

基于非线性偏振旋转效应的半导体光放大器级联式高速全光开关

朱 哲 盛新志 毛雅亚 吴重庆 王 苒 王 颖

北京交通大学理学院发光与光信息教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 根据级联半导体光放大器(SOA)的偏振主态对准(PSP)与邦加球相关性之间的关系,研究了多级SOA级联式系统的偏振主态对准方法。提出了基于非线性偏振旋转效应(NPR)的多级SOA级联式全光开关结构。实际搭建出两级SOA级联式全光开关实验系统,并以幅值为6 mW的方波控制光对50 μ W信号光实现了全光开关操作,开关速度达到200 ps,优于传统的电光开关,并存在较大的提升空间。工作波段位于1510~1570 nm,插损为3.62 dB,功耗为12 mW。开关速度快、插损小、功耗低并与光纤通信系统兼容性好。该全光开关的研制成功,将有助于推动全光开关和全光网络技术的发展,以及光计算和全光信号处理等领域的技术进步。

关键词 光学器件; 光开关; 级联; 半导体光放大器; 非线性偏振旋转

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0723001

Fast All-Optical Switch Based on Nonlinear Polarization Rotation in Cascaded Semiconductor Optical Amplifiers

Zhu Zhe Sheng Xinzhi Mao Yaya Wu Chongqing Wang Ran Wang Ying

Key Laboratory of Luminescence and Optical Information Technology of the Ministry of Education, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract The principle states of polarization (PSP) alignment in multilevel cascaded semiconductor optical amplifiers (SOA) system are studied based on the relationship between their PSP alignment and Poincare Sphere's correlation. Scheme of the all-optical switch is proposed based on nonlinear polarization rotation (NPR) in multilevel cascaded SOAs. An all-optical switch is demonstrated based on NPR in two cascaded SOAs. A light signal of 50 μ W is all-optically switched by a square wave control light of 6 mW, and the switching speed is 200 ps. The all-optical switch's wavelength band is from 1510 nm to 1570 nm, and its insertion loss is 3.62 dB and power consumption is 12 mW. The all-optical switch has advantages like high switching speed, low insertion loss and power consumption, and good compatibility with optical fiber communication system and will effectively promote the technology development in all-optical switch field and all-optical network field, as well as optical computing field and all-optical signal processing field.

Key words optical devices; optical switch; cascaded; semiconductor optical amplifier; nonlinear polarization rotation

OCIS codes 230.2285; 230.4480; 200.6715; 190.4360

1 引言

光开关在光通信、光计算及光传感等领域有重要的应用,尤其是在急需发展光路由技术的光纤通信领域,光开关是光交换技术发展的基础。全光开关因无光电转换引起广泛关注,作为全光网络、光计算和全光

收稿日期: 2015-02-04; 收到修改稿日期: 2015-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(61475016)、北京市自然科学基金(4122063)

作者简介: 朱 哲(1991—),男,硕士研究生,主要从事全光信号处理方面的研究。E-mail: 12121724@bjtu.edu.cn

导师简介: 盛新志(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信系统中的全光信号处理方面的研究。

E-mail: xzhsheng@bjtu.edu.cn(通信联系人)

信号处理等技术发展的基础性关键器件,已成为突破信息交换“电子瓶颈”、构建绿色全光网的重要支撑技术之一^[1-4]。光纤通信常用的 M-Z 型全光开关,开关时间可达亚纳秒量级,稳定性差限制了其应用^[5-6]。克尔效应全光开关,开关速度快,但控制光强要求高,且基于体材料,与光纤系统存在兼容问题^[7-9]。目前,全光开关技术发展的中心问题,仍在于极力提高开关速度等关键性能指标的同时,解决在光纤通信领域的实用化问题。

1986年, Poole 等^[10-11]提出偏振主态(PSP)概念,推动了多种新型功能器件的发展。半导体光放大器(SOA)非线性效应强、响应快、与光纤系统兼容且易于芯片级集成,广泛应用于光纤通信系统及全光信号处理的功能器件的研制^[12-15]。自 2003 年 Dorren 等^[16-17]提出 SOA 非线性偏振旋转(NPR)效应以来,SOA 的 NPR 效应在全光缓存、全光逻辑、波长变换等多方面获得了广泛应用。2008 年,本课题组程木等^[18]率先成功研制出基于 SOA 中 NPR 效应电光开关的全光缓存器,其中光开关的开关速度为 3 ns,消光比为 25 dB。2012 年,本课题组冯震等^[19]又将此型电光开关的消光比提高到 33 dB。但由于受商品级 SOA 性能参数的限制,基于单级 SOA 的 NPR 效应的全光开关,需要与克尔效应全光开关类似的超强控制光,才能对信号光进行 90°的偏振旋转以实现光开关的功能。控制光强度的提高,一方面带来系统复杂程度和硬件成本的提高,另一方面因交叉增益调制(XGM)效应影响的增强带来信噪比极大的下降。正因如此,较之同样基于 SOA 中 NPR 效应的电光开关,对该型全光开关的研究少了很多。SOA 的级联应用,可有效地突破单个 SOA 性能参数对 NPR 效应的限制。但是,在 PSP 未对准的 SOA 级联系统中,信号光偏振态在不同 SOA 中会绕着不相关的 PSP 旋转,无法预知信号光偏振态因 NPR 效应产生的变化,也就无法控制系统输出光信号在正交线偏振态之间切换以实现光开关功能。对于该问题的理论和实验研究,截至目前为止,均未见成功报道。

本文在对 SOA 中 NPR 效应进行深入的理论和实验研究的基础上,成功地解决了级联 SOA 的 PSP 对准问题,进而基于 NPR 效应提出并实现了一种多级 SOA 级联式全光开关,不仅提高了开关速度,同时也大大降低了对控制光强的要求。这一研究成果,将有效提高基于 NPR 效应多级 SOA 级联式系统的应用价值,推动全光开关技术的发展,拓展其在光纤通信、光计算、光传感和全光信号处理等领域的应用范围。

2 工作原理和实验装置

研究 SOA 的 NPR 效应,须首先选择合适的偏振态描述方法。邦加球法以信号光的斯托克斯矢量 S_1 、 S_2 、 S_3 为三维直角坐标系坐标,所有的完全偏振态形成一个叫邦加球的单位球,邦加球面上每个点对应一个偏振态。较之琼斯矩阵法和复矢量法等偏振态描述方法,邦加球法具有可视性强、处理方便等优点。因此,这里选取邦加球法研究 SOA 的 NPR 效应。

深入研究级联 SOA 的 PSP 对准问题发现,所谓 PSP 的对准,并不是要求各级 SOA 的 PSP 必须在邦加球上的方位重合,只需在各级 SOA 的邦加球间建立固定的相关关系即可。因此,本文根据输出光信号围绕 PSP 的旋转半径随 SOA 前偏振控制器(PC)调节改变的原理,以信号光偏振态与 PSP 之间建立固定关系的方式,解决了多级 SOA 级联式系统的 PSP 对准问题。实现结构原理如图 1 所示。

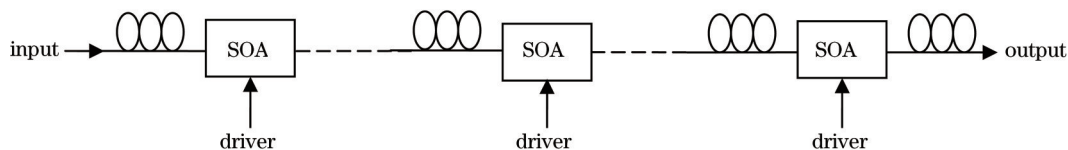


图 1 多级 SOA 级联式系统 PSP 对准的实现结构原理示意图

Fig.1 Principle of PSP alignment in multilevel cascaded SOAs system

对于图 1 所示的这种在 SOA 前后加上 PC 的多级 SOA 级联式系统来说,每级输出光信号围绕其 PSP 的旋转半径可由 SOA 之前 PC 的确定。调节 SOA 前 PC,可使对应的旋转半径缩减为零,实现由图 2(a)到图 2(b)的调整,使输出光信号的偏振态在输出光信号邦加球上的方位与该级的 PSP 重合,即在该级建立起信号光偏振态与 PSP 间的固定相关关系。因此,沿信号光传输方向,逐级对 SOA 的前 PC 进行类似调节,可使各级 PSP 建立起相关关系,实现多级 SOA 级联式系统的 PSP 对准。图 2 中 H、R、V、L 为偏振分析仪中邦加球的极点。

PSP 已对准的多级 SOA 级联式系统,可看作一个光学器件,其 PSP 在输出邦加球上的方位由其末级 SOA 之后 PC 的调节决定,输出光信号围绕 PSP 的旋转半径则由其首级 SOA 之前 PC 的调节决定。因此,先对其末

级 SOA 之后 PC 进行调节,将 PSP 调整到邦加球的极点上,再对首级 SOA 之前 PC 进行调节,将输出信号光的偏振态调整到邦加球的赤道上,如图 2(c)所示,即将输出信号光改造成为线偏振光。至此,该多级 SOA 级联式系统即进入全光开关工作状态,可基于各级 SOA 的 PSP 效应,以控制光信号旋转线偏振态输出信号光的偏振方向,实现全光开关功能。

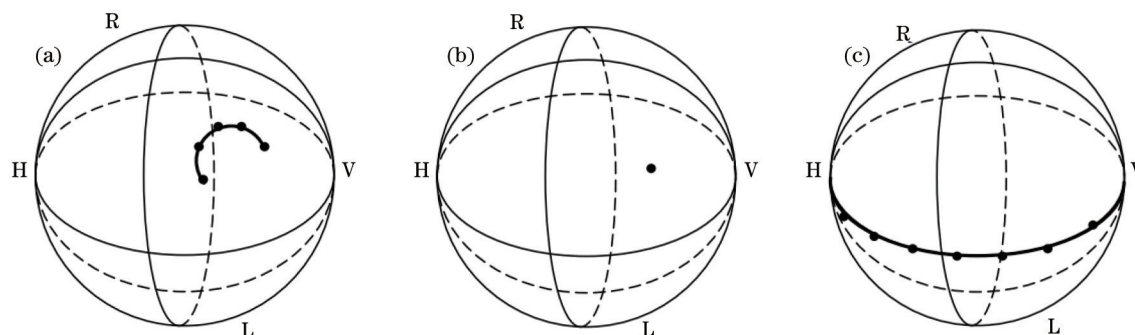


图 2 SOA 中信号光偏振态演化图。(a) SOA 偏振主态未加调整;(b)旋转半径缩减为零;
(c) PSP 调整到邦加球极点、信号光偏振态调整到赤道

Fig.2 Evolution of signal's polarization state in SOA. (a) SOA's PSP unadjusted; (b) radius of signal's polarization state rotation adjusted to zero; (c) SOA's PSP adjusted to the pole and signal's polarization state to the equator on Poincaré Sphere

根据上述全光开关工作原理建立的基于 NPR 效应的两级 SOA 级联式全光开关实验装置,如图 3 所示。采用两个同型的 SOA(IPSAD1501-5110 型,驱动电流为 0~140 mA, INPHENIX 公司), SOA 前后联接自制的 PC。信号光源是 DFB 激光器(CQF935/708 型,输出波长为 1556.56 nm, JDS 公司)。逐级输出口接入偏振分析仪(PA, POD-101D 型, Seneral Photonics 公司)以间接监测各级输出信号光的偏振态变化,通过监测光纤耦合器一个输出端的偏振态是否变化反映出光纤耦合器另一个输出端的偏振态是否发生变化,因此 PA 中显示的偏振态并不是各级输出信号光的绝对偏振态,是绝对偏振态变化的反映,联接 PA 的两个波分复用器(WDM, 中心波长为 1556.56 nm, 康冠光电公司)作为信号光滤波器使用。控制光源采用的是大功率 DFB 激光器(KG-DFB 系列, 输出波长 1550 nm, 康冠光电公司),由自制掺铒光纤放大器(EDFA)放大后经高速脉冲码型发生器(PPG, MP1800A 型, 10Gb/s, Anritsu)驱动的 MZ 型调制器(MOD, IOI-0601 型, JDS 公司)调制后产生的控制光方波信号,再经 3 dB 光纤耦合器分成两路分别通过两个环形器反向注入两个级联的 SOA。两路控制光之间引入了适当的时延以保证控制光脉冲与信号光脉冲的同步。为抵消 SOA1 对信号光的放大作用,信号光在进入 SOA2 之前通过对实验系统中光纤的弯折引入了适当损耗。系统末端的 PC4 和偏振分束器(PBS, S/N: B016849 型, 康冠光电公司)相配合,通过调整信号光偏振方向而为输出光信号选择输出口。图中 ISO 为隔离器, OSC 为示波器,整个系统的光纤部分都采用装置固定以避免信号光偏振态的随机扰动。

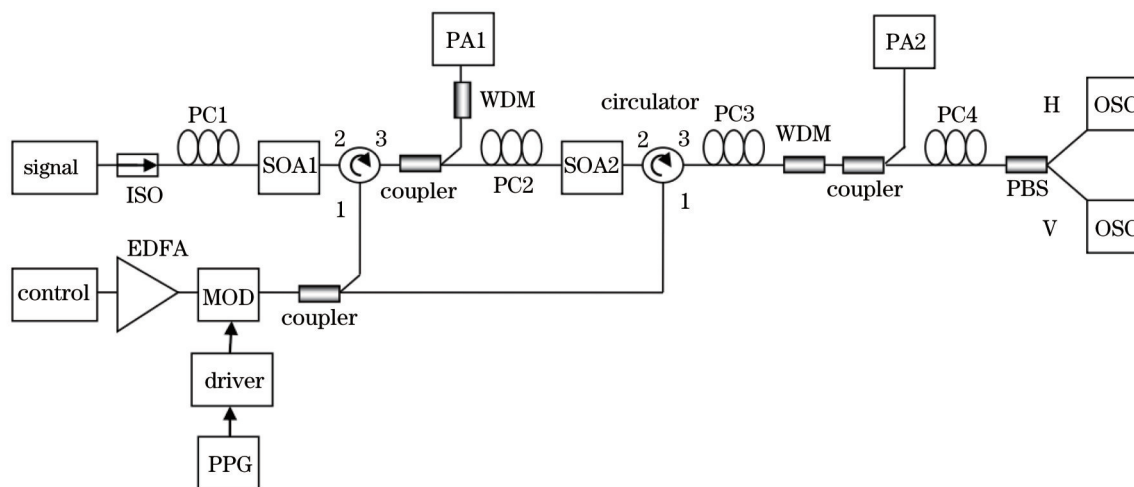


图 3 基于 NPR 效应的两级 SOA 级联式全光开关的实验装置

Fig.3 Experimental setup of the optical switch based on NPR in two cascaded SOAs

3 实验结果和讨论

3.1 SOA 中 NPR 效应特性研究

一般来说,对于同样的控制光功率变化范围,SOA 的驱动电流越大,信号光功率越小,信号光偏振旋转角度就越大。因此,选择较大的驱动电流和较小的信号光功率进行控制光功率影响的实验研究。本文所用 SOA 的最大驱动电流值为 140 mA,自发辐射(ASE)为 $47 \mu\text{W}$,信号光功率须超过 $47 \mu\text{W}$ 。所以,本文在驱动电流分别为 80、100、120、140 mA,信号光功率分别为 50、150、250 μW 的情况下,控制光功率为 0~20 mW 连续变化,实验观测信号光通过 SOA 的非线性偏振旋转角的变化。

实验发现,当固定 SOA 驱动电流时,对于各种功率的信号光,偏振旋转角度均随控制光功率增大。图 4(a)为 SOA 采取最大驱动电流 140 mA 时,不同功率信号光的非线性偏振旋转角度随控制光功率的变化关系图。在控制光功率增加的起始阶段,偏振旋转角度增大较快。在曲线稍后部,对应控制光功率为 3 mW 左右时,曲线弯折,增速转缓,出现类似饱和的现象。控制光功率大于 3 mW 后,实验曲线又进入接近线性增大的阶段,只是增速更低。而且,信号光的非线性偏振旋转角度随控制光功率的增大值,也因信号光功率不同而不同。信号光功率越大,实验曲线弯折所对应的控制光功率越小,弯折过度区也越长,再次进入线性增大区域所对应的增速更低。

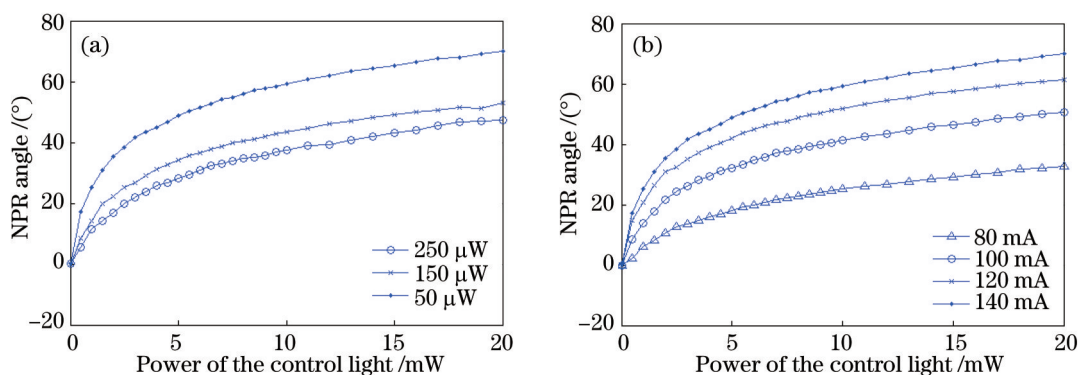


图4 SOA 非线性偏振旋转角度随控制光功率变化曲线。(a)不同信号光功率;(b)不同驱动电流

Fig.4 Curves of nonlinear polarization rotation degree in a SOA versus power of the control light.

(a) Different signal powers; (b) different driving currents

图 4(b)为信号光采用最小的信号光功率 $50 \mu\text{W}$ 时,SOA 不同驱动电流下信号光的线偏振旋转角随控制光功率变化关系。可见,在采取最小信号光功率 $50 \mu\text{W}$ 、最大驱动电流 140 mA 的条件下,控制光功率从 0 变化到 20 mW 时,非线性偏振旋转角度最大,已可接近 70° 。

对于多级 SOA 级联式系统,信号光偏振旋转角为各级 SOA 上信号光偏振态旋转角度的总和。两级 SOA 级联式全光开关系统,单级 SOA 上信号光的偏振态旋转只需达 45° 即可,因此控制光功率需变化 5 mW。

3.2 全光开关实验

根据 3.1 节对所用 SOA 中 NPR 效应的实验研究结果,实际设计并实际搭建出两级 SOA 级联式全光开关实验系统,在系统 PSP 对准的基础上,进行全光开关实验。

3.2.1 PSP 对准

对于如图 3 所示的两级 SOA 级联式系统,连续改变 SOA1 的控制光功率或驱动电流,在 PA1 上观察首级 SOA 输出信号光偏振态在邦加球上的演化轨迹,通常的演化轨迹为圆弧,如图 5(a)所示。调节首级 SOA 之前 PC1,压缩圆弧半径,使演化轨迹向圆心靠拢,并最终缩聚于圆心点上,如图 5(b)所示。此时,首级 SOA 输出信号光的偏振态,在邦加球上与其 PSP 重合,无论怎么改变控制光功率或驱动电流,信号光偏振态在邦加球上的演化轨迹都缩聚于一点不发生移动。按照 PSP 概念,从对信号光偏振态影响的角度来说,此时的首级 SOA 可以等价为一传输矩阵不变的光纤,其控制光功率或驱动电流等工作参数的变化对信号光偏振态不产生任何影响,信号光偏振态已与 PSP 重合,重合精度受限于偏振分析仪的分辨率。

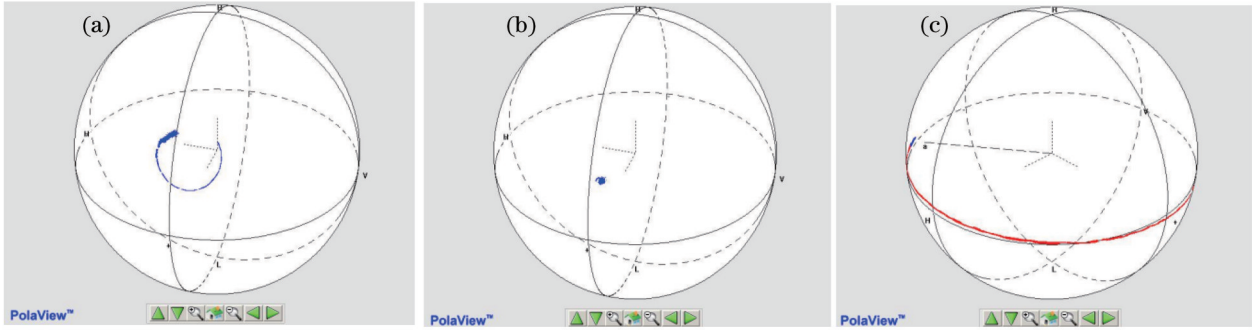


图5 信号光偏振态在邦加球上的演化轨迹。(a) SOA 偏振主态未加调整; (b) 旋转半径缩减为零; (c) PSP 调整到邦加球极点、信号光偏振态调整到赤道

Fig.5 Evolution trace of signal's polarization state on Poincare Sphere. (a) SOA's PSP unadjusted; (b) radius of signal's polarization state rotation adjusted to zero; (c) SOA's PSP adjusted to the pole and signal's polarization state to the equator on Poincare Sphere

针对第二级 SOA,重复上述调节和检验过程。调节第二级 SOA 之前 PC2,辅以 SOA2 控制光功率或驱动电流的改变作为检验,使输出光信号的演化轨迹同样发生如图 5(a)到(b)所示的变化,将第二级 SOA 输出信号光偏振态调整到与其 PSP 重合。

至此,对于如图 3 所示的两级 SOA 级联式系统来说,因各级输出光信号偏振态与其 PSP 被调整重合,两级 SOA 的 PSP 建立起相关关系,实现了 PSP 对准。对准精度由偏振分析仪的分辨率决定。

3.2.2 全光开关功能的实现

在 PSP 对准的基础上,调节如图 3 所示两级 SOA 级联式系统中第二级 SOA 之后的 PC3,将系统的输出信号光偏振态演化轨迹点调整到邦加球的极点位置,此时,输出信号光为圆偏振态光。调节第一级 SOA 之前的 PC1,将系统的输出光信号偏振态调整到邦加球的赤道位置,此时,输出光信号的偏振态已被调整为线偏振态。改变两 SOA 的控制光功率,整个系统输出光信号的偏振态沿着邦加球赤道演化,如图 5(c)所示,输出信号光始终为线偏振态演化。至此,整个系统进入全光开关工作状态。

根据上述实验研究结果,在全光开关实验中,两 SOA 采用最大驱动电流 140 mA,信号光功率采用 50 μW ,在两个 SOA 之间引入损耗使进入第二级 SOA 的信号光功率为 80 μW ,控制光采用经 PPG 调制输出的方波信号,方波占空比为 1:3、调制频率为 16.667 MHz、幅值为 6 mW、基线值接近 0。此时输出信号光受控制光信号的控制,在两个正交偏振态之间的转化,整个系统输出信号光线偏振方向的旋转角度达到 90°,PC4 的调节为线偏振输出信号光选择 PBS 输出口,实现了全光开关操作。

全光开关实验结果如图 6 所示。图 6(a)~(c)为控制光方波信号,受光探测器的线性探测范围限制,对控制光的检测经过线性衰减。图 6(b)和图 6(c)为控制光方波信号的上升沿和下降沿部分,按照脉冲幅度的 10%~90%计方波上升沿和下降沿的宽度,控制光的上升沿的宽度为 167 ps,下降沿的宽度为 156ps。图 6(d)~(f),为输出信号光方波信号,可见,直流光源输出的信号光被全光开关斩成与控制光信号相似的方波信号。信号光方波幅值为 28.6 μW ,基线值为 7.98 μW ,对应消光比为 5.54 dB。图 6(e)和图 6(f)为输出信号光方波的上升沿和下降沿部分,同样按照脉冲幅度的 10%~90%计方波上升沿宽度为 208 ps,下降沿宽度为 198 ps。

综合检测表明,全光开关的工作波段为 1510~1570 nm,插入损耗约为 3.62 dB,功耗约为 12 mW。

3.3 结果讨论

线偏振态信号光因 SOA 中 NPR 效应产生的偏振旋转角为^[20]

$$2\theta = 0.23\Delta\alpha[10\lg \bar{G}(x) - 10\lg \bar{G}(x_0)], \quad (1)$$

式中 x 和 x_0 分别是 NPR 旋转最终态和初始态对应的控制光功率, $\bar{G}(x)$ 和 $\bar{G}(x_0)$ 为对应 TE 模和 TM 模的平均增益, $\Delta\alpha$ 是偏振相关线宽增强因子。

从(1)式可以看出,信号光偏振旋转角由控制光功率变化下对应的 SOA 增益差值决定。对于现有商品级的单个 SOA 来说,达到偏振旋转 90°以实现全光开关操作需要 35 mW 量级的控制光强要求,这是很强的控制光强要求。另外,如(1)式所示,偏振旋转角与控制光功率是对数关系,与图 4 实验曲线中出现的饱和现象相

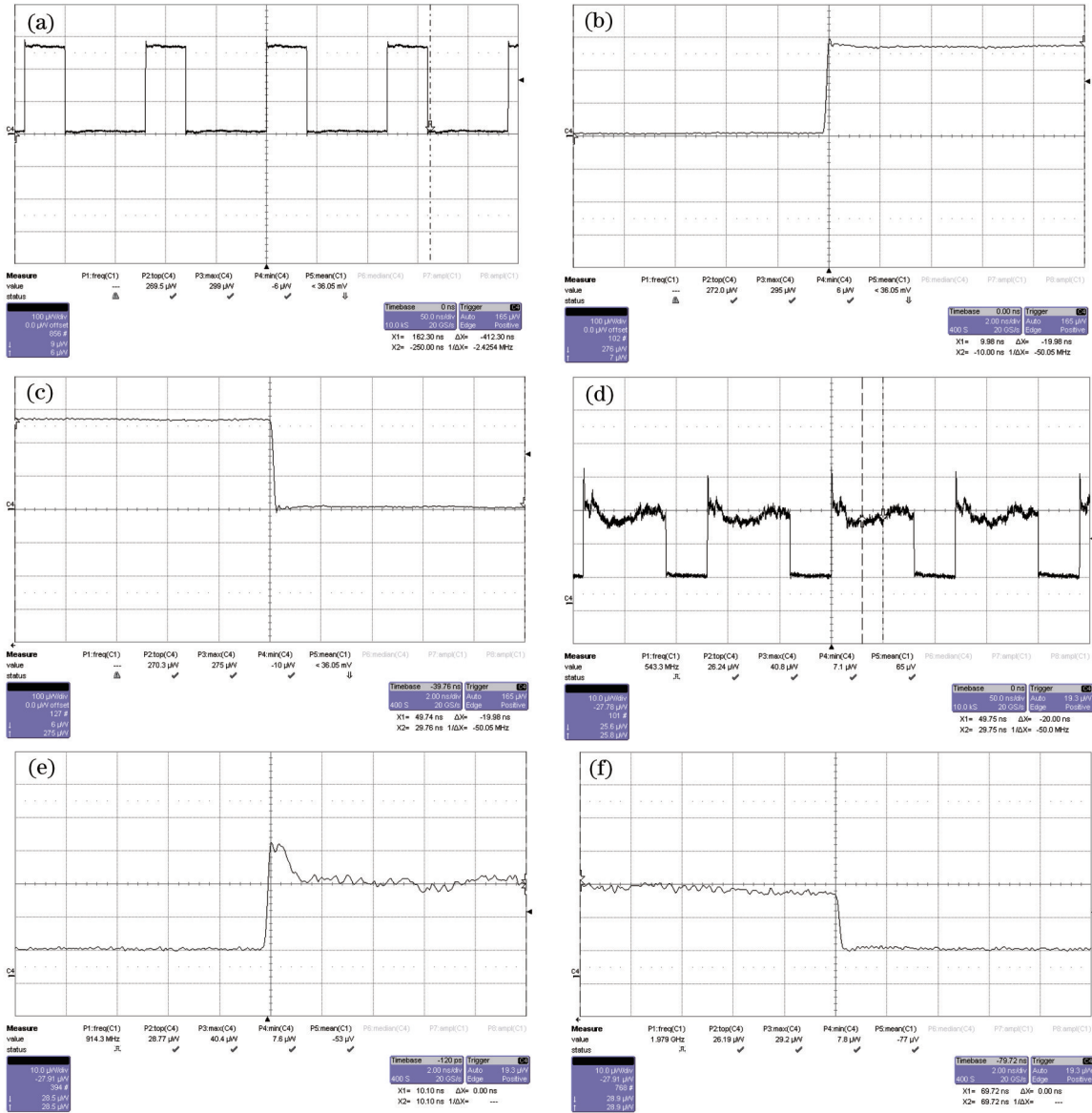


图6 基于 NPR 效应的两级 SOA 级联式全光开关的实验结果。(a) 控制光; (b) 控制光上升沿; (c) 控制光下降沿; (d) 信号光; (e) 信号光上升沿; (f) 信号光下降沿

Fig.6 Experimental results of the optical switch based on NPR in two cascaded SOAs. (a) Control light; (b) rising edge of control light; (c) following edge of control light; (d) signal light; (e) rising edge of signal light; (f) following edge of signal light

吻合。控制光功率较小时,输出光的偏振态演化较快;控制光功率较大时,输出光的偏振态演化较慢。所以,级联式使用 SOA,即通过降低每一级 SOA 所承担的偏振旋转任务,降低各级 SOA 对控制光强度的要求,是一种既可有效降低硬件成本和结构复杂程度,又可加快偏振演化的解决方案。

控制光方波上升下降沿的宽度,对于该型全光开关的开关性能有着很大影响。信号光方波信号的上升下降沿宽度与其非常接近,显示出本全光开关对控制光开关操作的响应速度非常快。光纤通信系统中的控制光,通常由通信编码信号转化而来,以目前的发展水平,上升下降沿远比本实验室 10 GHz PPG 所能提供的窄。因此,该全光开关所能达到的性能指标,还具有较大的挖掘潜力。本文以较宽上升下降沿的控制光检测出的开关速度为 200 ps 左右,应只是在本实验室有限条件下的上限值。

由图 4 分析得:该型全光开关要达到信号光 90°的非线性偏振旋转,使两级 SOA 分别的控制光在 0~5 mW 之间变化即可。实际实验中,信号光经过第一级 SOA 后受 XGM 效应作用成为方波信号。在第一级 SOA 之后引入损耗,应使信号光的基线值为 50 μW 以压制 ASE 的影响,则进入第二级 SOA 的信号光的平均功率大

于 $50\ \mu\text{W}$, 采用 $80\ \mu\text{W}$, 因此达到 90° 旋转需要较大的控制光幅值, 为 $6\ \text{mW}$ 。

实验系统两个输出口输出的信号光波形, 分别是与控制光波形一致和相反的两种方波波形。实验结果显示, 与控制光相反的输出波形, 消光比较好。可见, 在本全光开关检测实验中, 并不能排除 SOA 中 XGM 效应的影响。在对本全光开关的性能检测实验中使用的信号光功率较小, 输出信号光的消光比也较小。信号光的强弱, 一般由实际应用情况决定。提高信号光功率, 会增大 XGM 效应的影响, 减弱 NPR 效应的力度, 提高对控制光功率的要求。本文中完成的实验注重开关速度这一参数的提高, 得出的消光比和插损等参数不甚理想, 如何综合、平衡地考虑信号光和控制光功率的大小, 以及 XGM 效应和 NPR 效应的影响, 优化消光比和插损等参数, 也将是在下一步工作中, 对本全光开关系统进行整体性能优化的优先探索方向。

本文所实现的光开关存在体积较大、光纤器件和 SOA 稳定性差等问题, 距离实际应用仍有一段距离。因此, 如何提高稳定性进而实现集成化, 是其未来的一个重点研究方向。在结构设计中以多级 SOA 芯片集成的方式可有效减小体积, 减少光纤器件对稳定性的影响; 在 PC1 和 PC3 之间采用保偏光纤联接, 重视减震设计, 也可以提高偏振稳定性。另外, SOA 及光纤器件的集成化实现, 将会极大地减小该型光开关的体积, 提高其工作稳定性。

4 结 论

在深入分析 SOA 中 NPR 效应的基础上, 明确了级联 SOA 的 PSP 对准与邦加球相关性之间的关系, 提出了多级 SOA 级联式系统的 PSP 对准原理。进而, 针对基于 SOA 中 NPR 效应全光开关进行多级 SOA 级联式结构改进, 提出了全光开关新结构。通过对所用 SOA 中信号光偏振旋转角度与驱动电流、控制光强及信号光强关系的实验研究, 实际设计出两级 SOA 级联式全光开关实验系统。在实现 PSP 对准的基础上, 使用调制频率为 $16.667\ \text{MHz}$ 、幅值为 $6\ \text{mW}$ 的方波控制光信号将 $50\ \mu\text{W}$ 信号光偏振旋转 90° , 实现了全光开关操作。在本实验室 $10\ \text{Gb/s}$ PPG 所能提供最窄 $160\ \text{ps}$ 左右的上升下降沿的控制光方波的驱动下, 开关上升和下降沿时间均为 $200\ \text{ps}$ 左右。全光开关工作波段为 $1510\sim 1570\ \text{nm}$ 、插入损耗约为 $3.62\ \text{dB}$ 、功耗约为 $12\ \text{mW}$, 具有开关速度快、与光纤通信系统兼容性好和功耗低的应用优势。控制光信号上升下降沿若进一步压窄, 开关速度还具有一定的提高潜力。它的研制成功, 将会有效地推动全光开关和全光网络技术的发展, 以及光计算和全光信号处理等领域的技术进步。

参 考 文 献

- 1 Li Chunfei. The Principles of All-Optical Switching[M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-16.
李淳飞. 全光开关原理[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-16.
- 2 R Akimoto, G W Cong, M Nagase, *et al.*. All-optical demultiplexing from 160 to 40/80 Gb/s using Mach-Zehnder switches based on intersubband transition of InGaAs/AlAsSb coupled double quantum wells[J]. IEICE Trans Electron, 2009, E92-C(2): 187-193.
- 3 G I Papadimitriou, C Papazoglou, A S Pomportsis. Optical switching: Switch fabrics, techniques, and architectures[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(2): 384-405.
- 4 Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205006.
刘毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205006.
- 5 R Akimoto, T Simoyama, H Tsuchida, *et al.*. All-optical demultiplexing of 160-10 Gbit/s signals with Mach-Zehnder interferometric switch utilizing intersubband transition in InGaAs/AlAs/AlAsSb quantum well[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91: 221115.
- 6 H Nakamura, Y Sugimoto, K Asakawa, *et al.*. Ultra-fast photonic crystal/quantum dot all-optical switch for future photonic networks[J]. Opt Express, 2004, 12(26): 6606-6614.
- 7 E Yüce, G Cstis, J Claudon, *et al.*. All-optical switching of a microcavity repeated at terahertz rates[J]. Optics Letters, 2013, 38: 374-377.
- 8 G Cstis, E Yuce, A Hartsuiker, J Claudon, *et al.*. Ultimate fast optical switching of a planar microcavity in the telecom wavelength range[J]. Appl Phys Lett, 2011, 98: 161114.
- 9 A Martinez, J Blasco, P Sanchis, *et al.*. Ultrafast all-optical switching in a silicon-nanocrystal-based silicon slot waveguide at telecom wavelengths[J]. Nano Lett, 2010, 10(4): 1506-1511.

- 10 C D Poole, R E Wager. A phenomenological approach of polarization dispersion in long single mode fibers[J]. Electronics Letters, 1986, 22(19): 1029–1030.
- 11 C D Poole, C R Giles. Polarization dependent pulse compression and broad ring due to polarization dispersion in dispersion shifted fiber[J]. Optics Letter, 1989, 13(2): 155–157.
- 12 Wang Chunhua, Li Li, Peng Lei, *et al.*. Polarization dynamics of an SOA-based fiber ring with polarization feedback[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0614003.
王春华, 李力, 彭蕾, 等. 基于偏振反馈的半导体光放大器光纤环的动态偏振响应[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0614003.
- 13 Chen Xin, Lou Caiyun, Wang Qiang, *et al.*. Investigation of all optical 2R regeneration based on semiconductor optical amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906013.
陈新, 娄彩云, 王强, 等. 基于半导体光放大器光判决门的光 2R 再生研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906013.
- 14 Pang Honggang, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Semiconductor optical amplifierbased self-mode locking laser and phenomenon of dimidiate frequency[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 40(11): 1102006.
潘洪刚, 于晋龙, 王文睿, 等. 基于半导体光放大器的自锁模激光器及重复频率分频现象[J]. 光学学报, 2013, 40(11): 1102006.
- 15 Pang Honggang, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Generation of dark pulse based on semiconductor optical amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0214006.
潘洪刚, 于晋龙, 王文睿, 等. 基于半导体光放大器的暗脉冲的产生[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0214006.
- 16 H J S Dorren, Daan Lenstra, Yong Liu, *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.
- 17 H J S Dorren, Xuelin Yang, Arvind K Mishra, *et al.*. All-optical logic based on ultrafast gain and index dynamics in a semiconductor optical amplifier[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 10(5): 1079–1092.
- 18 Cheng Mu, Wu Chongqing, Zhao Rui, *et al.*. All-optical buffer based on nonlinear 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非线性偏振旋转的光缓存器[J]. 光学学报, 2008, 28(10): 1898–1902.
- 19 Feng Zhen, Sheng Xinzhi, Wu Chongqing, *et al.*. Performance improvement of all-optical switching based on polarization rotation in semiconductor optical amplifier[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 124–128.
冯震, 盛新志, 吴重庆, 等. 半导体光放大器的偏振光开关性能改进[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 124–128.
- 20 Zhao Shuang, Wu Chongqing, Cheng Mu, *et al.*. Poincare sphere method for optimizing the wavelength converter based on nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(81): 1006–1013.

栏目编辑: 史敏