

文章编号: 0253-2239(2008)10-1898-05

基于半导体光放大器偏振旋转的全光缓存器

程 木 吴重庆 赵 瑞 宋 超 李政勇 王亚平

(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)

摘要 全光缓存器可实现数据包在光域内的缓存,是全光路由、全光计算以及全光交换的关键部件之一。提出了一种基于半导体光放大器(SOA)中非线性偏振旋转(PR)的光纤环型全光缓存器结构;提出了一种利用偏振主态(PSP)寻找两个正交线偏振态以及在线实时测量光纤中偏振态的方法。通过改变 SOA 的注入电流,实现了对两个正交偏振态转化的控制,利用这两个正交的线偏振态,实现了信号的“写”入和“读”出。利用该结构的缓存器,实现了 2.5 Gb/s 的 1024 bits 数据包 6 圈的缓存,缓存后的信号波形良好。

关键词 光纤通信;全光包交换;全光缓存器;偏振旋转;偏振主态;半导体光放大器

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082810.1898

All-Optical Buffer Based on Polarization Rotation in Semiconductor Optical Amplifier

Cheng Mu Wu Chongqing Zhao Rui Song Chao Li Zhengyong Wang Yaping

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Institute of Optical Information Science and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract All-optical buffer can store the packets in optical-domain and is a key component in all-optical router, all-optical calculation and all-optical switching. A novel all-optical buffer based on nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifier (SOA) and a method which utilizes the principal states of polarization (PSP) to find two orthogonal linear states of polarization (SOPs) were proposed. This method can measure the SOP on-line. By adjusting the injection current of SOA the conversion between two orthogonal linear SOPs was realized. The operation of the proposed optical buffer at 2.5 Gb/s was experimentally setup. The writing in and reading out operations of 1024 bits random data for 6 circulations by this optical buffer were demonstrated.

Key words fibre communication; all-optical packet switching; all-optical buffer; polarization rotation; principal states of polarizations; semiconductor optical amplifier

1 引 言

全光数字分组交换网是未来光网络发展的重要趋势,全光缓存器是实现全光数字分组交换的关键部件之一^[1],尽管目前已经提出了基于慢光的缓存方案,但缓存时间只有纳秒量级,不能满足信号处理的时间需求,所以以光纤为存储体的全光缓存器仍然是最接近于实用的缓存器。目前提出的光纤环型

全光缓存器有基于非线性环路镜(NOLM)^[2]、太赫兹光非对称解复用器(TOAD)、NFSI(Nonlinear Fiber Sagnac Interferometer)^[3],基于平行排列 3×3 耦合器的双环全光缓存器(DLOB)^[4,5],以及读写分别控制的全光缓存器^[6]等多种结构。这些结构都要在环中引入一个非线性相移器件,使得顺时针和逆时针传输的光信号产生相位差,并利用干涉原理

收稿日期: 2008-03-31; 收到修改稿日期: 2008-06-04

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z270)和国家自然科学基金(60577020,60672004)资助课题。

作者简介: 程 木(1977—),男,博士研究生,主要从事全光缓存及全光信号处理等方面的研究。

E-mail: chengmu@sina.com

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等方面的研究。E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn

实现对缓存数据的“读写”。为了保证顺时针和逆时针的光不在非线性相移器件中相遇,非线性元件都必须偏离光纤环的中心位置,所以使得缓存器的缓存深度(能够缓存的数据长度与光纤长度换算为时间的比)理论上不能超过 50%。并且,信号无论缓存与否,信号都至少要在光纤环中绕行一周,使得多级缓存器的无缝级联变得很困难,无法实现不同长度数据包的缓存。

本文提出了一种基于半导体光放大器(SOA)偏振旋转(PR)的光缓存器。利用 SOA 作为偏振态高速旋转器件,实现了两个相互正交的偏振态之间的转化,从而实现了光缓存器的“读写”操作。由于 SOA 不在光纤环中,其缓存深度可超过 50%。不需缓存的信号不必在光纤环中绕行一周,可以直接通过,能够实现全光缓存器的多级无缝级联。

2 原 理

基于偏振旋转的光缓存器原理很简单,两个偏振分束器配合一个偏振旋转器件就可以实现,见图 1。关键是:1)因为缓存的是高速信号,所以偏振

旋转必须非常快,至少能超过纳秒级;2)光纤中的偏振态无法进行在线监测,但还要保证获得两个正交的线偏振态。为了解决第一个问题,采用 SOA 作为偏振旋转器件,目前已经知道 SOA 的偏振旋转速度可以达到皮秒的量级^[7]。

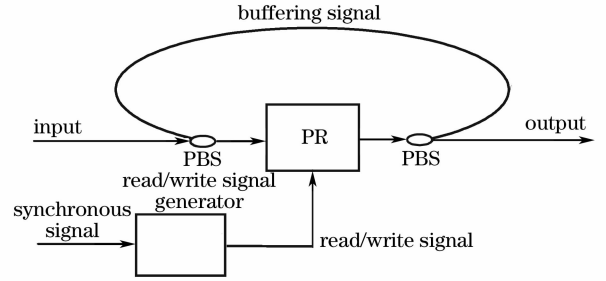


图 1 基于 SOA 偏振旋转的光缓存器模型

为了解决第(2)个问题,首先要研究偏振态在 SOA 中的演化。如果用 \mathbf{S}_{in} 表示 SOA 输入光偏振态的斯托克斯矢量; \mathbf{S}_{out} 表示输出偏振态的斯托克斯矢量,则关于 SOA 的偏振旋转,前人已经得出^[8]

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M}_{SOA} \mathbf{S}_{in}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{M}_{SOA} 是 SOA 的密勒矩阵

$$\mathbf{M}_{SOA} = \frac{G^2}{4} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & 0 & 0 \\ \cos 2\theta & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin 2\theta \cos 2\Delta\varphi & -\sin 2\theta \sin 2\Delta\varphi \\ 0 & 0 & \sin 2\theta \sin 2\Delta\varphi & \sin 2\theta \cos 2\Delta\varphi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 θ 由 SOA 中的 TE 与 TM 两个模式偏振相关增益所决定, $\cos \theta = \frac{G_{TE}}{\sqrt{G_{TE}^2 + G_{TM}^2}}$; $\Delta\varphi$ 由 TE 和 TM 两个模的相位差所决定, $\Delta\varphi = (\varphi_{TE} - \varphi_{TM})/2$ 。但是由于 SOA 与偏振分束器 PBS 的连接都采用光纤,而光纤的偏振态会随着长度变化而改变,因此无法确定 SOA 中的 TE 与 TM 模的坐标方向,所以描述 SOA 特性的(2)式并不能够在实际中应用。为了使 SOA 与偏振分束器 PBS 的坐标系一致,在它们之

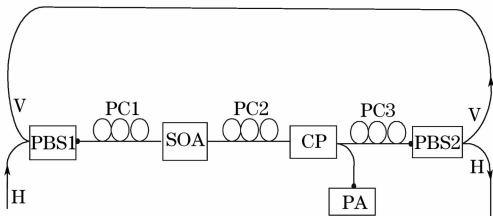


图 2 基于 SOA 偏振旋转的光缓存器的原理图

Fig. 2 Principle of the optical buffer based on the

PR in SOA

间引入了偏振控制器 PC1 和 PC2,如图 2 所示。考虑从偏振分束器 PBS1(在此起到偏振合束器的作用)的输出端到偏振分束器 PBS2 之间的偏振态的演化,有

$$\mathbf{S}_{2in} = \mathbf{N}_2 \mathbf{M}_{SOA} \mathbf{N}_1 \mathbf{S}_{1out}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{S}_{1out} 表示 PBS1 的输出偏振态, \mathbf{S}_{2in} 表示 PBS2 的输入偏振态, \mathbf{N}_1 表示 PC1 的密勒矩阵, \mathbf{N}_2 表示 PC2 的密勒矩阵,它们都已经考虑了坐标变换。当 PC1 和 PC2 调整好以后,它们不受读写信号的控制,可视为常量。 \mathbf{M}_{SOA} 则受 SOA 注入电流(读写信号)的控制,可表示为 $\mathbf{M}_{SOA} = \mathbf{M}_{SOA} \{i(t)\}$ 。当注入电流 i 改变时,有

$$\frac{\partial \mathbf{S}_{2in}}{\partial i} = \mathbf{N}_2 \frac{\partial \mathbf{M}_{SOA}}{\partial i} \mathbf{N}_1 (\mathbf{N}_2 \mathbf{M}_{SOA} \mathbf{N}_1)^{-1} \mathbf{S}_{2in}, \quad (4)$$

忽略偏振控制器的损耗,有 $\mathbf{N}_1 \mathbf{N}_1^{-1} = \mathbf{I}$,于是可得

$$\frac{\partial \mathbf{S}_{2in}}{\partial i} = \mathbf{N}_2 \frac{\partial \mathbf{M}_{SOA}}{\partial i} \mathbf{M}_{SOA}^{-1} \mathbf{N}_2^{-1} \mathbf{S}_{2in}. \quad (5)$$

在庞加莱球上,由于 $\partial \mathbf{S}_{2in} / \partial i$ 与 \mathbf{S}_{2in} 始终垂直,

所以矩阵 $\mathbf{P} = \mathbf{N}_2 \frac{\partial \mathbf{M}_{\text{SOA}}}{\partial i} \mathbf{M}_{\text{SOA}}^{-1} \mathbf{N}_2^{-1}$ 就描述了偏振态

在庞加莱球上的旋转方向和速度,此旋转存在一个不动点 \mathbf{S}_{20} ,它不随 i 变化,通常被称为偏振主态 (PSP),这个概念已经广泛地应用于偏振模色散补偿^[9,10]。为了在实验中测得 PSP,可按如下步骤进行操作,如图 3 所示。

1.1)先给定任意一个 \mathbf{S}_{2in} ,它处于庞加莱球的任意一点,然后调节电流,它将在庞加莱球上画出一个圆弧。调节 PC1 使得 \mathbf{S}_{2in} 移动到圆弧的内部,再次改变电流,将得到一个比前一次小的圆弧;重复这样的操作,圆弧越来越小,直到基本缩小为一个点。

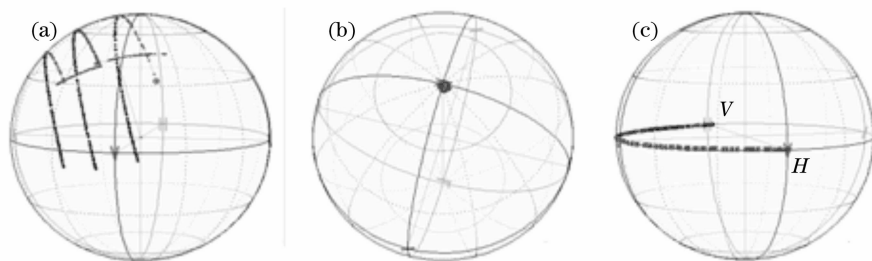


图 3 偏振态在庞加莱球上的演化

Fig. 3 Polarization evolution on Poincaré sphere

经过这个过程之后,从 PBS1 的 H 端输入的信号,通过调节 SOA 的电流,PBS2 输入端的偏振态很容易在 H 态与 V 态之间转换。但是由于现有的偏振分析仪不能够测出偏振态的瞬时变化,依然无法观测到偏振态变化的信号。为此,只能在偏振分束 PBS2 后面观察,因此还需要保证 PBS2 输出的 H 端与 V 端也要对准。但是,在 PBS2 输出的 H 端与 V 端只能观察到线偏振态,所以单纯依靠观察 PBS2 的两个输出端无法确定是否对准。为此在 PC2 与 PBS2 之间引入一个耦合器与一个偏振控制器 PC3,在耦合器的另一个输出端接入偏振分析仪 PA。首先将 PA 的坐标系与 PBS1, SOA 等调成一致;即当 PBS1 从 H 端输入时,PA 显示也在 H 点;当 PBS1 从 V 端输入时,PA 显示也在 V 点;当 SOA 电流变化时,PA 显示在赤道上旋转。当输入为 PSP 时,PA 显示在北极。理论上,在耦合器 CP 的输出偏振态 \mathbf{S}_{cp} 与 PBS2 输入端的偏振态 \mathbf{S}_{2in} 有

$$\mathbf{S}_{2in} = \mathbf{N}_3 \mathbf{S}_{cp}, \quad (6)$$

其中 \mathbf{N}_3 是 PC3 的密勒矩阵。而 PA 接收端的偏振态 \mathbf{S}_{PA} 与耦合器 CP 的输出偏振态 \mathbf{S}_{cp} 的关系为

$$\mathbf{S}_{PA} = \mathbf{F} \mathbf{S}_{cp}, \quad (7)$$

式中 \mathbf{F} 是 CP 和 PA 之间光纤的密勒矩阵。从(6)式和(7)式可以看出,只要调节 $\mathbf{N}_3 = \mathbf{F}$,即可以认为

这时表明已经找到了不动点,但是坐标系还没有对准,如图 3(a);

1.2)调节 PC2 使得不动点 \mathbf{S}_{2in} 移动到北极或者南极;这表明偏振主态已经处于北极或者南极,如图 3(b);

1.3)调节 PC1 使得 \mathbf{S}_{2in} 移动到赤道的 V 点,改变电流,发现 \mathbf{S}_{2in} 沿着赤道旋转,如图 3(c)。经过几次调节,可以使 \mathbf{S}_{2in} 从赤道的 V 点调到 H 点,分别记下这两个点对应得电流。这表明偏振分束器、SOA 以及偏振分束器的输入端的坐标轴已经对准。

PA 所显示的偏振态,就是 \mathbf{S}_{2in} 的偏振态。这也就是要求 PBS2 的坐标系与 PA 的坐标系一致。为此,可以按照以下步骤进行:

2.1)当在 PBS1 输入 H 态(V 态)时,PA 显示 H 点(V 点),同时 PBS2 的 H 端(V 端)的输出达到最大,PBS2 的 V 端(H 端)的输出为 0;

2.2)当在 PBS1 输入 H 态时,改变 SOA 的注入电流,使 PA 显示从 H 点运动到 V 点,这时 PBS2 的 H 端的输出逐渐变小达到 0,PBS2 的 V 端的输出逐渐变到最大。幅度变化的规律应该与操作(1.3)的变化规律相同。

2.3)调整 SOA 的输入,使 PA 显示在北极或南极,这时 PBS2 的 V 端与 H 端的输出相等。

经过上述调整后,表示 PBS2 的 \mathbf{S}_{2in} 与 PA 的显示之间,赤道和北极都重合,从而保证了两个庞加莱球的坐标系完全重合。同时,就可以保证:

1)当 PBS1 从 H 端(V 端)输入时,如果 SOA 调整到直通态,光信号将从 PBS2 的 H 端(V 端)输出;

2)当 PBS1 从 H 端(V 端)输入时,如果 SOA 调整到切换态,光信号将从 PBS2 的 V 端(H 端)输出;

这样,当将 PBS1 与 PBS2 的两个 V 端口连接在一起,并用 PBS1 的 H 端口作为缓存器的输入端,用 PBS2 的 H 端口作为缓存器的输出端,就可

以很方便的完成“读写”与缓存的操作。

3 实 验

实验系统如图4所示,图4中半导体光放大器(SOA)采用 INOHENIX 公司的产品(SN: 860506050)。LD1、LD2 是两个波长为 1556.36 nm 的 DFB 激光器,LD1 为 2.5Gb/s 铌酸锂外调制器的

光源,1024 bits 的随机数据信号在脉冲码型发生器(PPG)中编辑产生。LD2 是可编程直接调制 DFB 激光器,用来产生一个幅度较大的参考脉冲,该参考脉冲直接通过 SOA,从 PBS2 的端口 H 通过,用来标记数据的开始。LD2 通过 PPG 发出的触发脉冲和信号光达到同步。窄带滤波器(FIL)用来滤除 SOA 自发辐射产生的噪声。

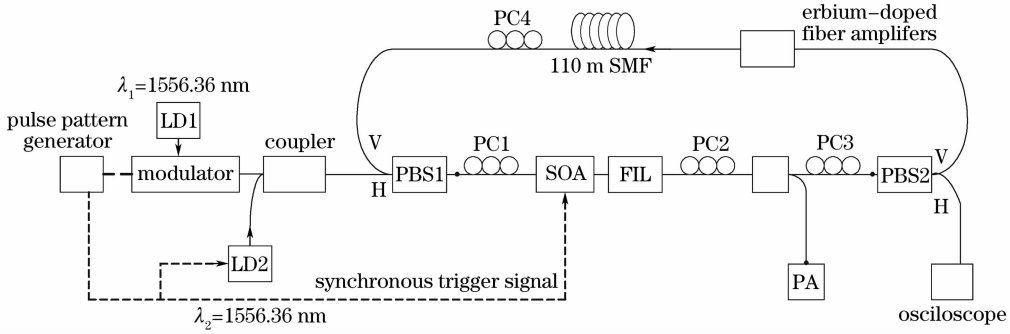


图 4 基于 SOA 偏振旋转的光缓存器的实验结构图

Fig. 4 Experimental setup of the all optical buffer based on nonlinear polarization rotation in SOA

实验中,当 SOA 产生一个“写”脉冲时,数据被写入光纤环中,然后经过时间 nT 后(T 表示光在光纤环中传输一圈所用的时间)时,“读脉冲”可以把数据从光纤环中读出来。实验中,光纤环采用 110 m 的单模光纤,PC4 用来调节控制光纤环中的偏振态。经测量,光脉冲绕行一周的时间为 910 ns。图 5(a)示出

1024 bits 的数据经过 1~6 圈的缓存结果。由于 PBS 的消光比有限,将在数据原来的位置处产生“漏光”(Leak)现象,如图 5(a)所示。其原因是:当 SOA 输出光的偏振态已经调到 V 态,但因为 PBS 的消光比有限,仍然有一部分光从 H 端输出。一般来说,很难使输入到 PBS 光的偏振态稳定在线偏振态,这将进一

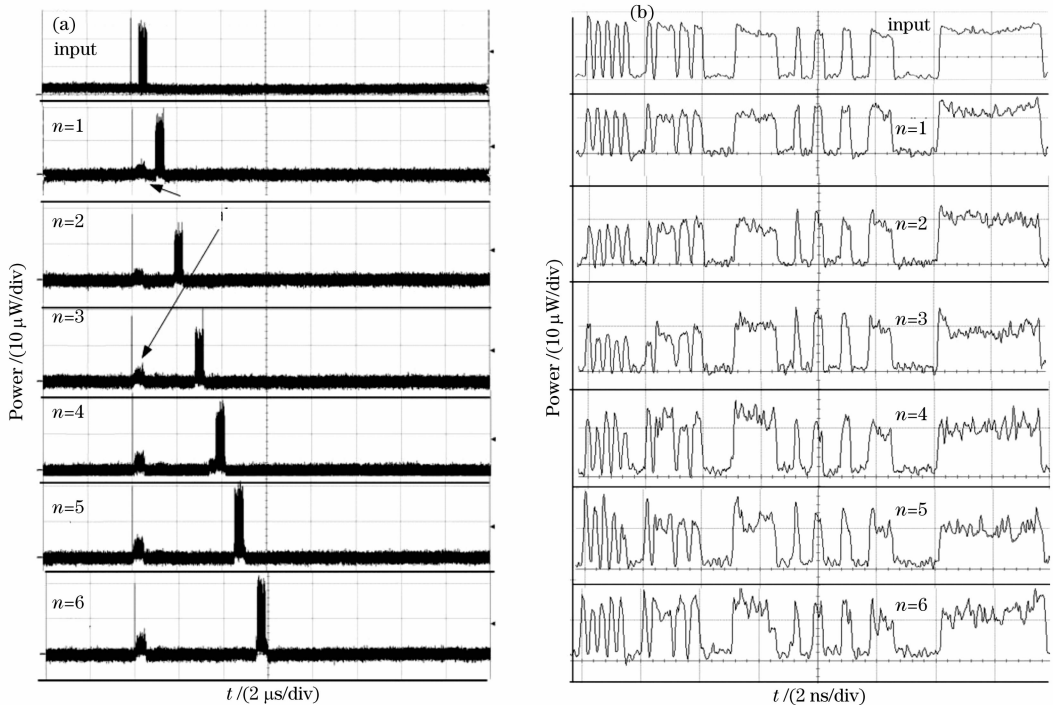


图 5 (a)基于偏振的全光缓存器的缓存结果图,(b)输入信号和输出信号的波形细节对比图

Fig. 5 (a) Experimental results of the all-optical buffer based on SOA PR, (b) waveform detail of the input data and output data

步加大漏光。如图 6 所示,当输入 PBS 光的椭圆度在 0.01~0.05 之间变化时,PBS 的消光比能劣化 10 dB 以上。图 5(b)是输入信号和输出信号脉冲细节对比图。从图 5(b)中可以看出,波形经过 2 圈的缓存后,波形仍然保持良好;经过 6 圈缓存后,波形有些劣化。波形劣化的原因是因为偏振态不能在光纤环中保持不变造成的。如何减少漏光现象以及经过多圈缓存后仍然保持信号的质量是下一步研究的问题。

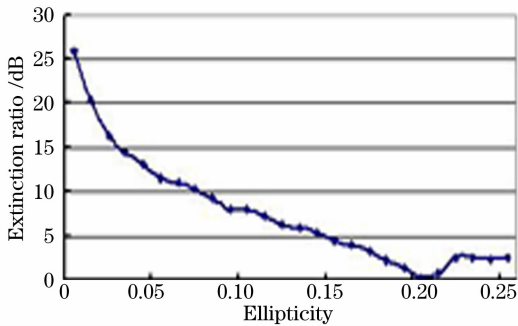


图 6 偏振分束器(PBS)的消光比和输入光椭圆度的关系
Fig. 6 Relationship between the extinction ratio of the PBS and the ellipticity of the input lights

4 结 论

提出了一种基于半导体光放大器(SOA)中非线性偏振旋转的全光缓存器结构,并且提出了一种利用偏振主态(PSP)寻找两个正交线偏振态的实验方法以及在线实时测量系统中偏振态的方法。利用 SOA 的密勒矩阵,说明了 SOA 中偏振态的演化。利用提出的全光缓存器结构,实现了速率为 2.5 Gb/s 的 1024 bits 的数据的 6 圈缓存。该缓存器中由于光信号可以不在光纤环中绕行而直接通

过,所以可以组合成各种结构灵活的缓存器。

参 考 文 献

- 1 Wu Chongqing. The fiber based all-optical buffer [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(5): 601~606
吴重庆. 光纤型缓存器的研究进展[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(5): 601~606
- 2 Anjali Agarwal, Lijun Wang, YiKi Su *et al.*. All-optical erasable storage buffer based on parametric nonlinearity in fiber [J]. *Optical Fiber Communication Conference and Exposition*, 2001, 1~3
- 3 J. M. Tang PS. Spencer. Analysis of operating characteristics of TOADs using gain saturation and nonlinear gain in SOAs[J]. *Proc-Optoelectron*, 1998, **145**(1): 83~87
- 4 Aiming Liu, Chongqing Wu, Yandong Gong *et al.*. Dual-loop optical buffer based on a 3×3 collinear fiber coupler[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(9): 2129~2131
- 5 Aiming Liu, Chongqing Wu, M. S. Lim *et al.*. Optical buffer configuration based on a 3×3 collinear fibre coupler [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(16):
- 6 Zhang Lijun, Wu Chongqing, Li Yajie. Novel read/write independently controllable all-optical buffer based on dual-semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1945~1948
张立军, 吴重庆, 李亚捷. 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[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1945~1948
- 7 A. K. Mishra, X. Yang, D. Lenstra *et al.*. Wavelength conversion employing 120-fs optical pulses in an SOA-based nonlinear polarization switch[J]. *J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, **10**(5): 1180~1186
- 8 Chongqing Wu, Yajie Li. Power equalization for the optical subsystems based on the SOA polarization rotation[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2007: CThF6
- 9 Songnian Fu, Chongqing Wu, Hui Dong *et al.*. A novel PMD compensation based on PMD vector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 945~950
付松年, 吴重庆, 董 晖 等. 基于偏振模色散矢量的偏振模补偿方案的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(8): 945~950
- 10 Dong Hui, Wu Chongqing. Effect on polarization mode dispersion due to eccentricity of refractive index distribution in a single-mode fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1312~1317
董 晖, 吴重庆. 单模光纤折射率分布对偏振模色散的影响[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1312~1317