

文章编号: 0258-7025(2009)03-0597-05

双环结构级联型全光缓存器

王拥军¹ 吴重庆¹ 疏达¹ 赵曦¹ 忻向军² 王亚平¹ 赵爽¹

(¹北京交通大学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)
²北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876

摘要 提出了一种基于平行排列 3×3 耦合器的双环结构全光缓存器(DLOB)的级联方案, 分析了单级和级联结构的缓存原理及读写方式, 通过分析半导体光放大器(SOA)的噪声性能, 得到光缓存器输出性能主要由读写操作阶段注入的控制光功率及 SOA 的工作电流决定的结论, 提出了在反馈式光缓存器中实现单级多圈和多级缓存的可能性, 并搭建了一个两级的缓存系统, 实验验证两级级联各缓存 9 圈时, 输出信号光的功率几乎没有减少, 信噪比(SNR)下降不到 4 dB。理论分析和实验都表明, 级联型光缓存器能够实现从纳秒级到毫秒级的缓存, 可以满足未来光包交换(OPS)发展的需要。

关键词 光通信; 全光包交换; 光缓存器; 半导体光放大器

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093603.0597

Cascaded All-Optical Buffer Based on Double-Loop Configuration

Wang Yongjun¹ Wu Chongqing¹ Shu Da¹ Zhao Xi¹ Xin Xiangjun²

Wang Yaping¹ Zhao Shuang¹

¹Key Laboratory on Luminescence and Optical Information Technology of Ministry of Education, Institute of Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
²Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract A double loop optical buffer (DLOB) cascaded scheme based on collinear 3×3 coupler is proposed and the buffer principle and method of reading-out or writing-in operation of single-stage and cascade structure is analysed. Through analyzing the noise characteristics of the semiconductor optical amplifier (SOA), a conclusion is achieved that the output performance is determined by the control light power and the current injected into the SOA during writing and reading. And the possibility of multiple circulations buffering in one-stage buffer unit and buffering in the cascaded units is proposed. A cascaded experimental system consisting of two buffer units was set up. The experiment demonstrated that, when the optical packets traversing in two units of the cascaded buffer exceeded 9 circles respectively, the peak-peak value of output power did not decrease compared to the input optical signals, and signal-to-noise ratio (SNR) declined by less than 4 dB. The result of theoretical analysis and experiment both prove that cascaded optical buffer can provide a buffer from nanosecond to microsecond, which would meet the demand of optical packets switch (OPS) development in the future.

Key words optical communication; all-optical packets switching; all-optical buffer; semiconductor optical amplifier

收稿日期: 2008-09-12; 收到修改稿日期: 2008-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(60877057, 60672004)及新世纪优秀人才计划(NECT-07-0111)资助课题。

作者简介: 王拥军(1968—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤通信和光纤传感方面的研究。

E-mail: 06118330@bjtu.edu.cn

导师简介: 吴重庆(1944—), 男, 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方面的研究。

E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn

1 引言

全光包交换(OPS)为下一代光网络的发展提供了良好的解决方案,在 OPS 中,全光缓存器(DLOB)能够解决不同数据包竞争同一个端口的问题,是全光包交换节点的关键部件。目前全光缓存器的研究集中在两个方面,一是减慢光速,寻求新的“慢光”机制^[1,2],二是优化光缓存器结构。虽然“慢光”型缓存器是全光缓存器发展的重要方向,但目前还处于起步阶段,而优化光纤“延迟线”型全光缓存器的结构,仍然是一个重要的问题。以光纤为基础的缓存器主要包括前向型和反馈型。前向型光缓存器的光信号只通过光纤一次,利用率很低,物理尺寸大。早期的反馈型光缓存器利用数千米的非线性效应较强光纤(如 DSF 等)作为开关元件^[3,4],延迟粒度(Granularity)较大。文献[4,5]提出了用半导体光放大器(SOA)作为非线性元件和平行排列 3×3 耦合器构成的双环结构全光缓存器,结构简单,容易集成。但是,单一结构的 DLOB,环长不可调,因此缓存周期不可调,不能够适应光路由器对包信息处理时间和解决竞争的要求。在全光交换节点中,对包处理所需的最大延迟时间以及为等待其他数据包发送所要求的时间可以认为不超过毫秒量级;而最小的延迟时间可能就是一个短帧的帧长,一般只有几个字节。因此光缓存器的延迟时间应该在几个字节的时长到几个毫秒之间可调。本文提出一种以 DLOB 为基础的光级联型光缓存器,它的单元结构简单,操作方便,在光控情况下开关速度达到亚纳秒级。利用这种缓存单元的级联可以实现延迟时间在纳秒到毫秒之间调节。因此,级联型 DLOB 为 OPS 解决端口竞争提供了更大的灵活性。

2 基本原理

级联型 DLOB 结构如图 1 所示,图中整个缓存器由 k 级基本缓存单元级联构成,光信号在每一级缓存单元存一圈的时间分别为 T_1, T_2, \dots, T_k ,在每一级的缓存圈数为 n_1, n_2, \dots, n_k ,那么,总的缓存时间

$$t_{\text{delay}} = n_1 T_1 + n_2 T_2 + \dots + n_k T_k. \quad (1)$$

适当设计每个存储单元的环长、存储圈数和总的级数,缓存时间可以被控制在纳秒到毫秒之间任意调节,这样就可以满足网络状况和光路由器信息处理对缓存时间的要求。

基本缓存单元 DLOB 如图 2 所示, 3×3 耦合器的端口 1,3 和 4,6 相连分别构成双环结构光缓存器

的左环和右环,SOA 作为相移器被偏心放置在右环中,调节偏振控制器可以使 1,3 或 4,6 端口的光处于同一偏振方向,右环中的两个波分复用器(WDM)用来向 SOA 引入控制光及滤除环内的控制光。

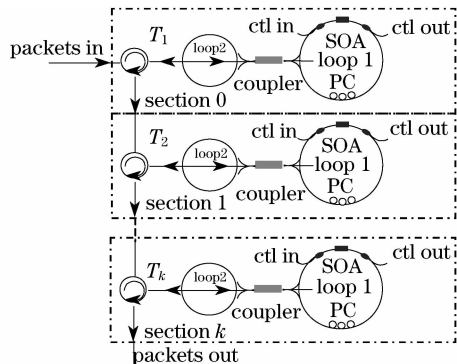


图 1 级联型全光缓存器的基本结构

Fig. 1 Basic structure of the cascaded all-optical buffer

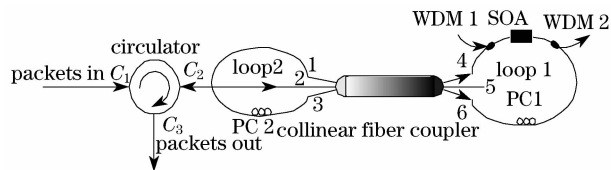


图 2 基本缓存单元

Fig. 2 Basic buffer unit

光信号从环形器的 1 端口进入,经 2 端口进入 3×3 耦合器的 2 端口,那么, 3×3 耦合器 4,5,6 端口输出的光功率为: $P_4 = P_6 = 1/2 P_{\text{in}}, P_5 = 0$ ^[5],可见,在 4,6 端口各分配到一半功率的输入光信号,并分别沿顺时针方向(CW)和逆时针方向(CCW)传输。经过 SOA 在右环传输一圈后, 3×3 耦合器 1,2,3 端口输出的光信号功率可以表示为^[5,6]

$$\begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ P'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{8} P_{\text{in}} G_{\text{cw}} (1 + e^{-\frac{2\Delta\phi}{\alpha}} - 2e^{-\frac{\Delta\phi}{\alpha}} \cos \Delta\phi) \\ \frac{1}{4} P_{\text{in}} G_{\text{cw}} (1 + e^{-\frac{2\Delta\phi}{\alpha}} + 2e^{-\frac{\Delta\phi}{\alpha}} \cos \Delta\phi) \\ \frac{1}{8} P_{\text{in}} G_{\text{cw}} (1 + e^{-\frac{2\Delta\phi}{\alpha}} - 2e^{-\frac{\Delta\phi}{\alpha}} \cos \Delta\phi) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 α 表示 SOA 的线宽增强因子, $\Delta\phi$ 为两个方向的光经过 SOA 后的相位差^[7]

$$\Delta\phi = \phi_{\text{cw}}(t) - \phi_{\text{ccw}}(t) = -\frac{\alpha}{2} \ln \frac{G_{\text{cw}}}{G_{\text{ccw}}}, \quad (3)$$

其中 G_{cw} 和 G_{ccw} 分别为 CW 方向与 CCW 方向的光增益。由(2),(3)式可知,通过控制两个方向的信号光经过 SOA 时的增益和线宽增强因子 α 就可以控制信号光功率在三个端口的分配。当 $\Delta\phi = \pi$ 时,1,

3 端口的光功率相等并达到最强,而 2 端口输出的光功率最弱,光信号沿左环传输一圈后,由 3×3 耦合器的对称性及(2)式可知,各有一半的信号光功率分配到 4,6 端口,并沿着右环传输。如果保持 $\Delta\phi$ 不变,光信号就被写入并沿左右环按“8”字形周期环绕。当需要读出时,控制 $\Delta\phi$ 使其再次改变 π 相位,光信号将被读出并从 2 端口输出。SOA 的增益 G 和线宽增强因子 α 都是注入电流和输入光功率的函数,因此,使用光控制方法和电控制方法都可以实现对 $\Delta\phi$ 的控制。当 CW 方向的信号光通过 SOA 时,向 SOA 注入一个与其同步的控制光脉冲(与信号光波长不同)或电流脉冲,而当 CCW 方向的信号光通过 SOA 时,没有同步脉冲被注入,通过适当调节注入的同步脉冲的光功率或电流值可以使 $\Delta\phi = \pi$ 。本文使用的是光脉冲控制方法。

从前面的原理分析可知,只要调整好控制光的功率和控制电流的强度及其与信号光的同步,使得每一级的 $\Delta\phi = \pi$,这样,在同步信号(由外部控制单元产生)的控制下,信号光就会按次序沿缓存单元 1 到缓存单元 k 先后实现缓存 $n_1, n_2 \dots n_k$ 圈。反馈式光缓存器要求信号光多次通过 SOA,这样 SOA 中放大自发辐射(ASE)噪声的累积就成为限制级联型环绕式光缓存器性能的主要因素。参考文献[8,9]中报道了向 SOA 中注入辅助光的方法来抑制 SOA 的 ASE 噪声,在本文中向 SOA 中注入大功率的控制光,不仅可以完成对光缓存器的读写操作,而且极大地抑制了 SOA 的噪声,放大了输出信号光的功率,实现了大范围缓存的目的。

SOA 输出噪声光子数的方差可以表示为^[10]

$$\sigma_{\text{out}}^2 = G\langle n_{\text{in}} \rangle + (G-1)n_{\text{sp}} + 2G(G-1)n_{\text{sp}}\langle n_{\text{in}} \rangle + (G-1)^2 n_{\text{sp}}, \quad (4)$$

其中 G, n_{sp} 和 $\langle n_{\text{in}} \rangle$ 分别表示 SOA 的增益, σ 放大自发辐射系数和输入光的平均光子数。在缓存阶段向 SOA 注入高功率的控制光,使得 $P_{\text{ctrl}} \gg P_s$, 信号光在 SOA 中的特性完全由控制光决定。使用反相光脉冲控制法^[11], 当信号光被写入后,使 SOA 的增益接近 1, 这样(4)式的 2,3,4 项可以忽略,得到 $\sigma_{\text{out}}^2 = \langle n_{\text{in}} \rangle$ 。由于光子数是一个泊松流,平均光子数等于其方差,于是,输出噪声等于输入噪声,输出光强度等于输入光强度,这相当于信号光在 SOA 中透明传输,在写入或读出时 $G \gg 1$, 理想情况下 $n_{\text{sp}} = 1$, 这时得到的噪声系数 $\text{NF} \approx 3 \text{ dB}$, 考虑到线路损耗(主要包括 3×3 耦合器和 WDM 的损耗)一般在 1~1.6 dB 之间,写入或读出时 G 按照 4~10 估算,经过

10~20 圈后,输出信号光的功率不会有太大衰减,信噪比下降 6 dB。如果输入的信号光的 SNR 为 40 dB,那么经过 4 级缓存单元,40~80 圈的延迟后在输出信号光幅值不变的情况下,SNR 可以达到 16 dB。如果合理地设计各缓存单元延迟线的长度,完全可以实现纳秒到毫秒的大范围缓存。实际操作时,使缓存时的增益 G 略大于 1,这样不仅补偿了线路的损耗,也不会引起太大的噪声积累。

图 3 给出了一个环长 48 m 的一级缓存单元存 20 圈的结果。输入环行器 1 端口的信号光的峰-峰值约 $620 \mu\text{W}$, 缓存 20 圈后,从环行器 3 端口输出的信号光的峰-峰值可以达到 $400 \mu\text{W}$, 反推到 SOA 的输出端,信号光的峰-峰值约 $600 \mu\text{W}$, 即 20 圈后,信号光几乎没有衰减,而输出噪声 $20 \mu\text{W}$ 左右,与输入信号相比,信噪比仅下降了不到 2 dB。由单级环缓存 20 圈的结果推断,级联缓存方案是完全可行的。

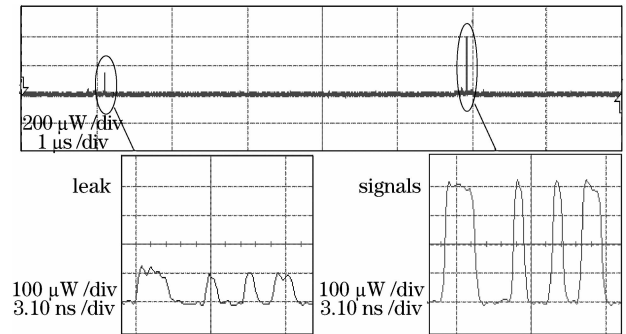


图 3 单环缓存 20 圈的结果

Fig. 3 Result after it is buffered 20 circles in one buffer unit

目前,国内外在研究延迟可调的光缓存器时一般也采用多个光缓存单元的级联方式。文献[12]提出了一种级联结构,总的延迟时间可以在第一级单位延迟到毫秒之间可调。但是,该结构中每个缓存器单元的光信号需要多次经过 2×2 耦合器,如果为 9 级缓存,那么从一段缓存单元的环形器输入的光信号,经过最顶端的延迟线到达环形器的输出端衰减超过 50 dB。而且,方案中采用的是前向结构,需要大量的光纤,这将导致缓存器的物理尺寸较大,整个缓存器用到的 SOA 的数量是 $n \times m$ 个,成本较高。文献[13]对这种结构进行了改进,虽然相移器、光开关和光纤有所减少,但是,它的相移器和光开关分离,不仅增加了成本,而且使得对光缓存器的读写操作变得很复杂。另外由于相移器被偏心放置在环中,因此,包的长度被限制。文献[14,15]提出并展示了一种基于有源垂直耦合器(Active Vertical

Coupler; AVC)的环形结构的光缓存器,在操作的灵活性和光学集成方面有了很大改善,但是它的开关速度为纳秒级,比较慢,且光功率损耗很大,超过了 20 dB。比较而言,级联 DLOB 更容易实现。

3 级联型光缓存器实验系统及实验结果

级联实验系统如图 4 所示,系统由两级缓存单元组成,第一级缓存单元的环长约为 48 m,第二级的环长约为 530 m,控制光的波长为 1553.8 nm,信号光的波长为 1556.56 nm,信号光由连续激光器产生,加到 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)外调制器的光输入端,信号的内容由 PPG (pulse pattern generator)产生,并加到 MZI 的电口,从 MZI 的输出光口输出带有光信息的光信号。信号的内容有两部分构成,标记和需要缓存的信息,标记为 5555H,信息为 E113H,标记不在缓存器中存储,只作为光信息缓存圈数的参考。外部控制单元微控制单元(MCU)用来产生与连续光(CW)方向的信号光同步的控制信号,并加到控制激光器的输入端。输入到第一级缓存单元环形器 1 端口的信号光功率的峰值约为 $640 \mu\text{W}$ 。

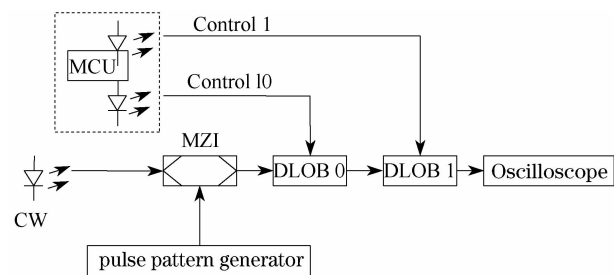


图 4 实验系统图

Fig. 4 Experimental system

第一级缓存单元中的 SOA (Inphenix 产品)的工作电流为 200 mA,控制光的高光平均 6.10 mW ,低光平均 1 mW 。分别在第一缓存单元和第二缓存单元的输出端用示波器记录输出波形,测量结果如图 5 所示。

从实验结果可以看到,第一个环输出的标记的峰-峰值约为 $300 \mu\text{W}$,由于信号通过环形器的损耗约为 0.8 dB,通过 3×3 耦合器的损耗约为 0.5 dB,通过 WDM 的损耗约为 0.5 dB,反推到 SOA 输出端的标记的峰-峰值约为 $449 \mu\text{W}$,在 SOA 的输入端测得的标记约为 $185 \mu\text{W}$ (由于 3×3 耦合器分光特性为 0.5 : 0.5),SOA 对标记的增益 G 约为 1.21。标记通过 SOA 时,控制光为高光平,与信号光缓存期

间的控制光相同,约 6.11 mW ,远远大于信号光的幅值,可以认为 SOA 的增益 G 仅由控制光决定,因此可以得到 SOA 在缓存器处于存储状态时信号光的增益约为 1.21。标记后的小峰是写入缓存器时从耦合器的 2 端口漏出的信号光,漏光可以设法调小但却是不可能避免的,漏光的原因是由于 3×3 耦合器 2 端口输出的光功率极小值不为零^[16]和 3×3 耦合器 4,6 端口分光比不对称所致。写入时控制光功率小,约 1 mW ,这样写入阶段信号光被放大,实际测得放大后 CW 方向的信号光为 $740 \mu\text{W}$,即信号光被放大了 4 倍。CCW 方向的信号光功率应该与标记光相同,约为 $450 \mu\text{W}$,调整偏振控制器,使 3×3 耦合器的 5 端口输出的信号光强度最小,此时,可以认为几乎所有的信号光被等分到左环的 1,3 端口,约 $470 \mu\text{W}$ 。考虑到环的损耗及 SOA 的增益,每环行一圈信号光的衰减约 0.37 倍。绕行 9 圈后,估算 SOA 输出的信号光约为 $180 \mu\text{W}$ 。在写脉冲的作用下信号光被放大 4.2 倍,约 $810 \mu\text{W}$,加上 CCW 方向的 $180 \mu\text{W}$,估计总的信号功率约为 $940 \mu\text{W}$ 。

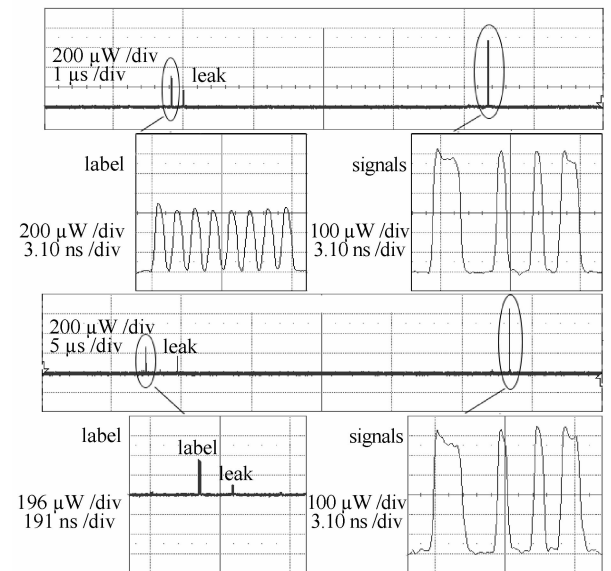


图 5 级联缓存结果

Fig. 5 Result of cascaded buffer

由图 5 得到第一级缓存单元存储 9 圈后输出的信号光的峰-峰值可以达到 $620 \mu\text{W}$ 左右,且信号的质量没有明显劣化,反推到 SOA 输出端的信号光的峰-峰值约为 $930 \mu\text{W}$ 。可见,估算的输出信号光功率与实际测量的输出功率相吻合,在 SOA 的输出端信号光不仅没有衰减,而且还得到约 3.7 dB 的增益。与输入信号相比,信噪比几乎没有下降。第二缓存单元中环形器, 3×3 耦合器及 WDM 的衰减和

缓存单元一的参数相近, 光纤上的损耗多 0.1 dB, SOA 的工作电流为 190 mA, 控制光的低光平约为 $700 \mu\text{W}$, 高光平约为 4.5 mW。由单元二的输出结果可以看出: 1) 标记光(包括帧标记和缓存单元一的写入漏光)进一步被压缩; 2) 输出信号光的峰-峰值约为 $640 \mu\text{W}$, 和单元一的输出基本相同, 这说明当增加缓存单元的级数时, 在线路衰减变化不大时, 输出的信号光功率完全可以得到补偿; 3) 输出信号的噪声有所增加(缓存单元一输出信号的噪声约 $30 \mu\text{W}$, 缓存单元二输出信号的噪声约 $40 \mu\text{W}$), 这比预期的值有所改善。

实验发现, 输出信号光的幅值对线路衰减极其敏感, 线路衰减增加 0.1 倍, 绕行 9 圈后, 信号光幅值几乎会下降 3 dB。如果为了补偿损耗而增加 SOA 的工作电流, 将会破坏 SOA 的工作点, 造成噪声急剧增加; 两级缓存后, 输出的信号光幅值有 $30 \mu\text{W}$ 左右的摆动, 其原因是控制光幅值不稳定和线路中相位漂移所引起。因此, 为了得到稳定的和较大的输出, 应该减少环路中活动连接器的个数, 走集成化道路, 将 SOA, 3×3 耦合器, WDM, 激光器等高度集成, 尽量减小线路损耗; 同时, 稳定控制激光器在大功率输出时的幅值, 使用电可控的偏振控制器, 减小手动偏振控制器造成的长期不稳定。

4 结 论

基于平行排列 3×3 耦合器的双环结构级联型全光缓存器不仅结构比较简单, 容易集成, 而且输出信号的质量较好。两级缓存单元的级联实验表明, 两个环各绕行 9 圈后, 输出的信号光强度得到很好的恢复, 与输入光相比, SNR 仅下降不到 4 dB, 级联实验实现了 0~99 倍之间的可调延迟。由此推论, 通过多级(4)级联, 可以实现 0~9999 倍的可调延迟, 即缓存时间可以在纳秒到毫秒之间调节, 能够满足网络状况和光路由器对包信息处理所要求的缓存时间。因此, 本文提出的基于平行排列 3×3 耦合器的双环结构级联型全光缓存器的发展与完善对未来全光缓存器及 OPS 发展具有一定的价值。

参 考 文 献

1 L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. *Nature*,

- 1999, **397**(6720):594~598
- 2 F. L. Kien, J. Q. Liang, K. Hakuta. Slow light produced by far-off-resonance Raman scattering[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2003, **9**(1):93~101
- 3 A. Agarwal, L. J. Wang, Y. K. Su. All-optical erasable storage buffer based on parametric nonlinearity in fiber[C]. 2001 OFC (Optical Society of America)
- 4 A. M. Liu, C. Q. Wu, Y. D. Gong. Optical buffer configuration based on 3×3 collinear fiber coupler[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(16): 1017~1019
- 5 A. M. Liu, C. Q. Wu, Y. D. Gong. Dual-loop optical buffer (DLOB) based on a 3×3 collinear fiber coupler[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(9): 2129~2131
- 6 Songnian Fu, P. Shum, Liren Zhang. Design of SOA-based dual-loop optical buffer with a 3×3 collinear coupler: guideline and optimizations[J]. *J. Lightwave. Technol.*, 2006, **24**(7): 2768~2778
- 7 M. Eiselt, W. Pieper. SLALOM: semiconductor laser amplifier in a loop mirror[J]. *J. Lightwave. Technol.*, 1995, **13**(10): 2099~2112
- 8 Fumio Koyama, Hiroyuki Uenohara. Noise suppression and optical ASE modulation in saturated semiconductor optical amplifier[J]. *IEE Conference Record of the Thirty-Eighth Asia-Iommar*, 2004, **1**:98~102
- 9 Wu Chongqing. A method of improving the property of fiber-type optical buffer[P]. Chinese Patent CN1710839. 2005-12-21
吴重庆. 一种改进光纤型全光缓存器性能的方法[P]. 中国, CN1710839, 2005-12-21
- 10 T. Mukai, Y. Yamamoto, T. Kimura. S/N and error rate performance in AlGaAs semiconductor laser preamplifier and linear repeater systems[J]. *J. Quantum Electron.*, 1982, **18**(10): 1560~1568
- 11 Wang Yongjun, Wu Chongqing, Shu d *et al.*. Investigation on control technique of adjustable double loop optical buffer in large range[J]. *Chinese J. Lasers.*, 2008, **35**(12):1930~1934
王拥军, 吴重庆, 疏达等. 大范围可调的双环全光缓存器的控制技术研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(12):1930~1934
- 12 Yong-Kee Yeo, Jianjun Yu, Gee-Kung Chang. A dynamically reconfigurable folded-path time delay buffer for optical packets switching[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(11): 2559~2561
- 13 Yang Aiyang, Sun Yunan. Dynamic reconfigurable multiple granular optical buffer for all optical switching networks[P]. Chinese Patent, CN 1633108A, 2005-6-21
杨爱英, 孙雨楠. 全光交换网动态可重构多粒度光缓存器[P]. 中国, CN 1633108A, 2005-6-21
- 14 Nan Chi, Zhuoran Wang, Siyuan Yu. A large variable delay, fast reconfigurable optical buffer based on multi-loop configuration and an optical crosspoint switch matrix[C]. *Optical Society of America*, 2006:OFO7
- 15 Riccardo Varrazza, Ivan B. Djordjevic, Siyuan Yu. Active vertical-coupler-based optical crosspoint switch matrix for optical packet-switching applications [J]. *J. Lightwave. Technol.*, 2004, **22**(9): 2034~2042
- 16 Wang Yaping, Wu Chongqing, Wang Yongjun *et al.*. Noise analysis of optical packet replication based on the semiconductor fiber ring[J]. *Chinese J. Laser*, (to be published)
王亚平, 吴重庆, 张煦等. 基于 SOA 光纤环形腔的光数据包复制器的噪声特性研究[J]. 中国激光. (待发表)