

文章编号: 0253-2239(2001)03-0335-04

# 光分组交换矩阵的实验研究\*

纪越峰 邹俊君 柏琳 徐大雄

(北京邮电大学电信工程学院, 北京 100876)

**摘要:** 对光交换矩阵的基本机理进行了研究, 介绍了所研制成功的光分组交换矩阵的基本结构、功能、性能和相关的实现技术, 重点分析了质子交换型铌酸锂(APE: LiNbO<sub>3</sub>)光波导开关与相应的系统技术, 给出了 2.5 Gbit/s 异步转移模式(ATM)光信元交换实验研究结果。

**关键词:** 光交换; 矩阵; 异步转移模式

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

光纤有着巨大的频带资源和优异的传输性能, 是目前实现高速率、大容量传输的优选物理媒质。随着掺铒光纤放大器(EDFA)的广泛应用和波分复用(WDM)技术的成熟, 一根光纤中已经能够传输 Tbit/s 的数字信息。传输系统容量的快速增长带来的是对交换系统发展的压力和动力。随着通信网中交换系统的规模越来越大, 运行速率越来越高, 电子系统所固有的电阻电容(RC)参数、钟歪、漂移、串话、响应速度慢等缺点已逐渐显露, 限制了交换速率的进一步提高。为了解决电子瓶颈限制问题, 研究人员开始在交换系统中引入光子技术, 实现光交换<sup>[1-4]</sup>。

所谓光交换是指不经过任何光/电转换, 在光域直接将输入光信号交换到不同的输出端。光交换可分成光路光交换和分组光交换二种类型, 前者可利用光分插复用(OADM)、光交叉连接(OXC)等设备来实现, 而后者对光部件的性能要求更高。本文主要介绍了分组光交换的一些研究结果。由于目前光逻辑器件的功能还较简单, 不能完成控制部分复杂的逻辑处理功能, 因此国际上现有的分组光交换单元还要由电信号来控制, 即所谓的电控光交换。随着光器件技术的发展, 光交换技术的最终发展趋势将是光控光交换。

## 1 光交换矩阵的基本结构

实现分组光交换系统的一个最重要部件是光分组交换矩阵, 构成该矩阵的最基本单元为  $2 \times 2$  光开

关, 即入端和出端各有两根光纤, 可以完成两种连接状态: 平行态和交叉态。将 6 个光交换单元组合在一起, 即可构成 4 进 4 出的光交叉连接矩阵, 且可组成多种结构, 如 2:2:2 结构, 或 2:1:2:1 结构等。

更大型的空分光交换单元可以由基本的  $2 \times 2$  光开关以及相应的  $1 \times 2$  光开关级联、组合构成。构成的方式按网络结构可以分成多种形式, 常见的有纵横式网络、双纵横式网络、 $N$  级平面网络、Banyan 网络、分配耦合式网络、双层网络等。

对于广播矩阵而言, 所遵循的是 KISS 原则(即 Keep It Simple Stupid), 以便得到简洁有效的结果。广播矩阵组成的广播网络在光交换中是极具发展前途的交换网络之一。在光分组交换实现的初级阶段, 它以结构简单、无阻塞连接和具有广播能力, 将成为应用极广的交换网络之一。广播网络对于每一个输入端口到每一个输出端口的缓存器都对应有一条专用的无竞争的通道, 这给交换网络带来了无阻塞的广播能力。当一个信元到来的时候, 输入端将在该信元前挂一个自选路由头, 并将它与信元一起输入到交换网络中。此信元通过多个专用的通道, 同时到达所有的出口。随后, 输出端将检查特定自选路由头(SRH), 以判定该信元是否从该端口输出。如果是, 则从该端口输出; 如果不是, 则清除该信元。整个处理过程是无碰撞式的, 这种方式很适合组播和广播业务。对广播矩阵, 不存在中间层的竞争, 该方式可以很好地应用于光分组交换网络中。

## 2 光开关的分析

光开关是光分组交换矩阵中应用最为重要的光器件, 目前比较成熟的研发技术是利用 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 技

\* 信息产业部重大科研项目资助。

收稿日期: 2000-05-30; 收到修改稿日期: 2000-08-21

术和 APE: LiNbO<sub>3</sub> 技术,即在铌酸锂基片上扩散钛(Ti)或质子交换(APE)。通过改变电极电压来控制两条输入波导和输出波导成直通状态或交叉状态连接。

### 2.1 钛扩散

钛扩散铌酸锂波导的三个参数:波导宽度、有效的深度和峰值折射率变化,均能够通过扩散过程的调解而实现相对独立的控制。波导的深度  $d$  取决于扩散时间  $t$ 、扩散温度  $T$ 、以及钛金属层的涂覆宽度。波导的宽度基本上已经由光刻后的涂层宽度确定,扩散过程中的侧向增加不十分显著。最重要的是峰值折射率差  $\Delta n$ ,而  $\Delta n$  取决于温度  $T$ 、时间  $t$ 、钛层厚度和密度。

设扩散是完全的,无剩余金属留在晶面上,则数学模型为

$$C(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\tau}{d} \exp\left[-\frac{y^2}{d}\right]^2, \quad (1)$$

式中  $C(y)$  为相对钛密度值,  $\tau$  为钛层厚度,  $y$  为扩散深度变量。扩散深度  $d$  与扩散温度  $T$  有关,有

$$d = 2(Dt)^{1/2}, \quad (2)$$

这里,  $D = D_0 \exp(-T_0/T)$ ;  $T_0$  为材料的活化温度,依赖于铌酸锂的组成和结构;  $D_0$  为铌酸锂的体扩散率,也依赖于它的组成和结构。另外由于存在侧向扩散,钛浓度的最大值也与钛层宽度有关。

### 2.2 质子交换

质子交换是与钛扩散对应的在铌酸锂上制作波导的另一种方法。质子交换形成光波导的工艺简单,已有几种质子束源用于铌酸锂中的锂离子交换,使得铌酸锂基片交换部分的非寻常光折射率发生改变,而寻常光折射率几乎不变。如使用苯甲酸,晶体表面的锂离子将被苯甲酸中的氢离子即质子所替换,形成折射率高于未发生替换的表面的情况,化学反应式是



显然在化学反应之前,必须通过光刻等一系列手段使晶体表面不形成波导的部分盖上一层金属。如苯甲酸的熔点是 122 °C,把它加热到 200 °C 和 249 °C 之间时,把盖有部分金属的基片浸入,就会在很短时间内形成  $\Delta n_e = 1.25$ ,  $\Delta n_o = -0.04$  的波导,而且这个折射率变化非常接近阶跃型。

与钛扩散铌酸锂波导相比较,质子交换波导的电光转换效率几乎是前者的三分之一,其结果会大大抵消它的高折射率变化所带来的优点,因此设计电极时应减小电极间距,消除电光效应减弱后需较

大电压的影响,但这要以光波模截面很小为条件。

目前质子交换是在铌酸锂上形成大折射率差波导的比较可靠的技术,在无源光波导器件中,质子交换具有明显的优点,但在有源器件中,较小电极电压的应用削弱了质子交换的优势。

## 3 光交换矩阵

实现光交换矩阵的一项关键技术是如何解决内部阻塞问题,否则将严重影响网络的吞吐量,增大信元丢失率。解决阻塞问题的方法有:1) 通过适当限制入线上的信息量来减少内部阻塞;2) 加大缓冲存储器来减少内部阻塞;3) 利用 Banyan 等网络的无阻塞条件,使进入交换网络的信元满足某种条件;4) 通过增加阵列的级数来消除内部阻塞。因此选择适当的交换结构是我们在研究中重点考虑的一个问题。经过分析,我们最终采用的是空分方式的多级互连结构,即通过增加阵列的级数来消除内部阻塞。这种方法减少了对光缓存的需求,简化了控制,是一种比较理想的解决方案。具体实现时是利用多个  $2 \times 2$  光开关构成一个可重构无阻塞的光交换矩阵,并将它们集成在一个光部件内。每个光开关均为质子交换器件,它与 Ti 扩散器件相比具有传输损耗低、抗光损伤能力强、调测方便等特点。该交换矩阵的实现机理是电控光交换原理,即在主光通道上利用高速光开关直接完成光信元的交换,而在控制回路上却采用电子技术,根据每个光信元信头中的地址信息产生相应的控制信号,并施加在各个光开关上,通过光开关的高速动作,将要交换的每一个光信元从信息流中分离,同时送到正确的出端上。这种多级互连结构具有可扩展性好、易于集成等优点。

图 1 给出了我们研制成功的异步转移模式(ATM)光交换试验系统示意图,其中的光波导开关为 APE: LiNbO<sub>3</sub>,其性能为端口数量  $4 \times 4$ ,传输带宽可达数百 GHz 以上,调制带宽大于 1 GHz,光开关的开关电压为 6 V,系统总插损为 20 dB。由于电控制部分仅对光信头进行分析(经过光/电变换),并不对高速光信息段进行处理,光信息段只是按照一定路径透明地通过光交换矩阵,未经任何光电变换,因此充分发挥了光信号高速、宽带、抗干扰等突出优点,消除了信息段的电/光转换瓶颈。

因为图 1 中的铌酸锂光开关对偏振很敏感。对 TE 模有最大的波导耦合效率,而对 TM 模耦合效率受到抑制。所以在我们的系统中,从光源输出的光

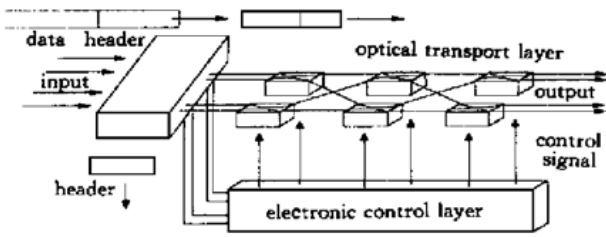


Fig. 1 ATM photonic switching matrix

要首先经过偏振器再被接入光开关阵列, 通过调整偏振状态以达到最大的耦合效率, 以给光交换矩阵最大化的输入功率。在系统中研制了支持裸纤工作的偏振器, 每个偏振器主要由 3 个偏振盘组成, 每个偏振盘上绕有一定圈数的光纤。通过转动偏振片, 光纤的扭曲程度发生变化, 通过光纤的光路的偏振态随之发生变化, 从而起到调节偏振的作用。

#### 4 光交换矩阵的实验结果

我们利用所研制成功的光分组交换矩阵, 对  $4 \times 622$  Mbit/s 异步转移模式光信元的分组信号进行了光交换实验, 解决了多路高速信元流的产生、同步、光波导开关矩阵的实时控制、光信元缓存等关键技术, 取得了令人满意的实验结果。

为了实现分组(ATM cell)光交换试验系统, 首先要解决的问题是如何产生多路高速光信元流。由于目前对光交换还处于探索研究阶段, 光信元格式尚未确定, 因此实现可变状态的光信元流对今后光信元的研究与实现具有重要意义。我们通过不断的研究与实验, 解决了编程与控制、接口通信协议、高速信元的同步产生、光信元发射机等一系列问题, 终于自行研制成功了  $4 \times 622$  Mbit/s 光信元产生、控制和检测平台。通过软件与硬件技术相结合的方式, 可对光信元(包括信头和信元段)中的每一个比特实现灵活的可编程与可控制, 模拟产生了表示一系列不同虚信道/虚通路(VC/VP)的光信元, 最终实现了 4 路 622 Mbit/s 光信元流。

图 2 为交换前/后的一路光信元流, 其中输入的信元流是由不同的信元组成(信头地址不同, 相应的信息段编码也不同), 输出的光信元流却是由相同的信元组成(由相同信头地址、同一编码状态的光信息段构成)。图 3 为光信元与相应的时钟波形, 速率为 622 Mbit/s。图 4 为所产生的四路 622 Mbit/s 光信元流, 其中每一路光信元流均由不同的信元组成(信头地址不同, 相应的信息段编码也不同)。图 5 为交换后的四路光信元流(其中每一路光信元流均来自不

同的出线端, 彼此状态不同, 但构成每一路光信元流中的信元却是相同的)。对比图 4 和图 5 给出的交换前/后四路光信元流的状态可见(波形中部为信头, 两侧为信息段), 说明光交换矩阵在实时控制下实现了四路光信元的路径选择与透明交换功能。

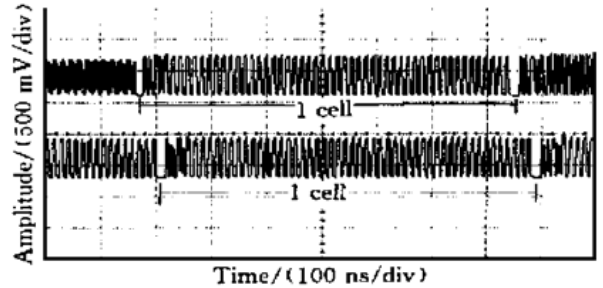


Fig. 2 A photonic cell stream before (upper) and after (down) switching

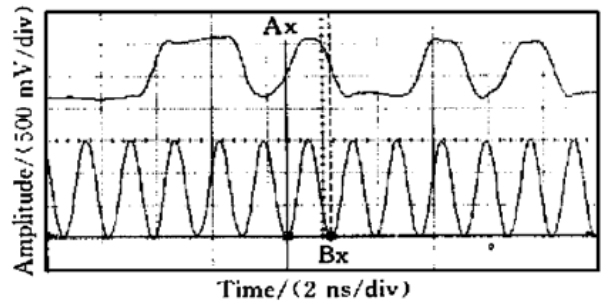


Fig. 3 The waveform of photonic cell and clock

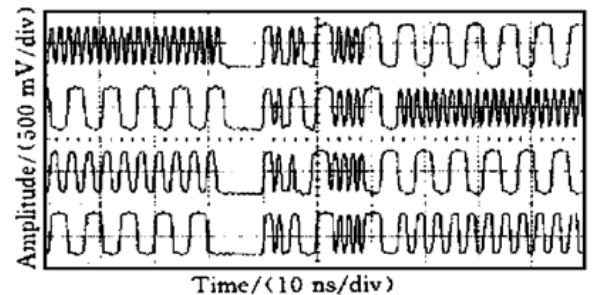


Fig. 4 The waveform of 4 photonic cell stream before switching

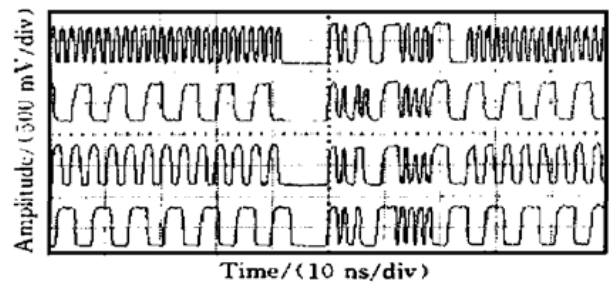


Fig. 5 The waveform of 4 photonic cell stream after switching

因为异步转移模式采用统计复用机理, 交换机构的每条入线上信元的目的地址为随机, 所以必然会出现多条入线上的信元在同一时间内去往同一出线。为有效控制因上述竞争而导致的信元丢失, 必

须设置缓存器来存储未被服务的信元。但异步转移模式光交换中采用的光缓存与异步转移模式电交换中采用的电缓存无论在基础理论、工作机理、还是实现方式等许多方面都有很大的差别。电信元缓存是由可读写存储器(RAM)组成,并以比特为单位进行缓存,属存储器型缓存器,即只有当信元溢出缓存时才有信元丢失;而光信元缓存是由光纤延时线(FDL)、光开关、平面光波导、耦合器等组成,并以整个信元为单位进行缓存,属移位寄存器型缓存器,只有当信元超时未能取出时才产生信元丢失。因此,不能完全照搬异步转移模式电交换中的缓存机理,必须针对光波技术的特点提出一种适于异步转移模式光信元的缓存理论与实现方法。从另一个方面来看,由于异步转移模式光信元缓存不再采用庞大、昂贵的电存储器,而主要利用光纤作为信号延迟媒质,以形成光缓存,因而信息速率越高,光缓存意义越大,相对成本也越低。

我们在研究光缓存器技术时,采用了光纤延迟线技术,并通过精密技术控制其长度,达到了预期的目的,实现了全光信元缓存的基本功能,所采用的基本结构是基于光纤延时线,并重点解决了光纤长度的计算分析,光纤延时线骨架结构与绕制方法的设计、工艺与制作、粗测与精测的测试手段与方法等。具体实现时,光缓存是以整个信元为单位,利用 136 m 单模光纤来存储 622 Mbit/s 的一个信元(53 byte),其特点是成本随传送速率的升高而下降。而电缓存不仅需要大量高速可读写存储器,而且传送速率越高成本也越高。

对于以时分复用(TDM)为基础的多路信元交换而言,在实现交换前必须同步,虽然可以采用固定长度的光纤延时线作为粗调,但为保证质量,减少误差,需要设计出一种可进行时延改变的全光器件。我们研制成功了一种调节范围大、可由软件控制、计算机卡驱动的光延时调节器,重点解决了光信号准值、反射光路设计、精密机械加工、微调架、光延时测试等关键技术问题,实现了在光域上的可调光延时功能。

以上的实验研究结果表明:我们研制的光分组交换矩阵具有良好的性能,已成功地用于 2.5 Gbit/s 异步转移模式光交换系统之中。

感谢孙咏梅、李家爱、陈澎、李骅等人的帮助与协作。

### 参 考 文 献

- [1] Tsukada M, Nakano H. Ultrafast photonic ATM (ULPHA) switch and a video distribution experiment. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(10): 2154~ 2161
- [2] Song S H, Lee E H. Parallel detection of WDM packet addresses by using three-dimensional planar integrated optics. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(1): 112~ 114
- [3] Danielsen S L, Joergensen C, Mikkelsen B *et al.*. Optical packet switched network layer without optical buffers. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 1998, **10**(6): 896~ 898
- [4] Yamada Y, Sasayama K, Habara K *et al.*. Optical output buffered ATM switch prototype based on FRONTIERNET Architecture. *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, 1998, **16**(7): 1298~ 1308

## Experimental Study for Optical Packet Switching Matrix

Ji Yuefeng Zou Junjun Bailin Xu Daxiong

(Telecommunication Engineering School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

(Received 30 May 2000; revised 21 August 2000)

**Abstract:** The principle of optical switching matrix is studied. The architecture, function, performance and related realization way in this system are introduced. The important parts are optical waveguide switch based on APE: LiNbO<sub>3</sub> and corresponding system technology. The experimental result for 2.5 Gbit/s throughput in asynchronous transfer mode (ATM) photonic cell is given.

**Key words:** optical switching; matrix; asynchronous transfer mode