

基于半导体光放大器中非线性偏振旋转效应单一光缓存环全光时隙交换处理能力研究*

高松¹⁾²⁾ 盛新志^{1)2)†} 冯震¹⁾ 吴重庆¹⁾ 董宏辉²⁾

1)(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)

2)(北京交通大学, 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

(2013年6月10日收到; 2014年1月7日收到修改稿)

对基于半导体光放大器(SOA)中非线性偏振旋转效应(NPR)效应的单一光缓存环多数据包的全光时隙交换(TSI)处理能力进行了理论和实验研究. 在使用归纳法导出单一缓存环实现多数据包全光时隙(TSI)必要条件的基础上, 针对各种全光TSI操作要求得出了相应光数据包的调度方案. 在实验上, 以基于SOA中NPR效应的单一光缓存环实验系统, 开展了多数据包全光TSI操作的实验研究. 根据上述光数据包理论调度方案进行相应系统参数设定, 进行了速率为10 Gb/s的3个和4个数据包的全光TSI实验. 实验结果与理论预期相符合. 研究成果为减少昂贵SOA元件的用量、简化基于光缓存环全光TSI系统的结构提供了可靠依据, 对推进全光TSI技术的发展具有重要意义.

关键词: 全光时隙交换, 全光缓存器, 半导体光放大器, 偏振态旋转效应

PACS: 42.79.Sz, 42.79.Vb, 42.81.Uv, 42.15.Eq

DOI: 10.7498/aps.63.084205

1 引言

时隙交换(time slot interchange, TSI)是时分复用网络(time-division multiplexed, TDM)交换机中的一个关键技术, 通过改变信息的时隙位置可改变数据包目的地或者避免冲突^[1]. 目前, 电域TSI已是一种成熟的路由技术; 光域TSI则是一种亟待发展的全光网关键技术, 在避免高速路由中高能消耗和电子瓶颈等不利影响方面被寄予厚望^[2].

1987年, Thompson等^[3]首先提出和实现了以光纤延迟线组辅以铌酸锂耦合器光开关的全光TSI. 为弥补因信号光多路耦合所带来的损失, 1993年Yao等^[4]提出以半导体光放大器(semiconductor optical amplifier, SOA)进行补偿. 但固定长度光纤延迟线组的使用, 严重限制了这一全光TSI方案的实现弹性. 近些年来, 受全光缓存器技术发展

的推动, 基于全光缓存器的全光TSI逐渐成为研究人员关注的焦点^[5-11]. 但因像“慢光”(slow light, SL)这样能给光缓存带来新机制的先进效应仍处于发展的初级阶段, 发展基于全光缓存器的全光TSI新技术面临的挑战, 主要来源于以固定长度光纤延迟线实现大范围且精细可调的缓存^[12]. 2006年, Shao等^[7]以有源波导正交光开关阵列联接光纤延迟线所构成的可多环缓存的光缓存器, 进行了全光TSI实验. 由于波导与光纤存在联接困难, 阻碍了该方案的进一步发展. 2012年底, 受基于SOA中偏振主态旋转效应(nonlinear polarization rotation, NPR)全光缓存器研究进展的推动, 我们小组提出基于SOA的NPR效应全光缓存器两级级联的全光TSI方案, 并在实验上成功地针对速率为10 Gb/s的2—4个光数据包实现了全光TSI操作^[5,6,13].

在可以预见的未来, 全光缓存器, 尤其是基于昂贵SOA器件的全光缓存器成本仍将高昂. TSI

* 国家自然科学基金(批准号: 61177082)、北京市自然科学基金(批准号: 4122063)和轨道交通控制与安全国家重点实验室(北京交通大学)开放课题基金(批准号: RCS2012K007)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xzhsheng@bjtu.edu.cn

作为 TDM 交换机中大量应用的部件, 简化其结构、减少 SOA 等昂贵器件的使用, 应是一项非常有意义的工作. 在本研究小组前期工作的基础上, 本文以简化全光 TSI 实验系统的结构为着眼点, 重点开展了基于 SOA 中 NPR 效应单一全光缓存环多数据包全光 TSI 处理能力的研究工作. 实际上, 全光缓存器的环长只要足以一次性地将输入的光数据包按其原队列形式全部接纳到环中缓存, 然后将光数据包逐个输出即可完成全光 TSI 处理任务. 但是, 不加调度地将光数据包一次性全部输入, 所需要的全光缓存器环长至少要超过光数据包和其间隙长度之和. 全光缓存器中光纤环的长短, 决定了缓存精细度, 以及对所处理光数据包的延迟大小. 环长过长, 会使得相应全光 TSI 方案无法实际应用.

本文从理论和实验两方面针对基于 SOA 中 NPR 效应的单一全光缓存环的全光 TSI 处理能力进行了深入讨论. 理论推导出多数据包 TSI 操作所需最短环长和相应的光数据包调度方案. 按照这些调度要求, 针对速率为 10 Gb/s 的 3 和 4 个光数据包, 成功地进行了全光 TSI 实验. 研究结果明确了基于 SOA 中 NPR 效应单一全光缓存环的全光 TSI 实验处理能力, 为相应全光 TSI 实验系统结构的简化提供了可靠依据, 也为进一步开发结构紧凑、成本低廉的全光 TSI 系统提供了理论和实验基础, 对推进全光 TSI 技术的发展具有重要意义.

2 理论研究

基于 SOA 中 NPR 效应单一全光缓存环实现全光 TSI 操作的原理, 如图 1 所示. 它由基于 SOA 中 NPR 效应的光开关和光纤延迟线组成, 光开关的主体为 SOA, 通过 SOA 中 NPR 效应控制光数据包的偏振借以实现开关作用^[14,15]. 整个全光缓存环的长短, 决定了缓存精细度, 以及对所处理光数据包的时间延迟大小.

在针对单一缓存环实现全光时隙交换能力所进行的理论研究中, 为模拟 TDM 交换机中的实际情形, 本文假设每个光数据包的长度相等, 包间最小安全距离相同. 显然, 为保证 TSI 操作的实现, 输出光数据包不能重叠. 在基于 SOA 中 NPR 效应全光缓存环的全光 TSI 实验系统中, 为避免非线性效应对光数据包的影响, 光数据包不应在 SOA 中相遇.

下面本文将针对不同数目光数据包的输入及不同的 TSI 操作要求, 分情形进行分析讨论, 推导多数据包 TSI 操作所需最短光纤环长和相应的光数据包调度方案.

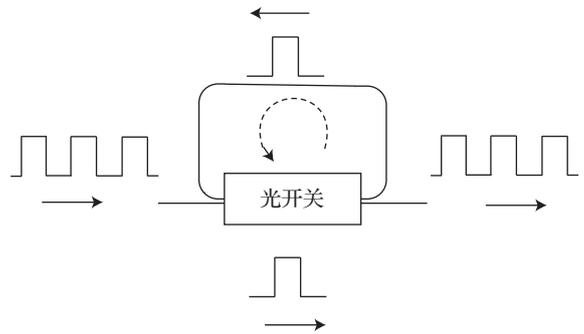


图 1 单一全光缓存环实现全光 TSI 操作的原理

首先, 对于 3 个光数据包 {A, B, C} 输入到图 1 所示的单一全光缓存环中的情形, 为满足光数据包不应在 SOA 中相遇及输出不重叠的要求, 光数据包参数需满足以下关系:

$$\begin{cases} (c_{A1} - c_{B1})(c_{A2} - c_{B2}) \\ \geq (a + s)^2, \\ (c_{A1} - c_{C1})(c_{A2} - c_{C2}) \geq (a + s)^2, \\ (c_{B1} - c_{C1})(c_{B2} - c_{C2}) \geq (a + s)^2, \end{cases} \quad (1)$$

其中, a 为光数据包长度, s 为包间最短安全距离, c 为相应数据包在单一全光缓存环中的前沿或后沿的时间位置, 具体可用下式表示:

$$\begin{cases} c_{A1} = m_A L, \\ c_{A2} = m_A L + a, \\ c_{B1} = m_B L + a + b_{AB}, \\ c_{B2} = m_B L + 2a + b_{AB}, \\ c_{C1} = 2a + b_{AB} + b_{BC}, \\ c_{C2} = 3a + b_{AB} + b_{BC}, \end{cases}$$

其中, L 为所使用单一全光缓存环中光纤环的时延长度, b 为光数据包输入单一全光缓存环时相邻包的时间间隔, m 为光数据包在缓存器中被缓存的圈数, 以下脚标标明相应的光数据包. 例如, b_{AB} 为相邻光数据包 A 和 B 在输入到单一全光缓存环时的时间间隔, c_{A1} 和 c_{A2} 分别为光数据包 A 在做 TSI 处理和输出时的前沿或后沿的时间位置, m_A 为光数据包 A 在缓存器中被缓存的圈数.

显然, L , a , b 和 s 应取大于零的值, m 应取任一非负整数以保证光数据包不在全光缓存器的 SOA 中相遇. 因为光数据包 C 是 3 个输入光数据包的最

后一个包, 对于 TSI 操作无需缓存, 所以这里 m_C 取零.

引入新参数:

$$\begin{cases} n_1 = m_A - m_B, \\ n_2 = m_B, \end{cases}$$

求解不等式方程组 (1), 可得 3 个光数据包 {A, B, C} 输入情形所对应的实验系统要求:

$$\begin{cases} L \geq 3a + 3s, \\ n_1L + s \leq b_{AB} \leq (n_1 + 1)L \\ -3a - 2s, \\ n_2L + s \leq b_{BC} \leq (n_1 + n_2 + 1)L \\ -3a - s - b_{AB}, \end{cases} \quad (2)$$

n_1 和 n_2 取任一非负整数.

当然, 对于某一特定的 TSI 操作, 还需增加限制, 即按相应 TSI 操作排列的数据包队列中前后光数据包的时间间隔大于最短安全距离的要求. 例如, 将光数据包队列从 ABC 变换到 CBA 的 TSI 操作, 对相应光数据包的调度要求为

$$\begin{cases} c_{A1} - c_{B2} = (M_A - M_B)L - 2a - b_{AB} \geq s, \\ c_{B1} - c_{C2} = M_B L - 2a - b_{BC} \geq s, \end{cases}$$

其中, M 为光数据包从 TSI 装置中输出时在缓存器中缓存的圈数.

对于 4 个光数据包 {A, B, C, D} 输入到图 1 所示的单一全光缓存环的情形, 经过仔细推导, 获得了与 (2) 式相似的实验参数关系要求:

$$\begin{cases} L \geq 4a + 4s, \\ n_1L + s \leq b_{AB} \leq (n_1 + 1)L - 4a - 3s, \\ n_2L + s \leq b_{BC} \leq (n_1 + n_2 + 1)L - 4a - 2s - b_{AB}, \\ n_3L + s \leq b_{CD} \leq (n_1 + n_2 + n_3 + 1)L - 4a - s - b_{AB} - b_{BC}, \end{cases} \quad (3)$$

n_1, n_2 和 n_3 取任一非负整数.

对于 5 个光数据包 {A, B, C, D, E} 输入到图 1 所示的单一全光缓存环的情形, 经过仔细推导, 也获得了与 (2) 式相似的实验参数关系要求:

$$\begin{cases} L \geq 5a + 5s, \\ n_1L + s \leq b_{AB} \leq (n_1 + 1)L - 5a - 4s, \\ n_2L + s \leq b_{BC} \leq (n_1 + n_2 + 1)L - 5a - 3s - b_{AB}, \\ n_3L + s \leq b_{CD} \leq (n_1 + n_2 + n_3 + 1)L - 5a - 2s - b_{AB} - b_{BC}, \\ n_4L + s \leq b_{DE} \leq (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + 1)L - 5a - s - b_{AB} - b_{BC} - b_{CD}, \end{cases} \quad (4)$$

n_1, n_2, n_3 和 n_4 取任一非负整数.

推而广之, 对于 k 个光数据包输入到图 1 所示的单一全光缓存环的情形, 也应有与 (2) 式相似的 TSI 实验系统要求:

$$\begin{cases} L \geq ka + ks, \\ n_1L + s \leq b_{AB} \leq (n_1 + 1)L - ka - (k - 1)s, \\ n_2L + s \leq b_{BC} \leq (n_1 + n_2 + 1)L - ka - (k - 2)s - b_{AB}, \\ (n_{(k-1)} - 1)L + s \leq b_{(k-1)} \leq (n_1 + n_2 + \dots + n_{(k-1)} + 1)L - ka - s - b_{AB} \\ - b_{BC} - \dots - b_{(k-2)} \dots, \end{cases} \quad (5)$$

n_1, n_2, \dots, n_{k-1} 取任一非负整数.

可见, 只要所用光缓存器的光纤环长比输入单一全光缓存环光数据包首尾相接的长度长, 使用

基于 SOA 中 NPR 效应的单一全光缓存器即可完成 TSI 操作.

TDM 网络中需进行 TSI 处理的光数据, 通常

不总是首尾紧密相接的数据包队列. 数据包间空时隙的多少应为随机分布. 该研究结论对输入光数据包队列中的空时隙实现了完全刨除, 大大压缩了对光缓存器环长的要求, 对于提高基于 SOA 中 NPR 效应全光缓存器的 TSI 系统的缓存精细度、降低延迟都具有非常重要的意义, 非常有利于其在实际系统中的推广应用.

3 实验研究

TSI 实验装置示意图, 如图 2 所示, 为本研究小组提出的基于 SOA 中 NPR 效应全光缓存器两级级

联全光 TSI 实验系统中的一级 [5,6].

由于两数据包的全光 TSI 易于实现, 本文从 3 个光数据包 {A, B, C} 输入的情形开始进行单一光缓存器的全光 TSI 实验.

为明确起始位置和便于对光数据包的区分, 如图 3(a) 所示, 在 3 个光数据包的前面设立一个按照 FPGA 的 77.6 MHz 时钟截取 2 位为 11 的参考信号, 光数据包 A 为按 77.6 MHz 时钟截取 4 位的 1111 的信号, 包 B 为 1011, 包 C 为 1001; 所有信号占空比均取 50%; 参考信号与光数据包 A 的时间间隔取 26 ns.

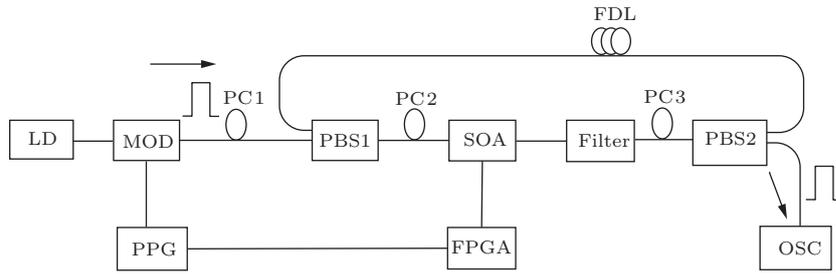


图 2 实验装置示意图

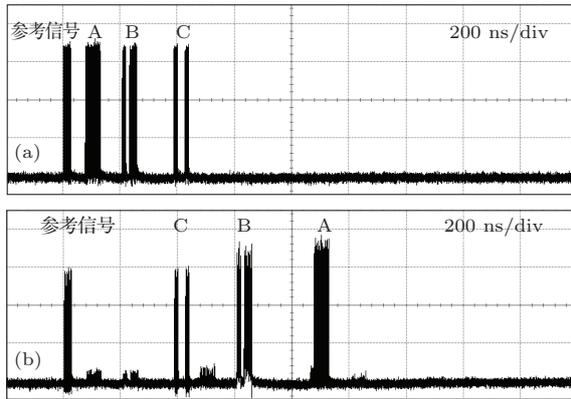


图 3 3 个光数据包的 TSI 实验结果 (a) 输入光数据包; (b) ABC → CBA

为保持光数据包的信噪比, 压缩光缓存圈数, n_1 和 n_2 都取 0. 按照 (2) 式对 3 个光数据包输入情形对 TSI 实验系统要求可得:

$$\begin{cases} 13 \text{ ns} \leq b_{AB} \leq 230.4 \text{ ns}, \\ 13 \text{ ns} \leq b_{BC} \leq 243.4 \text{ ns} - b_{AB}, \end{cases}$$

光数据包 A 和 B 的输入时间间隔 b_{AB} 取 78 ns, 则 B 和 C 的输入时间间隔 b_{BC} 可取 130 ns.

在 3 个光数据包输入情形中, 由 ABC 变换为 CBA 的 TSI 操作是最难以实现的, 它需要对两个光数据包进行缓存处理, 其他 TSI 操作任务只需对一个光数据包进行缓存处理即可完成. 对应由

ABC 变换为 CBA 的 TSI 操作, 按照 (3) 式对相应光数据包的调度要求, 考虑光数据包的前后排列顺序:

$$\begin{cases} c_{A1} - c_{B2} = (M_A - M_B)L - 2a - b_{AB} \geq s, \\ c_{B1} - c_{C2} = M_B L - 2a - b_{BC} \geq s, \end{cases}$$

解此不等式方程组得:

$$\begin{cases} M_B \geq 0.6, \\ M_A - M_B \geq 0.47. \end{cases}$$

可见, 由 ABC 变换为 CBA 的 TSI 操作, 只需对光数据包 A 和 B 分别缓存 2 和 1 圈即可. 参考信号和光数据包 C 不缓存, 直接穿过该 TSI 装置.

如图 3(b) 所示, 为实现将光数据包队列从 ABC 变换到 CBA 的预期 TSI 操作的实验结果. 在光数据包 A 和 B 的原位置, 可以看到微弱的漏光现象, 但不影响对光数据包的 TSI 操作. 按照这些实验要求, 本文实现了 3 个光数据包输入情形的全部 TSI 操作. 为了缩短篇幅, 在此不再一一描述相应的实验结果.

值得注意的是, 在由 ABC 变换为 CBA 的 TSI 操作实验中, 加上光数据包间最短安全距离, 输入光数据包队列的实际长度是 413.6 ns, 超过了本实验装置中光纤环延时长度 410 ns.

对于4个光数据包 {A, B, C, D} 输入情形的 TSI 实验, 如图 4(a) 所示, 与3个光数据包输入情形相似, 在光数据包的前面使用一个按照 FPGA 的 77.6 MHz 时钟截取 2 位为 11 的参考信号, 参考信号与光数据包 A 的时间间隔取 26 ns. 光数据包 A 为按 77.6 MHz 时钟截取 4 位的 1111 的信号, 包 B 为 1011, 包 C 为 1101, 包 D 为 1001. n_1, n_2 和 n_3 分别取 0, 0 和 1.

按照 (5) 式可得:

$$\begin{cases} 13 \text{ ns} \leq b_{AB} \leq 166.2 \text{ ns}, \\ 13 \text{ ns} \leq b_{BC} \leq 179.2 \text{ ns} - b_{AB}, \\ 423 \text{ ns} \leq b_{CD} \leq 602.2 \text{ ns} - b_{AB} - b_{BC}, \end{cases}$$

光数据包 A 和 B 的输入时间间隔 b_{AB} 取 104 ns, 则 B, C 和 D 的输入时间间隔 b_{BC} 和 b_{CD} 分别可取 65 和 429 ns.

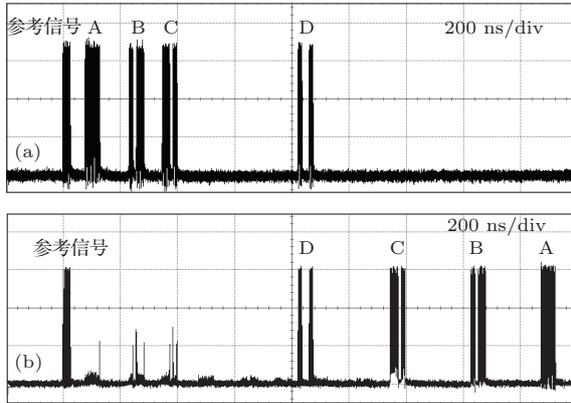


图 4 4 个光数据包的 TSI 实验结果 (a) 输入光数据包; (b) ABCD → DCBA

按照这些实验要求, 本文实现了 4 个光数据包输入情形的全部 TSI 操作. 在此仅以 4 数据包输入情形中须进行 3 个数据包缓存所对应一个最难以实现的由 ABCD 变换为 DCBA 的 TSI 操作为例给出了实验结果.

对应由 ABCD 变换为 DCBA 的 TSI 操作情形, 考虑光数据包的前后排列顺序:

$$\begin{cases} c_{A1} - c_{B2} = (M_A - M_B)L - 2a - b_{AB} \geq s, \\ c_{B1} - c_{C2} = (M_B - M_C)L - 2a - b_{BC} \geq s, \\ c_{C1} - c_{D2} = M_C L - 2a - b_{CD} \geq s, \end{cases}$$

解此不等式方程组得:

$$\begin{cases} M_C \geq 1.33, \\ M_B - M_C \geq 0.44, \\ M_A - M_B \geq 0.54. \end{cases}$$

可见, 对光数据包 A, B 和 C 分别缓存 4, 3 和 2 圈即可.

图 4(b) 所示为 4 个光数据包输入情形将光数据包队列从 ABCD 变换到 DCBA 的实验结果. 在光数据包 A, B 和 C 路经的位置, 也可以看到微弱的漏光. 与 3 个光数据包 TSI 实验中一样, 这些漏光是因为对 SOA 偏振电流和调制电流的选择没有达到使信号光完全偏振旋转至最理想状态所产生的漏光. 在基于 SOA 的 NPR 效应全光缓存器的级联式全光 TSI 操作方案中, 因漏光致使信噪比降低对 TSI 级联级数有很大的限制作用, 这也是本文专注于基于 SOA 中 NPR 效应单一全光缓存环的全光 TSI 实验处理能力研究的一个原因.

与 3 个光数据包输入情形稍有不同的是, 在将光数据包队列从 ABCD 变换到 DCBA 的 TSI 操作实验中, 输入光数据包队列的实际长度为 867.8 ns, 远远超过了实验装置中光纤环延时长度 410 ns.

在 TMD 网络中, 需进行 TSI 操作的光数据包不会都是首尾相接的排列队列, 更经常的是有一定距离的光数据包队列. 因此, 本文的理论和实验研究, 是对实际情况更真实的分析, 研究结果有助于更好地完成 TDM 网络中的 TSI 操作任务, 推动全光 TSI 研究的进一步发展.

4 结 论

理论和实验研究工作表明, 基于 SOA 中 NPR 效应的单一光缓存环, 在环长超过所处理光数据包首尾相接长度的条件下, 具有对多个光数据包的全光时隙交换处理能力. 针对多数据包全光时隙交换, 从理论上推导出了相应的 TSI 实验系统要求及调度方案, 针对速率为 10 Gb/s 的光包数据, 使用一个基于 SOA 中 NPR 效应的单一光缓存环, 成功地进行了 3 包和 4 包的全光时隙交换实验. 输入光数据包队列的实际长度分别为 413.6 和 867.8 ns, 均超过实验装置中 410 ns 的光纤环延时长度. 实验从另一个方面验证了本文理论归纳性结论的正确性. 研究成果将有助于简化基于光缓存环的全光时隙交换系统的结构, 提高系统的效率, 推进全光时隙交换技术的发展.

参考文献

- [1] Hwei Y C, Keng P H, Krivulin N 2010 *J. High Speed Netw.* **3** 129

- [2] Bonk R V P, Hillerkuss D, Freude W, et al. 2011 *J. Opt. Commun. Netw.* **3** 206
- [3] Thompson R A, Giordano P P 1987 *J. Lightwave Technol.* **5** 154
- [4] Yao J, Barnsley P, Walker N, O'Mahony M 1993 *Electron. Lett.* **29** 1053
- [5] Feng Z, Sheng X Z, Wu C Q, Li Z Y, Mao Y Y 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 084203
- [6] Sheng X Z, Feng Z, Li B 2013 *Appl. Opt.* **12** 2917
- [7] Shao Y F, Zhang J W, Fang W L, Huang B, Chi N 2010 *IEEE Commun. Mag.* **48** 146
- [8] Cardakli M C, Gurkan D 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 200
- [9] Takahashi R, Nakahara T, Takenouchi H, Suzuki H 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 692
- [10] Calabretta N, Liu Y, Huijskens F M, et al. 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 372
- [11] Dorren H J S, Lenstra D, Liu Y, Hill M T, Khoe G D 2003 *IEEE J. Quant. Electron.* **39** 141
- [12] Zeng C, Cui Y 2013 *Opt. Commun.* **294** 372
- [13] Cheng M, Wu C Q, Hiltunen J, Wang Y P, Wang Q, Myllylä R 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 1885
- [14] Wang W R, Yu J L, Han B C, Guo J Z, Luo J, Wang J, Liu Y, Yang E Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 084214 (in Chinese)[王文睿, 于晋龙, 韩丙辰, 郭精忠, 罗俊, 王菊, 刘毅, 杨恩泽 2012 物理学报 **61** 084214]
- [15] Zuo L, Yang A Y, Zhou D W, Sun Y N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054211 (in Chinese)[左林, 杨爱英, 周大伟, 孙雨南 2012 物理学报 **61** 054211]

Capability of single optical buffer loop implementing all-optical time slot interchange based on nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifier*

Gao Song¹⁾²⁾ Sheng Xin-Zhi^{1)2)†} Feng Zhen¹⁾ Wu Chong-Qing¹⁾ Dong Hong-Hui²⁾

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

2) (State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 10 June 2013; revised manuscript received 7 January 2014)

Abstract

Based on nonlinear polarization rotation (NPR) in semiconductor optical amplifier (SOA), a single optical buffer loop theoretically and experimentally demonstrates its switch capability to realize all-optical time slot interchange (TSI) on multiple optical packets (MOPs). Firstly, a series of prerequisites is theoretically deduced with a single optical buffer loop performing all-optical TSI on MOPs. And the corresponding equations which experimental parameters should satisfy are derived from these prerequisites for different cases of all-optical TSI. Accounting to the theoretical results, a single optical buffer loop based on NPR in SOA experimentally realizes all-optical TSI on three packets and four packets at data rate of 10 Gb/s. Experimental results are in accordance with those expected theoretically. These results will be very helpful to make all-optical TSI system more compact and more highly efficient, and have less expensive elements such as SOA, and also significant for developing the all-optical TSI technology.

Keywords: all-optical time slot interchange, all-optical buffer, semiconductor optical amplifier, nonlinear polarization rotation

PACS: 42.79.Sz, 42.79.Vb, 42.81.Uv, 42.15.Eq

DOI: 10.7498/aps.63.084205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61177082), the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4122063), and the State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, China (Grant No. RCS2012K007).

† Corresponding author. E-mail: xzhsheng@bjtu.edu.cn