light injection [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8 (1): 58-59.

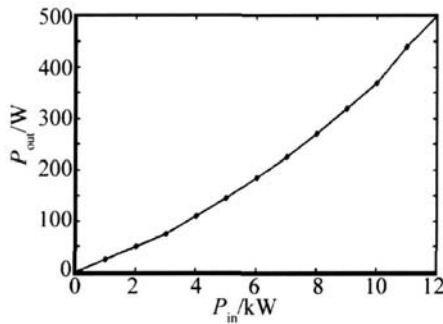


Fig 4 Experimentally measured laser output power versus electrical input power

焦点几乎同时进入谐振腔内,所以输出功率无明显变化。图 5 是不同脉宽下频率与实验测得单脉冲能量的

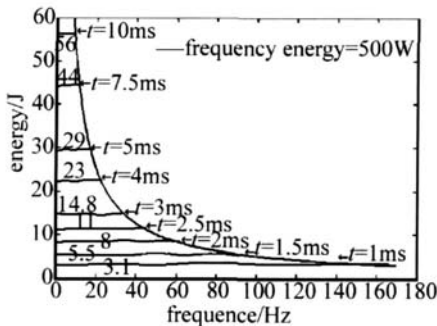


Fig 5 Measured laser single pulse energy versus pulse frequency in different pulse width

关系图。可见,对 1ms~10ms 中的不同脉宽,当其对应的频率增加到激光器频率与脉宽自锁的极限时,其输出的最大平均功率均为 500W。脉宽为 1ms 时,单脉冲能量为 3.1J;当脉宽为 10ms 时,最大单脉冲能量为 56J。

光束质量采用感光像纸成像法测量,输出口处光斑见图 6a,近似测量包含 86% 激光能量的光斑直径

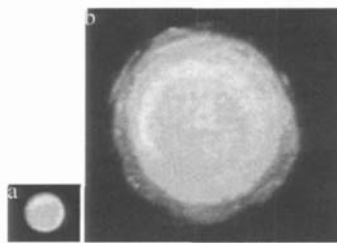


Fig 6 Spots at the position of output mirror and one meter far away

约为 7.8mm,离此处 1m 远的光斑见图 6b,同理测得光斑直径约为 19mm,求得输出激光束的光束参数乘积为 16.5mm · mrad。

对于灯抽运固体激光器,考虑总体电光转换效率,测量在高光束质量条件下的最高输出功率和注入电功率,求得激光器得总体电光转换效率为 4.2%。另外,激光器在抽运功率为 12kW,连续工作 12h,测量输出功率稳定度等于 ±2%,而且体积小,很适用于工业需求。

### 3 结论

通过激光器输出功率理论分析及实验研究,研制出一台工业脉冲固体激光器,其高脉冲能量,高平均功率在国内均未见报道。该工业级激光器的研制突破了国外脉冲固体激光器对我国的垄断,又进一步扩大了激光加工领域。

### 参考文献

- [1] NORMAN H, HORST W. Laser resonators and beam propagation: fundamentals, advanced concepts and applications [M]. 2th ed Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 396.
- [2] SCHUOC DER D. Hand book of the Eurolaser Academy — volume 1 [M]. Cabridge: Chapman & Hall, 1998: 139.
- [3] SCHUOC DER D. Hand book of the Eurolaser Academy — volume 1 [M]. Cabridge: Chapman & Hall, 1998: 140.
- [4] KOECHNER W. Solid-State laser engineering [M]. 5th ed Heidelberg: Springer-Verlag, 2002: 91.
- [5] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. 5th ed Heidelberg: Springer-Verlag, 2002: 332-337.
- [6] HORST W. Resonators for high power solid state lasers—the fight for beam-quality [J]. SPIE, 1998, 3267: 2-13.
- [7] UPADHYA YA B N, MISRA P, RANGANATHAN K. Beam quality considerations of high power Nd:YAG lasers [J]. Optics & Laser Technology, 2002, 34 (3): 193-197.
- [8] OU Q F, FENG G Y, LU D P, et al. Simulation and experimental study on thermal effects of Nd:YAG lasers [J]. Laser Technology, 2002, 26 (1): 15-17 (in Chinese).
- [9] LI Q, WANG Zh M, ZUO T Ch. A method measuring thermal lens focal length of all rays polarized in radial and tangential direction of high power Nd:YAG laser [J]. Opt Commun, 2004, 241: 155-158.

(上接第 230 页)

- [8] PLUMEEKERS L J, KAUER M, DREYER K, et al. Acceleration of gain recovery in semiconductor optical amplifiers by optical injection near transparency wavelength [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14 (1): 987-989.
- [9] WESTLUND M, ANDREKSON P, SUNNERUD H, et al. High-performance optical-fiber-nonlinearity-based optical waveform monitoring

- [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2005, 23 (6): 2012-2022.
- [10] BOGON IA, PONZNI F, SCAFFARD IM, et al. New optical sampler based on TOAD and data postprocessing for subpicosecond pulse resolution [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10 (1): 186-191.