

文章编号: 0253-2239(2007)11-1945-5

基于双半导体光放大器的读/写分别控制的 新型全光缓存器*

张立军 吴重庆 李亚捷

(北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要: 全光缓存器能够在光域内对数据包进行缓存, 解决数据包在节点的冲突。提出了一种新型可擦写的全光缓存器, 该缓存器以半导体光放大器(SOA)为非线性相移器件, 利用信号光和控制光在半导体光放大器中的交叉相位调制实现信号在光域内的“写入”和“读出”。在注入信号峰值功率相同的条件下, 双半导体光放大器结构的采用还可以对信号光实现功率补偿, 比利用单个半导体光放大器进行“写入/读出”控制延长了缓存时间, 并能有效克服在数据包“写入”缓存器时造成的输出端口处信号光的泄漏。该缓存器顺利实现了 2.5 Gb/s 数据包的多圈缓存。

关键词: 光通信; 全光缓存器; 3×3 平行排列耦合器; 半导体光放大器; 交叉相位调制

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Novel Read/Write Independently Controlled All-Optical Buffer Based on Dual-Semiconductor Optical Amplifier

Zhang Lijun Wu Chongqing Li Yajie

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, EMC, Institute of Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: All-optical buffer can store the packet, which can solve the problem of node collision when transmitting packets in optical domain, and will become an important element in all-optical network. This paper presents a novel erasable all-optical buffer which realizes the “write” and “read” function. Two semiconductor optical amplifiers (SOA) which are used as the nonlinearity element can also compensate the power attenuation at the same time. Compared with the single semiconductor optical amplifier configuration, the storage time is prolonged greatly when the same signal power is introduced. This configuration can overcome the “packet leakage” effectively on the output port because of the “write” operation. The buffer can store the packet transmitting at the speed of 2.5 Gb/s successfully.

Key words: optical communication; all-optical buffer; 3×3 collinear fiber coupler; semiconductor optical amplifier; cross-phase modulation

1 引 言

基于光交换的全光网是通信网的必然趋势^[1,2], 光数字分组交换是全光网的最终选择, 全光缓存器能够有效地解决分组交换的竞争问题, 是全光数字分组交换网的关键部分, 因此受到广泛的重视^[3]。目前提出的光纤型全光缓存器主要有两种:

前向结构的光纤延迟线和反馈结构的法布里-珀罗腔或者光纤环。其中基于半导体光放大器(SOA)的双环耦合全光缓存器(DLOB)以其结构紧凑、易于集成等优点受到关注。但在这类基于光纤环的缓存器中, 由于在半导体光放大器中交叉相位调制(XPM)与交叉增益调制(XGM)效应同时存在, 使

* 国家自然科学基金(60577020, 60672004)资助课题。

作者简介: 张立军(1984—), 女, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 主要从事全光缓存及光网络等方面的研究。

E-mail: 06122056@bjtu.edu.cn

导师简介: 吴重庆(1944—), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信、光纤传感、全光网络及全光信号处理等方面的研究。E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2007-02-05; 收到修改稿日期: 2007-05-24

得参与干涉的两束信号光功率不均衡,破坏了最佳干涉条件,因此当数据包被“写入”缓存器时不是100%的光功率都存入环中,总会有一定功率的信号光从输出端口输出,称之为“漏光”现象。本文提出了一种新型的基于双半导体光放大器全光缓存器,它有两个输出端:返回输出端和直通输出端。在直通输出端输出的数据有效地消除了“漏光”现象。同时,此种结构的缓存器可以根据需要单独调节“读出”控制光的功率,以最好地满足信号光在“读出”时对控制光功率的需求,从而极大地提高了双环耦合全光缓存器的灵活性。此外分别置于两环中的两个半导体光放大器还可对数据包实现均衡放大,起到功率补偿的作用,延长数据包的缓存时间。数据包的缓存时间为光纤环长对应延迟时间的整数倍。

2 缓存原理

基于半导体光放大器的可擦写的全光缓存器的结构见图1,它由一个平行排列 3×3 耦合器以及耦合器的两对边端口分别连接起来的两个封闭光纤环组成,形成一个“ ∞ ”字结构。每个环内包含一个半导体光放大器。右环中的半导体光放大器1用于在控制光作用下完成对信号的“写入/读出”控制,左环中的半导体光放大器2则用于对信号光的“擦除”或者“读出”控制。控制光经过波分复用器分别引入到

两个半导体光放大器中。环内的偏振控制器(PC)用来调节参与干涉的两束信号光的偏振态以便获得最佳的干涉效果。

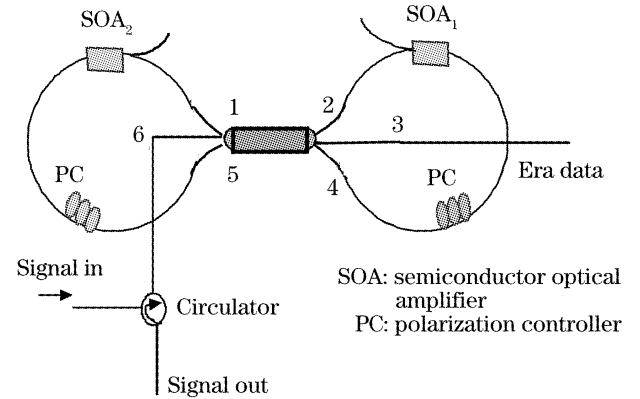


图1 可擦写缓存器结构

Fig. 1 Configuration of erasable all-optical buffer

信号光 P_{in} 从环行器的1端口引入,经过耦合器的6端口,根据 3×3 耦合器的传输特性(端口编号见图1),将以功率比为1:1出现在耦合器的2、4端口,在右环分别沿顺时针(CW)和逆时针(CCW)传输。将控制光引入到半导体光放大器1中,由于半导体光放大器的交叉相位调制作用,将在顺时针和逆时针两束信号光之间引入非线性相移差。调节右环偏振控制器使两束信号光偏振态一致^[4],此时当信号光绕行右侧光纤环一周返回耦合器干涉后输出功率可以表示为^[5~7]

$$\begin{bmatrix} p'_1 \\ p'_6 \\ p'_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k^2 \left| k^2 - k'^2 \exp\left(-\frac{2\Delta\phi}{\alpha}\right) \exp(-i\Delta\phi) \right|^2 \\ k^2 k'^2 S^2 \left| 1 + \exp\left(-\frac{2\Delta\phi}{\alpha}\right) \exp(-i\Delta\phi) \right|^2 \\ k^2 \left| k^2 - k'^2 \exp\left(-\frac{2\Delta\phi}{\alpha}\right) \exp(-i\Delta\phi) \right|^2 \end{bmatrix} P_{in} G_{CCW}, \quad (1)$$

式中 k, k' 为考虑到 3×3 耦合器的不对称性而引入的边端口对于中心端口的耦合系数^[8,9], $S = \sqrt{k^2 + k'^2}$ 。 G_{CW}, G_{CCW} 分别为右环半导体光放大器对沿顺时针和逆时针方向传输的信号光的增益。 α 为半导体光放大器的线宽增强因子。 $\Delta\phi = \phi_{CW} - \phi_{CCW}$, 为右环沿顺时针和逆时针传输的两束光的非线性相移差。当引入同步控制光脉冲并通过调节控制光功率使 $\Delta\phi = \pi$ 时,信号光功率将由耦合器的1、5端口等分输出,信号被“写入”缓存器。此后信号光将一直在“ ∞ ”字型光纤环中环行,这便是存储效应。但

实际上半导体光放大器中的交叉相位调制与交叉增益调制是共生的,且它们满足下式^[5~7],

$$\Delta\phi = -\frac{\alpha}{2} \ln \frac{G_{CW}}{G_{CCW}}, \quad (2)$$

由于信号在写入缓存器的过程中 $G_{CW}/G_{CCW} \neq 1$, 所以由(1)式知 $p'_6 \neq 0$, 即当数据包被写入缓存器时会有少许功率的信号光从耦合器的6端口泄露输出,即“漏光”,漏光功率为

$$p'_6 = k^2 k'^2 S^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{2\pi}{\alpha}\right) \right]^2 G_{CCW} P_{in}. \quad (3)$$

当数据包需要被“读出”时,如果再次向右环引

入“读”控制光脉冲,使两束光之间的非线性相移差达到 2π 。调节右环偏振控制器使两顺时针和逆时针的偏振态一致时信号光从 6 端口读出。称此端口为缓存器的返回输出端。所以在只含有一个半导体

光放大器的返回式缓存器中由于“写入”和“读出”均使用同一端口,漏光现象是不可避免的^[10]。

如果从左环引入控制光脉冲,则耦合器 2、3、4 端口输出的光强为

$$\begin{bmatrix} P'_2 \\ P'_3 \\ P'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k^4 k^2 \left| 1 + \exp\left(-\frac{2\Delta\psi}{\beta}\right) \exp(-i\Delta\psi) \right|^2 \\ S^2 \left| k^2 \exp\left(-\frac{2\Delta\psi}{\beta}\right) \exp(-i\Delta\psi) - k^2 \right|^2 \\ k^2 k^4 \left| 1 + \exp\left(-\frac{2\Delta\psi}{\beta}\right) \exp(-i\Delta\psi) \right|^2 \end{bmatrix} P_{in} G_{ccw} G'_{ccw}, \quad (4)$$

式中 G'_{ccw} 为左环半导体光放大器对沿顺时针方向传输的信号光的增益, $\Delta\psi$ 为由于左环控制光的引入所引起的两束光产生的相移差, β 为左环半导体光放大器的线宽增强因子。由(4)式可以看出,只要 $\Delta\psi=0$,则

$$P'_3 = (k^2 - k^2) S^2 G_{ccw} G'_{ccw} P_{in}. \quad (5)$$

对于实际的 3×3 耦合器,可近似认为, $k^2 = k^2$ 。则 $P'_3 = 0$ 。这表明,只要不在左环引入附加相移差,则在耦合器 3 端口不会有光输出,有效地克服了漏光现象。实验证明这种近似是可行的。当在左环引入“读”控制光,使得 $\Delta\psi = \pi$,则数据从耦合器的 3 端口读出。称此端口为耦合器的直通输出端。

(DFB1) 产生的直流光通过由脉冲码型发生器 (PPG) 驱动的外调制器 (Modulator), 产生带有格式的数据。半导体光放大器光开关的作用是完成对需要缓存数据的截取。控制单元 (Control unit) 向光开关发出触发信号, 控制它打开的初始时刻。当信号光需要“写入/读出”缓存器时, 控制单元向 DFB3 发出指令。DFB3 接到指令后发出对应格式的控制光, 输入到 SOA1 中, 将信号“写入/读出”缓存器。从环形器的 3 端口 (signal out) 观测读出的信号。当数据包在缓存过程中需要从直通端输出 (相对于返回端的擦除) 时, 则控制单元会向 DFB2 发出同步触发信号。DFB2 接收到该触发信号后将向 SOA2 发出控制光脉冲, 这样在耦合器的 3 端口 (Era data) 便可以观测到直通端输出的数据包。

3 实验结果

实验系统如图 2 所示。分布反馈式激光器

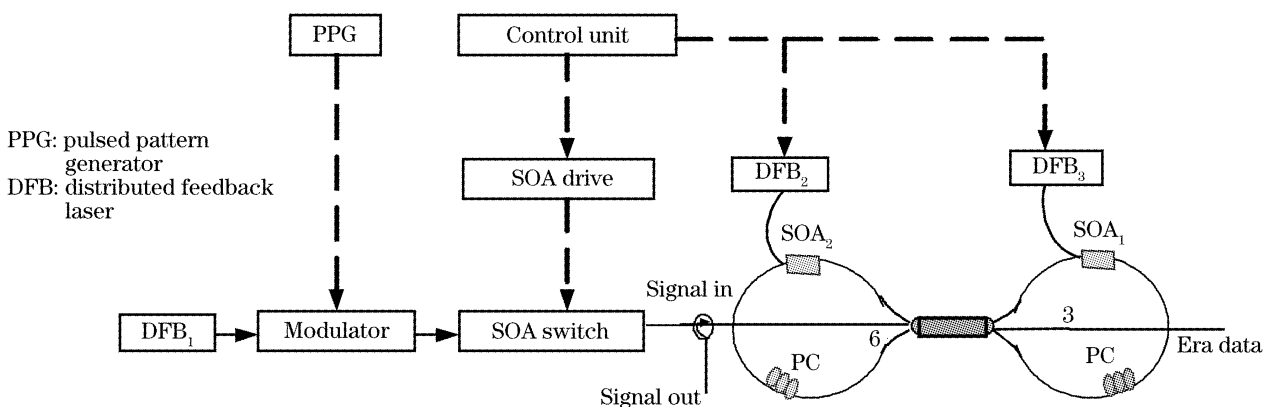


图 2 实验系统结构图

Fig. 2 Setup of experimental system

所用的直流光源 DFB1 的波长为 1556.56 nm, 控制光源 DFB3 和 DFB2 的波长分别为 1553.8 nm 和 1554.9 nm。用于缓存的数据包的信号速率为 2.5 Gbit/s, 宽度为 200 ns, 包含 500 个字节, 周期为 25.1 μ s, 它的峰值功率为 600 μ W。所需控制光的功率为 mW 量级。缓存器的整个环长为 360 m,

对应的最小缓存时间 D 为 1.8 μ s, 数据包被缓存的时间是它的整数倍。比起缓存时间粒度较长的缓存器, 具有更大的灵活性。

如图 3(a) 为经过 10 圈缓存后从环形器 3 端口 (返回端) 所观测到的信号光; 图 3(b) 为经过 10 圈缓存后从耦合器 3 端口 (直通端) 所观测到的输出信

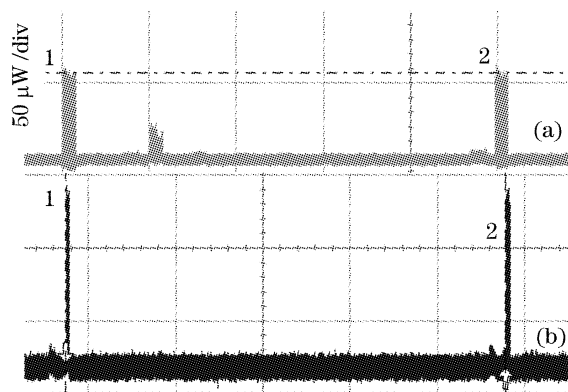


图 3 缓存后观测的数据包。(a)返回端观测,(b)直通观测

Fig. 3 Oscillograph trace of buffered packet signal.

(a) At feedback port, (b) at passing port

号光。图中数据包 1 为前一个周期的信号光,数据包 2 为相应后一个周期的信号光。由图可见,返回式缓存器在信号缓存时存在着漏光的问题,但是,直通式结构缓存器完全消除了信号在缓存器中缓存时的“漏光”。图 4 为信号的细节,其中图 4(a)为写入缓存器前信号的细节,图 4(b)、图 4(c)分别为从返回端和直通端所观测到的信号光的细节。图 5 为测

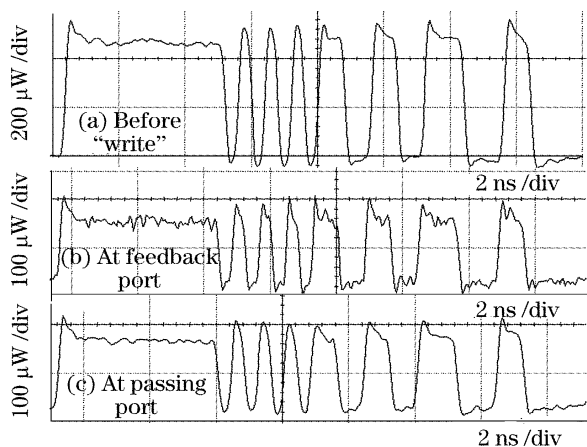


图 4 数据包的细节

Fig. 4 Zoom-in view of the signal packet

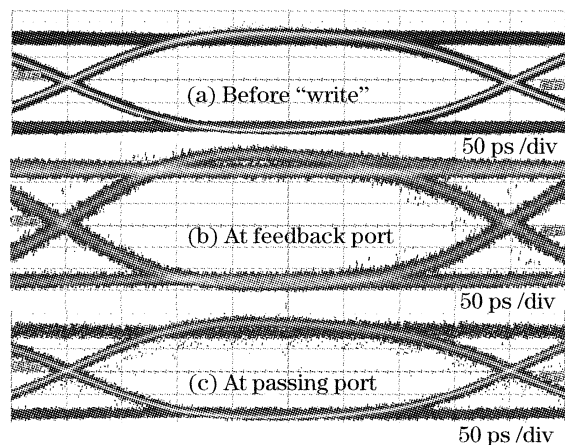


图 5 数据包的眼图

Fig. 5 Eye patterns of the signal packet

量到的信号的眼图,其中 5(a)为写入缓存器前信号光的眼图,图 5(b)、图 5(c)分别为从返回端和直通端所观测到的信号光的眼图。由图 5 看出,经过 10 圈的缓存,信号光的峰值功率有所降低,但是,信号质量保持完好,没有明显的码型恶化。而且从直通输出端比从返回输出端所读出的信号光质量好,噪声较小。

4 结 论

提出了一种新型的全光缓存器。该缓存器以双环耦合全光缓存器为基础,通过在缓存器的左环增加了一个半导体光放大器,顺利实现了信号的“写入”以及“读出”控制。该缓存器结构的优点在于不仅能有效克服缓存器在缓存过程中的漏光问题,而且可以利用其擦除功能对数据包缓存周期数随机设定,极大地增强了缓存器的灵活性。半导体光放大器作为一种非线性元件同时补偿了环内功率损耗,在输入信号光峰值功率相同的条件下缓存时间大幅提高。

参 考 文 献

- 1 Yang Chunyong, Liu Deming, Li Wei *et al.*. Blocking probability analysis of wavelength division multiplexing wavelength routing node[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(4): 544~548 (in Chinese)
杨春勇,刘德明,李蔚等. 波分复用波长路由节点的阻塞特性分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 544~548
- 2 Tang Jianjun, Ji Yuefeng. Study of control protocol in optical burst switching ring network with dynamic wavelength add-drop multiplexer[J]. *Chin. J. Laser*, 2005, **32**(7): 948~952 (in Chinese)
唐建军,纪越峰. 采用动态波长分插复用器的光突发交换环网中的控制协议研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 948~952
- 3 Wu Chongqing. Recent progress of all-optical buffer [J]. *Semiconductor, Optoelectronics*, 2005, **26**(5): 369~373 (in Chinese)
吴重庆. 全光缓存器研究的新进展[J]. *半导体光电*, 2005, **26**(5): 369~373
- 4 Yao Yi, Shi Kun, Lu Weidong *et al.*. In-line signal mode fiber polarization controller[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(5): 636~640 (in Chinese)
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
- 5 Li Yajie, Wu Chongqing, Li Yun *et al.*. New method for power equilibrium in re-circular all-optical buffer based on semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1469~1473 (in Chinese)
李亚捷,吴重庆,李贇等. 基于半导体光放大器的环路型全光缓存器中功率均衡的新方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1469~1473
- 6 S. Fu, P. Shum, L. Zhang *et al.*. Design of SOA-based dual-loop optical buffer with a 3×3 collinear coupler; guideline and optimizations[J]. *J. Light wave Technology*, 2006, **24**(7): 2768~2778
- 7 A. Liu, C. Wu, Y. Gong *et al.*. Dual-loop optical buffer

- (DLOB) based on a 3×3 collinear fiber couple [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(9): 2129~2131
- 8 Yao Shouquan, Wang Yong, Lu Shanda. Analysis of coupling power for fused-biconical linear format 3×3 signal mode optical fiber directional coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(11): 1040~1046 (in Chinese)
姚寿铨,王 勇,陆善达. 熔锥直线型单模光纤定向耦合器的光功率耦合分析[J]. *光学学报*, 1990, **10**(11): 1040~1046
- 9 He Na, Wu Chongqing, Wei Yan *et al.*. Fused planar 3×3 single mode fiber coupler[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 324~327 (in Chinese)
何 娜,吴重庆,卫 炎 等. 熔锥平行排列 3×3 单模光纤耦合器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 323~327
- 10 Li Yajie, Wu Chongqing, Wang Yongjun *et al.*. Performance analysis of control pulse in optical controlled apparatus based on semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **6**(2): 952~957 (in Chinese)
李亚捷,吴重庆,王拥军 等. 基于半导体光放大器的光控器件中控制光的性能分析[J]. *物理学报*, 2007, **56**(2): 952~957

“2007 中国光学重要成果”征稿启事

《激光与光电子学进展》的重点栏目——“年度中国光学重要成果”旨在介绍了中国光学领域科研人员在国际著名物理学、光学期刊(如 *Nature*, *Science*, *Phys. Rev. Lett.*, *Opt. Lett.* 等)发表的部分具有重要学术、应用价值的论文。自 2005 年开办以来,该栏目得到了众多著名科学家的肯定和支持,2007 年第 2 期该栏目刊登了近 30 篇高质量的论文,获得了大家的广泛好评。为了让读者了解本年度我国光学领域科研人员的最新研究成果,扩大这些成果在国内的影响,《激光与光电子学进展》2008 年第 2 期继续推出“2007 年度中国光学重要成果”栏目,现向全国光学领域在国际知名刊物发表论文的专家、学者征稿。征稿要求说明如下:

1. 来稿条件:研究成果已发表在 2006 年 10 月 1 日以来出版的国际知名物理学、光学刊物上,如 *Nature*, *Science*, *Phys. Rev. Lett.*, *Appl. Phys. Lett.*, *Opt. Lett.*, *Opt. Exp.* 等;
2. 稿件格式:最多不超过 1 500 字,不超过 2 张图片。必须用中文,语言简洁易懂,不必提供过多技术细节,尽量避免使用公式,最好选用彩色图片,参考文献不超过 5 篇,文章结尾处注明作者发表论文的出处,论文格式可参考中国光学期刊网;
3. 请作者标出论文的所属研究领域,如自适应光学,生物光子学,探测器,衍射光学,光纤光学,纳米光学,非线性光学,光学工程,光子结构,光传播,量子光学,半导体光学,超快光学等;
4. 投稿应该包括作者的姓名、单位和联系方式;
5. 录用稿件不收取任何审稿费、版面费,投稿截止日期 2007 年 11 月 15 日;
6. 稿件可以采用 MS Word、Latex 格式,投稿方式:

上海市 800-211 邮政信箱《激光与光电子学进展》编辑部 201800

E-mail: gwjg@mail.shnc.ac.cn; lop@siom.ac.cn

《激光与光电子学进展》编辑部