

基于 SOA 全光偏振调制的双信道光传输系统的仿真与分析*

王颖, 王陆唐, 方捻[†], 赵莉, 黄肇明

(上海大学 a. 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室; b. 通信与信息工程学院, 上海 200072)

摘要: 仿真并分析了基于半导体光放大器全光偏振调制的双信道光传输系统模型. 该系统分别利用两级半导体光放大器的交叉偏振调制效应(XPolM), 将两路独立的强度调制的抽运光变换到一路探测光的两个正交的偏振态上, 实现双通道偏振复用的全光数据传输. 首先对单个半导体光放大器的动力学过程进行了理论分析, 数值计算了具有不同抽运光功率的半导体光放大器对探测光偏振态的影响, 进而对双半导体光放大器偏振复用系统的调制/解调原理进行了分析, 模拟仿真了双半导体光放大器的双通路偏振复用的调制及解调过程, 仿真结果与实验结果相符.

关键词: 全光通信; 交叉偏振调制; 复用/解复用; 半导体光放大器

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)11-3203-6

0 引言

在光通信系统中, 可以采用偏振复用技术来提高系统容量. 普通的偏振复用是将激光器输出的线偏振光分成两束正交偏振光, 对其分别进行信号调制, 接收端放置两个检偏方向相互垂直的检偏器, 分别检测出两路信号光^[1]. 该方式要求检偏器方向必须与发射端信号光的两个偏振方向分别一致, 并且通信光路必须使用保偏光纤, 成本较高. 而我们曾报道了一种新的基于半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)全光偏振调制的双信道 PolSK 光传输系统^[2], 通过两级 SOA 各自的偏振调制效应实现双通道的光数据传输, 提高了通信容量, 且接收端只需检测偏振光分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)的输出即可恢复初始信号, 从而简化了解复用系统的操作, 降低了成本. 本文分析了该偏振复用系统的理论模型, 详析了其调制/解调原理, 对其性能进行数值计算, 并将仿真结果与实验结果相对照, 证实可将该系统应用于全光通信.

1 全光偏振调制复用系统分析

随着光通信技术的发展, SOA 的非线性效应如交叉增益调制、交叉相位调制以及四波混频^[3-4]已经被广泛研究, 而交叉偏振调制因其转化速度快, 消光比高受到极大关注.

交叉偏振调制 XPolM 是 SOA 中特有的一种光-光非线性效应, 其主要原理是: 当探测连续光与携带有信息的抽运光同时注入 SOA 中时, 强功率的抽运光通过改变 SOA 波导层中的载流子浓度来改变波导层的折射率, 折射率的变化使得探测光的 TE 模和 TM 模的相位发生改变, 导致探测光的偏振态随之改变, 从而将抽运光上携带的信息调制到探测光偏振态上. 利用光光交叉偏振调制效应, 可以实现波长变换器^[5-6]、全光逻辑门^[7]、全光缓存器^[8]等全光通信系统关键器件.

原理上, 可设 SOA 晶体的 x 和 y 轴向方向分别为 TE 模电场和 TM 模横向电场振动方向, 探测光的 TE 模和 TM 模经过一个 SOA 后的幅度放大倍数和相位变化量可以表示为^[9]

$$A_{x,y} = \exp [(\Gamma_{x,y} g_{x,y} - \alpha_{\text{int}}^{x,y})L/v_g] \quad (1)$$
$$\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_y = \frac{\alpha_x \Gamma_x g_x - \alpha_y \Gamma_y g_y}{2v_g} \cdot L$$

式中 v_g 为群速度, α 为线宽展宽因子, Γ 为限制因子, α_{int} 为传输模式损耗, L 为波导长度, 增益函数 g 的大小由 x, y 两轴方向上的载流子浓度所决定. 基于上式, 可以将 SOA 的调制作用转化成抽运光对探测光的幅度和偏振态的影响, 从而可以利用琼斯矩阵加以表述.

实验系统如图 1. 初始线偏振的探测光(E_{in})经偏振控制器(PC₁)调整成与 SOA₁ 的 x 轴成 45° 并注入 SOA₁. 携带有信号 D₁ 的抽运光通过光纤环行器作用于 SOA₁, 并通过 PC₄ 调整其偏振态. 在 SOA₁ 内部, D₁ 抽运光与探测光通过光-光相互作用形成 XPolM 效应, 将 D₁ 抽运光的“1”码状态调制到输入探测光的 TE 分量上, 即通过 SOA₁ 后原来

* 国家自然科学基金(60577042)、上海市重点学科和科委重点实验室(S30108、08DZ2231100)资助

[†] Tel: 021-56332285 Email: nfang@staff.shu.edu.cn

收稿日期: 2008-09-09

修回日期: 2008-12-22

的 TE 分量发生旋转. 经 PC_2 将 SOA_1 输出 TE 分量调整至平行于 SOA_2 的 x 轴方向上. 同样, 调整 PC_5 使输入到 SOA_2 的探测光的 TM 分量在 D_2 抽运光为“1”码时发生旋转而 TE 分量并不变化. 这样就可以完成将 D_1 、 D_2 两组抽运信号分别调制到探测光两个正交偏振分量上, 实现双信道偏振信号的调制.

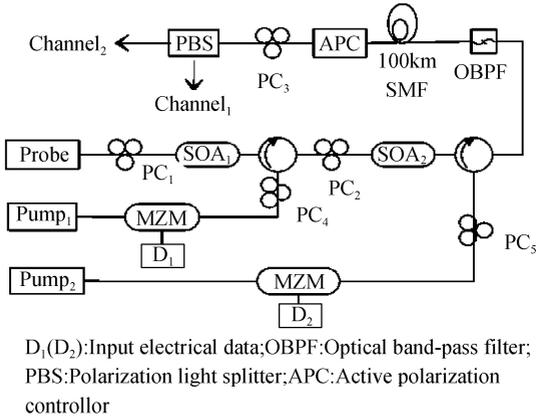


图1 系统装置
Fig.1 Experimental setup

应当指出, D_1 和 D_2 为“0”码状态时, 探测光偏振状态变化均微小, 所以在偏振接收解复用方面只需通过两个正交检偏器 (PBS) 对 D_1 和 D_2 为“1”码时检测光的偏振态变化分别进行偏振检测即可, 使解调方法大大简化.

在发射端, 输出的偏振复用光经过光带通滤波器 OBPF 滤波后, 注入传输光纤. 在接收端, 经长距离光纤传输之后, 受环境缓慢变化的影响, 传输信号光的偏振状态即庞加球上的星座图将发生改变. 与高速调制所产生的偏振态变化相比, 这种由环境因素所引起的偏振态变化一般为无规的缓变, 因此可以认为信号的星座图变化为刚性的, 即信号光中各偏振状态的相对位置保持不变^[10]. 故此, 若在接收端采用一个稳偏器 (APC) 可将传输信号光的偏振状态稳定下来实现稳定接收. 最后, 由 PC_3 (起半波片作用) 调整传输信号光偏振态使之与 PBS 光轴方向对齐. 这样 PBS 输出就为两路强度调制输出信号, 然后由光电探测器探测转换为电信号, 从而完成接收信号的偏振解复用, 恢复出原来的 D_1 和 D_2 调制信号.

基于上述分析, APC 和传输光纤的联合琼斯矩阵可以用一个幺阵来表示, 即有 $M_{APC} M_{Fiber} = 1$. 同时, 假定两个光纤环形器对光的偏振态没有影响, 则最终信号传输后输出电场 E_{out} 可表示为

$$\begin{bmatrix} E_{out}^x \\ E_{out}^y \end{bmatrix} = M_{PBS} M_{PC_3} M_{APC} M_{Fiber} M_{SOA_2} \cdot$$

$$M_{PC_2} M_{SOA_1} \begin{bmatrix} E_{in}^x \\ E_{in}^y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{式中 } M_{SOA_{1,2}} = \begin{bmatrix} A_{1,2} e^{j\Delta\varphi_{1,2}} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_{PC_2} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta e^{j\frac{\delta}{2}} + \sin^2 \theta e^{-j\frac{\delta}{2}} & 2j \sin \theta \cos \theta \sin \frac{\delta}{2} \\ 2j \sin \theta \cos \theta \sin \frac{\delta}{2} & \cos^2 \theta e^{-j\frac{\delta}{2}} + \sin^2 \theta e^{j\frac{\delta}{2}} \end{bmatrix}$$

$$M_{APC} \cdot M_{Fiber} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{PC_3} = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta - \sin^2 \beta & \sin 2\beta \\ \sin 2\beta & -\cos^2 \beta + \sin^2 \beta \end{bmatrix}$$

$$M_{PBS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{平行 } \beta \text{ 方向}$$

$$M_{PBS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{垂直 } \beta \text{ 方向} \quad (3)$$

A_i 和 φ_i 分别表示探测光通过 SOA_1 和 SOA_2 之后, TE 模和 TM 模之间的振幅比与相位差. θ 和 δ 分别为 PC_2 的方位角和相位延迟量, β 为 PC_3 的方位角. 为实现偏振调制复用和解复用功能, 只需调整各个阶段的 PC, 这无疑大大减轻了系统调整的复杂性, 提高了其实际可操作性.

2 仿真结果与实验

实验系统所采用的两个 SOA 均为 COVEGA 公司产品 (SOA1013), 其有源波导长度为 $1\,500\ \mu\text{m}$. 设输入的连续探测光波长为 $\lambda_p = 1\,530.3\ \text{nm}$, 光功率为 $-2\ \text{dBm}$. 抽运光 1 的波长为 $\lambda_1 = 1\,539.8\ \text{nm}$, 经强度调制器 (MZM) 后输入到 SOA_1 中的平均光功率为 $4\ \text{dBm}$. 抽运光 2 的波长为 $\lambda_2 = 1\,549.3\ \text{nm}$, SOA_2 的输入平均光功率为 $10\ \text{dBm}$. 仿真中采用的各光参量尽可能与实验系统相一致. 因 SOA 某些内部参量不详, 仿真中采用了相近似的 SOA 模型, 其参量指标如表 1. 实验中因仪器性能所限, 两组调

表 1 SOA 参量

参量	符号	值
Confinement factor	$\Gamma_{x,y}$	0.15, 0.10
Phase modulation coefficients	$\alpha_{x,y}$	5, 5
Modal loss	$\alpha_{int}^{x,y}$	0.3, 0.3 ps^{-1}
Gain coefficient	$\xi_{x,y}$	5.8, 5.5 $\times 10^{-9}\ \text{ps}^{-1}$
Electron-hole recombination time	T_1	250 ps
Hole-hole relaxation time	T_2	0.1 ps
Optical transition state number	N_0	3e8
Group velocity	v_g	100 $\mu\text{m}/\text{ps}$
SOA length	L	1 500 μm
Hole population imbalance factor	f	0.5
Electrical current	I	500 mA

制数据的码速率均设为 630 Mbps,为简便起见,仿真中采用了两组速率为 1 Gbit/s 的方波信号.

图 2 为实测的单级 SOA 作为相位调制器时,抽运光功率的大小对探测光偏振态的影响.由图 2 可看出,增加抽运光功率对探测光的偏振态有很大的影响.若二进制“0”码相当于低抽运功率、“1”码对应于高抽运功率,那么“0 码”与“1 码”的偏振状态显然在庞加球星座图上处于两个正交偏振点上.

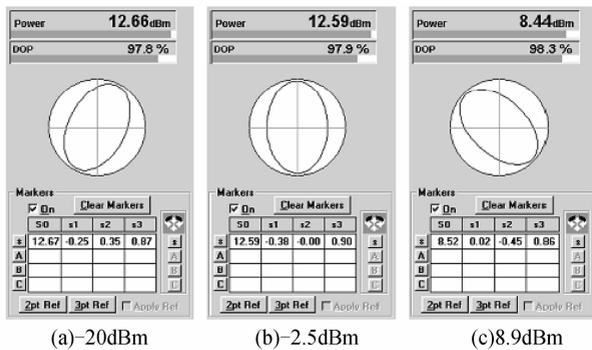


图 2 不同抽运光功率作用下 SOA 输出探测光偏振态的实测结果
Fig. 2 The measured results of the output probe light's SOP at different pump power

按 SOA 理论模型仿真计算了的抽运光功率对 SOA 的 XPolM 效应的影响^[7].图 3 表明在 SOA 的光-光相互作用下,随着抽运光功率的增加,探测光

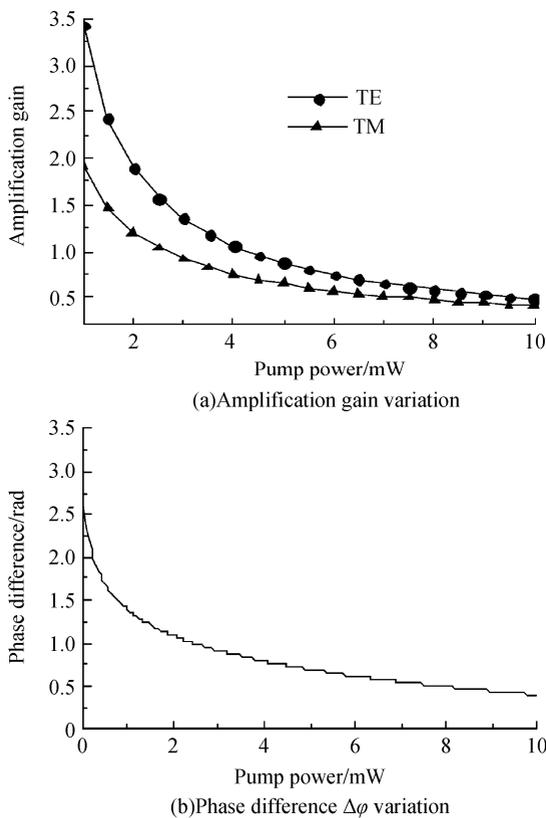


图 3 仿真的抽运光功率对探测光的 TE 与 TM 模的影响
Fig. 3 Simulated pump power's impact on TE and TM modes of probe light

的 TE 和 TM 振幅随之下降(图(a)),而 TE 与 TM 两分量的相位差也随之减小(图(b)).且当光功率为 -20 dBm(0.01 mW)和 10 dBm(10 mW)时,相应的相位差值的变化幅度可达 140°左右.这一仿真结果与图 2 的实验结果定性符合.由于表 1 所给出的参量不一定与实验系统完全一致,因此很难进行定量比较.

由此可知,选择适当的抽运光功率,同时调整两 SOA 之间的 PC₂,可使经 SOA₁ 调制后输出探测光的偏振态与其经 SOA₂ 调制后输出探测光的偏振态近乎垂直,从而实现在两个相互正交的偏振态上传输和恢复两路独立信号.实验结果图 2 也证实了本方案的可行性.

根据本文理论模型,对该偏振复用系统进行了数值模拟.利用两路伪随机信号作为分别调制抽运光 1 和抽运光 2 的 D₁ 和 D₂ 数据流.部分仿真时间段的码型如图 4.为了取得较好的交叉偏振调制效果^[11],首先假定连续探测光以 45°线偏振态注入 SOA₁,此时接收端 PBS 两个正交方向上的输出如图 5.

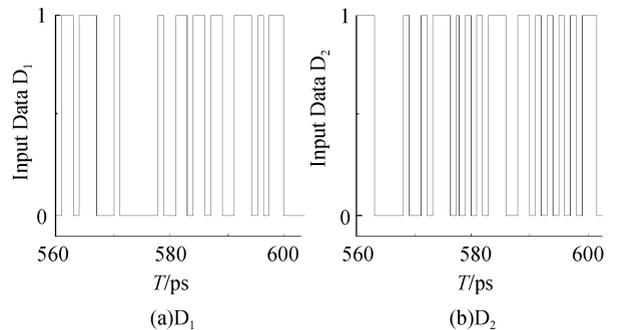


图 4 输入电信号
Fig. 4 Input electrical signal

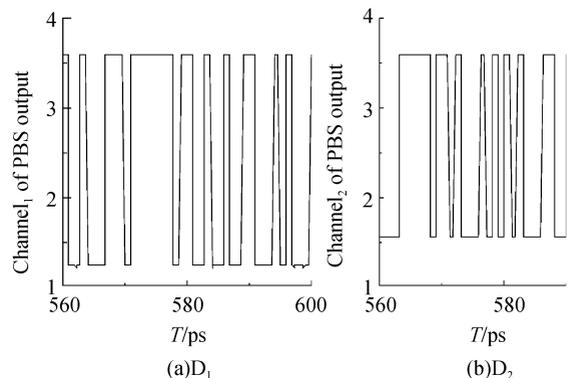


图 5 探测光 45°注入时,检测输出
Fig. 5 Detected outputs,when probe light is at 45°to SOA₁

由图 4 与图 5 可看出,基于 SOA 全光偏振调制的光复用传输系统实现了双通道输出(注意解复用信号与调制信号为反相).

图 6 为该偏振复用光传输系统的实际实验传输测量结果.光纤传输距离为 100 km,图中为通过

PBS后输出端检测信号.示波器的4路输出中,第二路和第四路即为输入的调制数据信号波形,第一路和第三路分别为相应的解复用输出信号波形.由实验结果可看出,两通道信号走离较小,具备长途通信能力.而仿真中未考虑光纤长途传输的非线性效应,输出结果较为理想,但未作误码率测量.

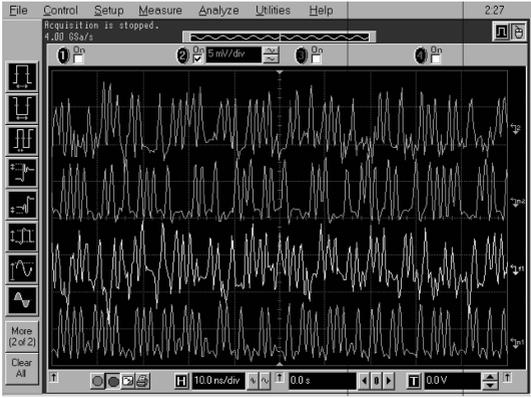


图6 100 km 光纤传输后实验测量结果
Fig. 6 Measured results for 100 km transmission

当探测光分别以 0° 和 90° 的线偏角注入 SOA_1 时,相应的检测输出如图7和图8.

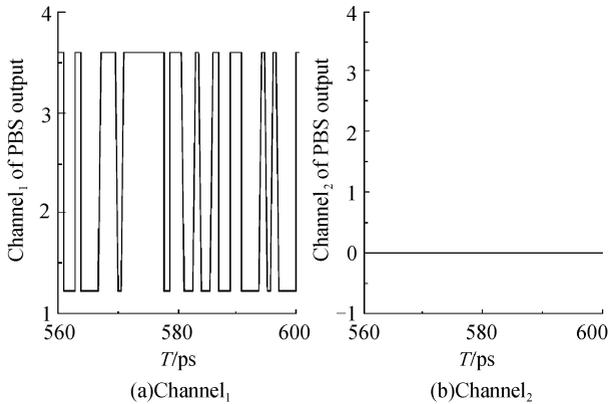


图7 探测光 0° 时,检测输出
Fig. 7 Detected outputs, when input probe light is at 0° to SOA_1

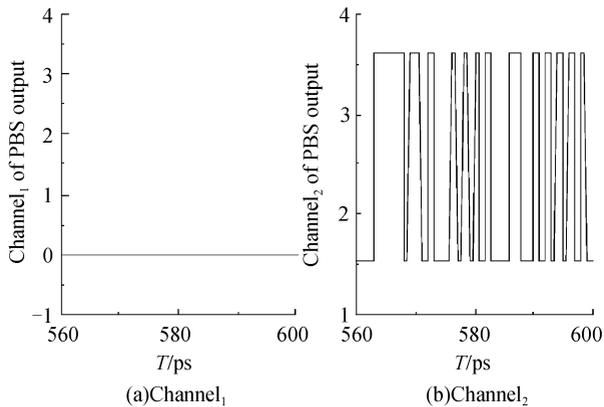


图8 探测光 90° 时,检测输出
Fig. 8 Detected outputs when input probe light is at 90° to SOA_1

由图7可看出,探测光以 0° 注入 SOA_1 时,携带

了 D_1 信号,经过 PC_2 后, SOA_2 的调制作用失效;由图8可看出,探测光以 90° 注入时, SOA_1 的偏振调制作用失效,亦即探测光以垂直 SOA 波导层的偏振方向入射时, SOA 的偏振调制不起作用,该结果与文献[11]中结论相符.

图7和图8的仿真结果也证实,若将携带 D_1 的已调探测光的偏振状态调至 SOA_2 的 x 轴向方向,且第二级抽运信号光沿着 y 轴向方向进入 SOA_2 ,则可实现 SOA_2 输出的已调探测光 TE 方向上携带 D_1 而 TM 方向上携带 D_2 ,理论实现双 SOA ,双通道数据的无串扰输出.

在数值仿真中,分别开关 D_1 和 D_2 数据流,来模拟 SOA 的交叉增益调制效应的影响.仿真结果如图9,由图9可看出,当关闭信号 D_2 时,探测光通过 SOA_1 中交叉偏振调制后变成已调光,之后受到 SOA_2 的交叉增益效应调制,从而使得 SOA_2 的输出信号幅度略有波动.关闭 D_1 时情况类似.

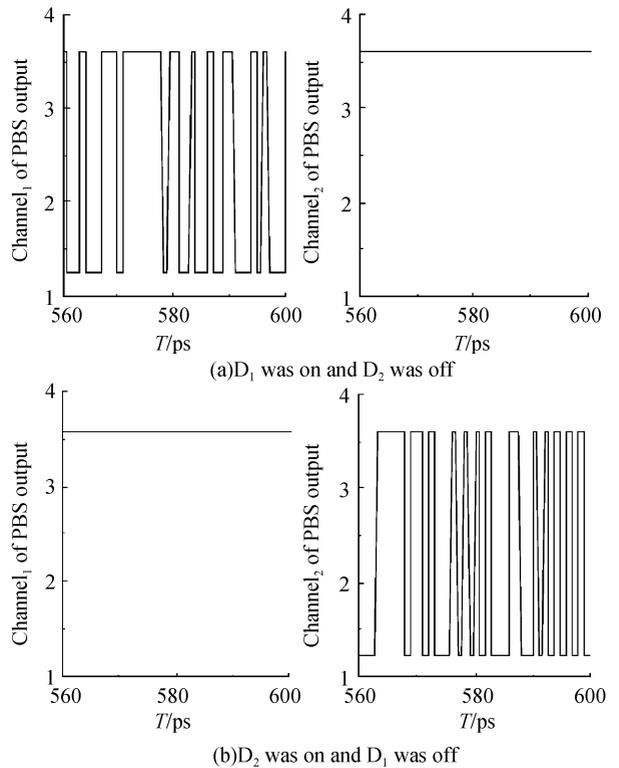


图9 关闭通道2(a)关闭通道1(b)时的检测输出
Fig. 9 Detected outputs, with one channel of input data

图10是当关闭 D_2 时,实验室实测的 XGM 效应对系统的影响,仿真图形和实验结果相符合.

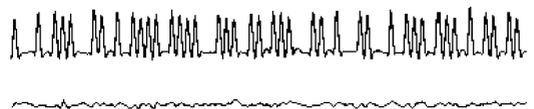


图10 关闭 D_2 时的实测光信号波形
Fig. 10 Measured optical signal waveforms when D_1 was on and D_2 was off

仿真和实验结果均显示,该偏振复用光通信系

统可以完整地实现双通道数据的复用与解复用,进一步的实验结果还表明该系统可以传输两组不同波形不同码速的信号^[2].

应当特别指出,XPoIM 是在 SOA 内部的光—光相互作用,因此调制码率高,可远远高于目前实验所采用的 630Mbps 码率.

3 结论

本文对 SOA 的动力学特性进行模拟与仿真分析,讨论了抽运光功率对交叉偏振调制效应的影响.在此基础上,分析了基于 SOA 将强度调制的偏振光变换为偏振态调制的全光双信道光复用传输系统的理论模型.仿真与实验结果表明,该复用系统具有如下优点:1)光—光相互作用的 XPoIM 对调制码率限制少,不难实现高码率调制;2)按上述原理实际上是形成 4-PolSK 调制,因此理应采用 Stokes 接收机解调,但经我们巧妙地利用 PBS 实现正交偏振的直接解复用.这种方式在保证接收效率的前提下,远比高码率的 Stokes 接收机要经济得多.

参考文献

- [1] ZHU Jun, ZHANG Shu-lian. Circularly polarized light polarization multiplexing laser communication system [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(2): 78-79, 99.
朱钧,张书练.圆偏振光偏振复用激光通讯系统[J].激光与红外, 2005, **35**(2): 78-79, 99.
- [2] WANG Lu-tang, FANG Nian, WANG Ying, *et al.* Dual-channel PolSK optical transmissions using SOA-based all-optical polarization modulations[C]. 2008' China Information Optics and Photonic Devices Conference, 2008: 122.
王陆唐,方捻,王颖,等.基于 SOA 全光偏振调制的双信道 PolSK 光传输系统[C]. 2008' 全国信息光学与光子器件学术会议, 2008: 122.
- [3] ZHANG Hong-bin, QIU Kun, LI Zhong-gui. Investigation on characteristics of all-optical wavelength converter based on SOA-XGM[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3): 337-344.
张宏斌,邱昆,李中桂.基于半导体光放大器交叉增益调制(SOA-XGM)波长变换器仿真研究[J].光子学报, 2002, **31**(3): 337-344.
- [4] DONG Jian-ji, ZHANG Xin-liang, HUANG De-xiu. Chirp characteristics in wavelength converter based on single-port-coupled SOA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 255-258.
董建绩,张新亮,黄德修.基于单端耦合 SOA 的波长转换器啁啾特性分析[J].光子学报, 2005, **34**(2): 255-258.
- [5] ZHOU Yun-feng, ZHANG Jun-yi, WU Jian, *et al.* Simultaneous inverted and non-inverted wavelength conversion based on cross polarization modulation in semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1035-1037.
周云峰,张君毅,伍剑,等.基于半导体光放大器交叉偏振调制效应实现正、反相波长变换[J].光子学报, 2006, **35**(7): 1035-1037.
- [6] XU L, GLESK I, BABY V, *et al.* All-optical wavelength conversion using SOA at nearly symmetric position in a fiber-based sagnac interferometric loop [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(2): 539-541.
- [7] GUO L Q, CONNELLY M J. All-optical AND gate with improved extinction ratio using signal induced nonlinearities in a bulk semiconductor optical amplifier[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(7): 2938-2943.
- [8] WU Chong-qing. Interaction of two light beams in semiconductor optical amplifier and its applications for all-optical signal processing (II) [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(11): 12-17.
吴重庆.半导体光放大器的光-光相互作用及在全光信号处理中的应用(II)[J].激光与光电子学进展, 2007, **44**(11): 12-17.
- [9] DORREN H J S, LENSTRA D, LIU Y, *et al.* Nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers: theory and application to all-optical flip-flop memories [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, **39**(1): 141-148.
- [10] BENEDETTO S, POGGIOLINI P. Theory of polarization shift keying modulation [J]. *IEEE Trans Commun*, 1992, **40**(4): 708-721.
- [11] HUANG Li-rong, CHEN Hong-feng, HUANG De-xiu, *et al.* Relationship among several nonlinear effects in semiconductor optical amplifier [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2004, **32**(1): 84-86.
黄黎蓉,陈洪峰,黄德修,等.半导体光放大器中几种非线性效应关系研究[J].华中科技大学学报(自然科学版), 2004, **32**(1): 84-86.

Simulation and Analysis of Dual-channel Optical Transmissions Using SOA-based All-optical Polarization Modulations

WANG Ying, WANG Lu-tang, FANG Nian, ZHAO Li, HUANG Zhao-ming

(*a. Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Network ; b. School of Communication and Information Engineering , Shanghai University , Shanghai 200072, China*)

Abstract: A theoretical model of a dual-channel polarization optical transmission system is analyzed, using two semiconductor optical amplifiers (SOAs) to achieve all-optical polarization modulations with two input data streams. In this model, the signal polarization modulation is completed by utilizing the cross polarization modulation (XPoLM) effect in the SOA. A rate equation of the tensile-strained bulk SOA is adopted in the model. With this model, the dynamic characteristics of the system in respects of the amplification and the phase difference of the probe light in SOAs, signal polarization multiplexing and demultiplexing are investigated numerically. The simulated and experimental results are well consistent.

Key words: All optical communication; Cross polarization modulation; Multiplexing/demultiplexing; Semiconductor optical amplifier



WANG Ying was born in 1979, and is a M. S. degree candidate at Shanghai University. Her research interests focus on theory and application of all-optical cross polarization modulation based on SOA.