

文章编号: 0258-7025(2009)04-0842-04

# 半导体光放大器偏振旋转效应的矩阵分析及应用

李政勇<sup>1</sup> 吴重庆<sup>1</sup> 董辉<sup>2</sup> 沈平<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京交通大学光信息科学技术研究所, 北京 100044; <sup>2</sup> 新加坡南洋理工大学网络技术中心, 新加坡 637553)

**摘要** 应用 Mueller 矩阵的极分解, 对半导体光放大器(SOA)的偏振旋转效应进行了精确的实验分析。SOA 的 Mueller 矩阵可以分解为双折射  $M_R$ 、偏振相关增益  $M_D$ 、和去偏振  $M_\Delta$  三项, 其中  $M_R$  决定偏振旋转(PR)的角度  $\theta$ , 并可由公式  $\theta = \arccos[\text{Tr}(M_R)/2 - 1]$  计算。实验采用计算机控制的测量系统得到 SOA 的 Mueller 矩阵。分析结果表明, SOA 的自发辐射会降低输入信号的偏振度; PR 角只与输入波长成线性关系而与注入电流及输入光功率均为非线性关系。实验进一步研究了抽运探测方案中的光诱导偏振旋转(PPR)和交叉增益调制效应, 发现输出光的 PR 角及光功率与控制光强度非线性相关, 而且控制光大约为 3.5 mW 时即可产生正交偏振旋转。由此实现了一种光控的高速偏振开关, 此开关响应时间小于 300 ps, 可用于 Gb/s 级的高速数据通信。

**关键词** 光通信; 光控偏振开关; Mueller 矩阵方法; 半导体光放大器; 偏振旋转

中图分类号 TN929.11; O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0842

## Matrix Analysis for Polarization Rotation of Semiconductor Optical Amplifiers with Related Application

Li Zhengyong<sup>1</sup> Wu Chongqing<sup>1</sup> Dong Hui<sup>2</sup> P. Shum<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)  
(<sup>2</sup> Network Technology Research Centre, Nanyang Technological University, Singapore 637553)

**Abstract** This letter introduced the Mueller matrix method (MMM) with polar decomposition to precisely analyze the PR activities of semiconductor optical amplifiers (SOAs), where the SOA is described by a Mueller matrix  $M$  which is decomposed to a diattenuator  $M_D$ , a retarder  $M_R$ , and a depolarizer  $M_\Delta$ . The polarization rotation (PR) is determined by the retarder matrix  $M_R$ , and the rotation angle  $\theta$  can be calculated by  $\theta = \arccos[\text{Tr}(M_R)/2 - 1]$ . It employed a computer-controlled measurement system to obtain Mueller matrix  $M$  of the SOA. Experimental results showed the amplified spontaneous emission noise in SOAs will decrease the degree of polarization of optical signal. And the PR angle was linear to input optical wavelength, while it was nonlinear to injected current and optical power. Moreover we apply a pump-probe scheme to investigate the photoinduced PR and cross-gain modulation effects in the SOA, and we found both PR angle and output power were nonlinear to the controlling optical power while obtain the orthogonal PR by controlling of a  $\sim 3.5$  mW laser. Based on above results we realized a high-speed polarization switching with response time less than 300 ps, which is applicable to high-speed data communication at Gb/s.

**Key words** optical communication; optically controlled polarization switching; Mueller matrix method; semiconductor optical amplifier; polarization rotation

### 1 引言

半导体光放大器(SOA)是全光信号处理领域的一个重要器件,它具有体积小、工作波长范围大,而且易于与其他光电器件集成,并可作为增益与折

射率快速互作用的功能器件,譬如波长变换、全光开关、全光逻辑、全光触发器、全光缓存器等<sup>[1~5]</sup>。近几年,对 SOA 偏振效应的应用研究日益增长,1999 年 H. Soto 等<sup>[6]</sup>首次提出了交叉偏振调制(XPolM)

收稿日期: 2008-08-20; 收到修改稿日期: 2008-10-25

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z270)、国家自然科学基金(60877057)和北京交通大学优秀博士生科技创新基金(48032)资助课题。

作者简介: 李政勇(1974—),男,博士,主要从事光通信与偏振效应的研究。E-mail: 05118316@bjtu.edu.cn

导师简介: 吴重庆(1944—),男,教授,主要从事光纤技术领域的研究。E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn

的概念,并利用 Jones 矩阵研究了 SOA 的双折射变化规律。随后在 2001 年,2002 年他们相继实现了基于 XPolM 的全光异或门<sup>[7]</sup>和与门<sup>[8]</sup>。2005 年 G. Contestabile 等<sup>[9]</sup>利用 SOA 的非线性偏振旋转实现了 40 Gb/s 的波长变换。目前 SOA 的偏振旋转在高速全光信号处理及全光逻辑方面的应用越来越广泛,但研究其内在机制的报道却并不多见。本文应用 Mueller 矩阵的极分解,对 SOA 在各种情况下的偏振旋转效应进行了精确的实验分析,特别是深入研究了光诱导偏振旋转 (Photoinduced polarization rotation, PPR),实现了一种光控的高速偏振开关 (Polarization switch, PS)。

## 2 SOA 的去偏振特性与偏振旋转角的计算

SOA 具有较强的放大自发辐射 (ASE), ASE 噪声的偏振态杂乱无章,这必然会降低输出光信号的偏振度,即 SOA 具有一定的去偏振效应。为验证这一点,使用两台偏振分析仪 (Thorlabs, IPM5300) 分别测量 SOA 在不同注入电流下的输入输出光信号的偏振度,观察 SOA 在不同工作条件下的去偏振效应强弱 (用  $\Delta_{\text{DOP}} = \text{DOP}_{\text{in}} - \text{DOP}_{\text{out}}$  表示),实验结果如图 1 所示。

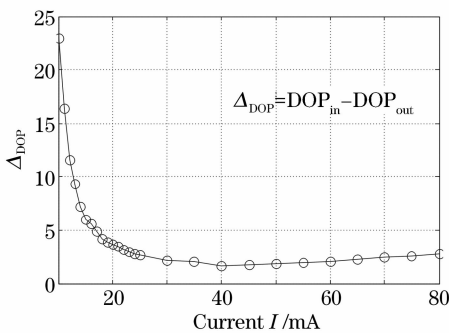


图 1 SOA 在不同注入电流下的去偏振效应

Fig. 1 Depolarization effect of SOA at different currents

从图 1 可以看出,在注入电流较小 (15 mA 以下) 时, ASE 占主要地位, SOA 的去偏振效应很明显,随着电流增加, SOA 的受激辐射逐渐占主导地位, ASE 噪声相对减弱, SOA 的去偏振效应也相应减小。但是,即使电流再大, ASE 也无法避免,因而总存在一定的去偏振效应 ( $\Delta_{\text{DOP}} > 0$ )。因此, SOA 的 Mueller 矩阵应该包含有去偏振项,这里用矩阵  $\mathbf{M}_{\Delta}$  描述。SOA 中还存在偏振旋转与偏振相关增益 (分别用矩阵  $\mathbf{M}_{\text{R}}$  与  $\mathbf{M}_{\text{D}}$  表示),那么 SOA 总的 Mueller 矩阵实际包含以上三项,根据文献<sup>[10]</sup>,这

正好对应 Mueller 矩阵的完全分解,即 SOA 的 Mueller 矩阵可表示为

$$\mathbf{M} = (m_{ij})_{4 \times 4} = \mathbf{M}_{\Delta} \mathbf{M}_{\text{R}} \mathbf{M}_{\text{D}}, \quad (1)$$

由于 SOA 没有起偏振作用,  $\mathbf{M}_{\text{D}}$  可以由下式完全决定<sup>[10]</sup>:

$$\mathbf{M}_{\text{D}} = m_{11} \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{D}^{\text{T}} \\ \mathbf{D} & m_{\text{D}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = D\hat{\mathbf{D}} = \frac{D\hat{\mathbf{D}}}{|\mathbf{D}|} = m_{11}^{-1} (m_{12}, m_{13}, m_{14})^{\text{T}}, \quad (2)$$

$$m_{\text{D}} = \sqrt{1 - D^2} \text{diag}[1, 1, 1] + (1 - \sqrt{1 - D^2}) \hat{\mathbf{D}} \mathbf{D}^{\text{T}},$$

式中  $m_{ij}$  为矩阵  $\mathbf{M}$  的元素。

因为  $\mathbf{M}_{\text{R}}$  为 U 矩阵,  $\mathbf{M}_{\Delta}$  为 Hermite 矩阵<sup>[10]</sup>, 它们恰好是矩阵  $\mathbf{M}\mathbf{M}_{\text{D}}^{-1} (= \mathbf{M}_{\Delta}\mathbf{M}_{\text{R}})$  的极分解<sup>[11]</sup>, 所以在测量出 SOA 的 Mueller 矩阵  $\mathbf{M}$  后, 根据 (2) 式求出  $\mathbf{M}_{\text{D}}$ , 然后通过矩阵极分解求出  $\mathbf{M}_{\text{R}}$ , 进而由其矩阵迹  $\text{Tr}(\mathbf{M}_{\text{R}})$  即可求出偏振旋转角<sup>[10]</sup>

$$\theta = \arccos[\text{Tr}(\mathbf{M}_{\text{R}})/2 - 1]. \quad (3)$$

## 3 基于 MMM 的 SOA 偏振旋转研究

实验采用计算机控制的偏振测量系统获得 SOA 的 Mueller 矩阵, 测量原理如图 2 所示。所用 SOA 为 Kamelian 公司的 OPA-20-N-C-FU, 驱动是 Laser Drive 公司的 LDI800。采用 Mueller 矩阵方法 (Mueller matrix method, MMM) 测量所需两台偏振分析仪 (Polarimeter 1, 2), 均为 Thorlabs 公司的 IPM5300, Mueller 矩阵由计算机程序通过所测输入输出偏振态运算得到。虚框中的抽运方案 (Pump Scheme) 用于 PPR 的研究。

实验首先研究了光源波长与 SOA 偏振旋转的关系。保证光源功率不变, SOA 的注入电流一定, 调节 TLS (Tunable laser source) 的波长在 1550 ~

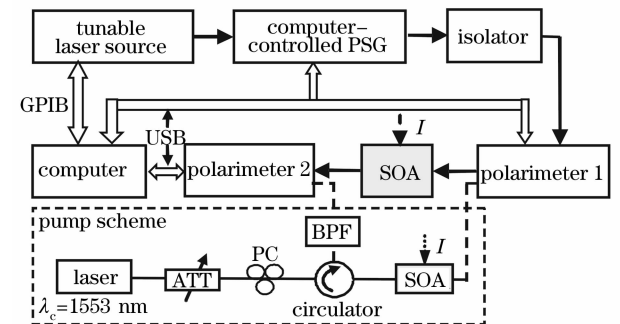


图 2 基于 MMM 的 SOA 偏振旋转特性研究实验原理

Fig. 2 Experimental setup for polarization rotation analysis of SOA based on MMM

1560 nm 范围内变化,每隔 0.5 nm 测量一组输入输出偏振态数据,计算对应的 Mueller 矩阵,然后根据(1)式~(3)式求出相应的偏振旋转角(PR角)。图 3(a)是 SOA 在工作电流为 100 mA 时的实验结

果,从图 3 可以看出,SOA 的旋转角随波长增加呈线性增大趋势,回归分析的结果表明线性决定系数  $R^2$  均接近于 1,这说明 SOA 的偏振旋转对波长具有良好的线性特点。

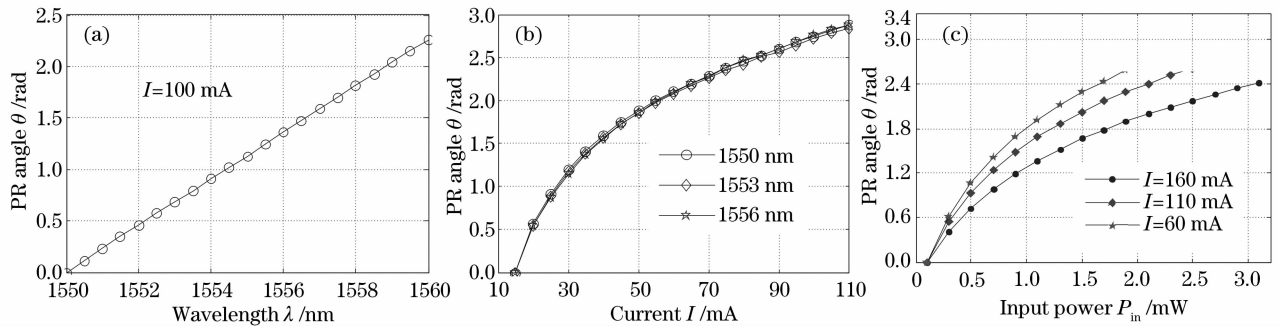


图 3 SOA 的偏振旋转规律。(a)随波长的变化;(b)随电流的变化;(c)随输入功率的变化

Fig. 3 PR characteristics of SOA with respect to (a) wavelength, (b) current, and (c) input power

接着分析了 SOA 的偏振旋转随注入电流及输入光功率的变化规律。图 3(b)是注入电流变化(15~110 mA)时,SOA 偏振旋转角的变化情况,图中给出了三个波长(1550 nm,1553 nm 及 1556 nm)的情形。当输入光功率在 0.1~3.2 mW 范围内变化时,偏振旋转角的变化规律如图 3(c)所示,其中 SOA 工作电流(注入电流)分别为 60 mA,110 mA 和 160 mA。

比较图 3(b)与图 3(c)可以看出,SOA 对注入电流和输入光功率这两个参数具有非线性偏振旋转特性,在参数值较小时,偏振旋转的速度较大,随着参数值增加,偏振旋转角增大,但旋转速度越来越小。并且波长对 SOA 偏振旋转随电流的变化规律几乎没有影响,如图 3(b)中曲线近似重合;但注入电流对 SOA 随光功率变化的偏振旋转规律影响很明显,如图 3(c)所示,电流越大,曲线越靠近纵轴,即曲线越陡,偏振旋转的速度越大。

上述结论表明 SOA 具有良好的偏振旋转特性,为实现快速的偏振态改变,实验对高速全光信号处理中常见的抽运-探测方案进行了研究,方案基本结构如图 2 中的虚框所示。为进一步分析清楚抽运光对探测光偏振态的影响,实验中使用图 2 的实验系统测量了不同抽运(1553 nm)光功率下,探测光的输出偏振态变化,其中 BPF 为带通滤波器,用于滤掉控制光及 SOA 的自发辐射噪声。为避免 SOA 饱和,探测光(1556 nm)的功率选取为 -10 dBm 左右。应用 MMM 方法,并通过计算得到输出光信号的功率及偏振旋转角。图 4 是抽运光在 0~3.9 mW 范围内变化时实验所测得的结果。从图 4 可以看出输

出光的 PR 角及光功率与控制光的强度均为非线性关系,并且抽运光到达 3.5 mW 时,PR 角变化为  $180^\circ$ ,即可以实现正交偏振旋转。这样,如果采用脉冲光抽运,保持脉冲幅度为 3.5 mW,那么探测光在脉冲“有”、“无”情况下的输出偏振态将会正交。

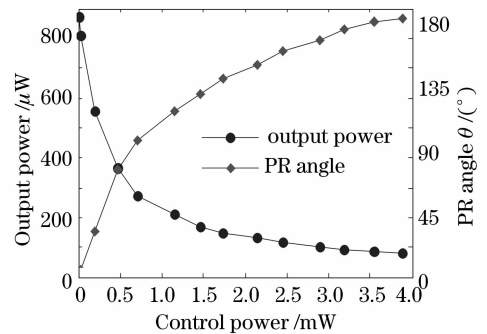


图 4 抽运-探测方案中光诱导偏振旋转实验结果

Fig. 4 Experimental results of PPR in pump-probe scheme

## 4 光控偏振开关

在正交偏振旋转的基础上,本文设计了如图 5 所示的高速光控偏振开关。其中 Laser1 为控制光(抽运光),脉冲码型发生器 PPG 产生 2.5 Gb/s 任意码流的电信号,驱动外调制器(EM)产生相应的脉冲控制光,光放大器 EDFA 进一步将脉冲幅度放大到 3.5 mW,最后由环行器进入 SOA。为便于说明,实验选取有一定代表意义的 12 位周期性码流 101001100010。Laser2 为信号光(探测光),经过衰减器(ATT)后得到大约 -10 dBm 的稳定激光,由偏振控制器(PC2)调整偏振态后进入 SOA,然后在控制光作用下进行正交偏振调制,最后由 0.4 nm

的带通滤波器(BPF)输出。正交偏振光信号被偏振分束器(PBS)分为 P, S 两路,由示波器(OSC: SDA5000A)观察波形。

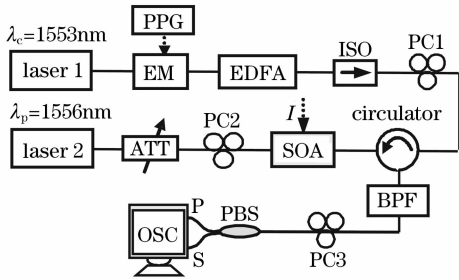


图 5 高速全光偏振开关实验装置

Fig. 5 Experimental setup of high-speed all-optical polarization switch

调节 PC3 使 PBS 正好完全分离两正交偏振光, 细调 PC1 进一步改善波形。图 6 是所观察到的 P 态(a)和 S 态(b)信号的波形,从图可以看出两路信号具有良好的互补性,这表明偏振调制的效果较好,实现了正交偏振旋转。图中的脉冲后沿小于 300 ps,说明此开关响应频率可达 GHz 级。另外,比较两路信号的幅度发现,S 态信号大约为 P 态信号的 4 倍,这是由交叉增益调制所引起的,要保证两路信号的功率均衡,最简单的办法只需在 S 态信号光路中添加一个 6 dB 的衰减器。

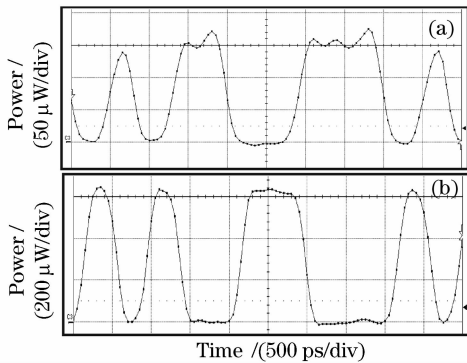


图 6 全光偏振开关实验结果。(a) P 态; (b) S 态信号

Fig. 6 Experimental results of all-optical polarization switch. (a) P-state; (b) S-state

当 Laser2 为高速通信信号(10 Gb/s 以上)时,图 5 所示的偏振开关方案就可以实现快速(GHz 级)数据分流或路由,比常用电控开关的微秒级水平提高数十倍。

## 5 结 论

在分析 SOA 的去偏振效应基础上,对其 Mueller 矩阵进行合理分解,得到决定偏振旋转的双折射项,并由此计算偏振旋转角度。实验采用计

算机控制的测量系统得到 SOA 的 Mueller 矩阵,分别对波长、注入电流及输入光功率所引起的偏振旋转进行了研究。结果表明,PR 角只与输入波长成线性关系而与注入电流及输入光功率均为非线性关系。实验进一步分析了抽运探测方案中的光诱导偏振旋转和交叉增益调制效应,发现输出光的 PR 角及光功率与控制光强度非线性相关,而且控制光大约为 3.5 mW 时即可产生正交偏振旋转。由此本文实现了一种光控的高速偏振开关,开关响应时间小于 300 ps,可用于高速数据通信。

## 参 考 文 献

- Hong Wei, Huang Dexiu, Sun Junqiang *et al.*. Numerical simulation of pico-second gain and index nonlinearities in semiconductor optical amplifiers (SOAs) [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9): 775~778
- 洪伟,黄德修,孙军强等. 半导体光放大器(SOA)皮秒增益和折射率非线性的数值模拟[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 775~778
- Zou Longfang, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Theoretical analysis on all-optical XOR using linear optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 895~902
- 邹龙方,潘伟,罗斌等. 基于线性光放大器的全光逻辑异或门理论分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 895~902
- Zhang Lijun, Wu Chongqing, Li Yajie. Novel read/write independently controlled all-optical buffer based on dual-semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1945~1949
- 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): 1945~1949
- Cheng Mu, Wu Chongqing, Zhao Rui *et al.*. All-optical buffer based on polarization rotation in semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1898~1902
- 程木,吴重庆,赵瑞等. 基于半导体光放大器偏振旋转的全光缓存器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1898~1902
- Peng Peng, Wu Chongqing, Tian Changyong *et al.*. Parallel buffering of dual-wavelength packets data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 835~839
- 彭鹏,吴重庆,田昌勇等. 双波长数据包并行缓存[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 835~839
- H. Soto, D. Erasme, G. Guekos. Cross-polarization modulation in semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8): 970~972
- H. Soto, D. Erasme, G. Guekos. 5-Gb/s XOR optical gate based on cross-polarization modulation in semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(4): 335~337
- H. Soto, C. Diaz, J. Topomondzo *et al.*. All-optical AND gate implementation using cross-polarization modulation in a semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(4): 498~500
- G. Contestabile, N. Calabretta, M. Resi *et al.*. Single and multicast wavelength conversion at 40 Gb/s by means of fast nonlinear polarization switching in an SOA [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2652~2654
- S.-Y. Lu, R. A. Chipman. Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(5): 1106~1113
- N. Higham. Computing the polar decomposition with applications [J]. *J. Sci. Statist. Comput.*, 1986, **7**(4): 1160~1174