

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0200-04

# 微环共振器光开关在高速互连中的应用

唐健雄 金耀辉 高煜 胡卫生

(上海交通大学区域光纤网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要** 在高性能计算机系统中, 极低延迟高吞吐量的光交换网络具有很多优势, 而光开关作为全光交换网络中的关键器件, 它的性能直接影响到光交换网络的交换能力, 是近年光通信领域的研究热点。半导体微环共振器作为近年提出的一种新的光开关解决方案, 在功耗、延迟、体积等方面具有优势, 目前吸引了越来越多研究机构的注意, 并先后提出了一些比较有价值的微环共振器光开关设计方案。结合目前国内外微环共振器光开关的最新进展, 分析了微环共振器光开关在高性能计算机和光交换网络中的应用, 需要进一步改进的研究重点, 以及微环共振器作为低延迟光开关的发展前景。

**关键词** 光通信; 微环共振器; 光开关; 高速互连; 高性能计算

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0200

## Microring Resonator Optical Switch for Ultralow-Latency Interconnections

Tang Jianxiong Jin Yaohui Gao Yu HU Weisheng

(*State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems & Networks,*  
*Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

**Abstract** As a new solution raised in recent years of optical switches, Semiconductor microring resonator device has its advantages in low-power consumption, ultralow-latency, ultracompactness. Other research groups have proposed many valuable schemes on microring resonator optical switch. We analyzed the characteristic of the microring resonator based on its theory and structure. Depending on the latest research progress, we introduce the use of the microring resonator as switches. We also discuss the emphasis which need to be further improved and the perspective of the microring resonator as ultralow-latency optical switches.

**Key words** optical communications; microring resonator; optical switch; high-speed interconnection; high-performance computing;

## 1 引 言

随着通信技术的发展, 数据交换网络在性能和容量方面获得巨大的突破, 光互连网络广泛代替了电互连网络, 网络的交换能力由原来的数百兆每秒提升到目前的数十吉比特每秒, 交换能力达数百吉比特每秒的新型全光互连网络正在进一步研究中。光开关作为全光互连网络的一项关键器件, 开关的速度和性能直接影响了全光交换网络的性能, 近年

来吸引了越来越多的关注。通常, 为了保证大容量的数据交换, 光互连网络中的光开关要求至少为毫秒数量级, 因此, 目前常用的各种微光机电开关显然已经不能满足要求, 在这一背景下, 许多新的光开关方案陆续被提出<sup>[1~3]</sup>。

基于以上状况, 半导体光开关由于速度快、工艺简单等优势, 成为近年研究的热点。微环共振光开关是最近提出的一种新的光开关解决方案, 与目前

**作者简介:** 唐健雄(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事全光高速互连方面的研究。E-mail: jianxiong\_net@163.com

**导师简介:** 金耀辉(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光网络智能控制、光网络新型应用、交换机调度方面的研究。E-mail: jinyh@sjtu.edu.cn

常用的其他半导体光开关相比,微环共振具有体积小、紧凑、易于集成、工艺简单等优点。本文结合目前世界一些研究机构对微环光开关最新的研究进展,通过分析微环共振器的原理,探讨了把微环共振器作为光开关应用于全光高速互连网络的可能性。

## 2 微环共振光开关研究进展

自 Marcatili 于 1969 年提出光微环共振器概念<sup>[4]</sup>以来,由于受工艺的限制,直到近年才实现成熟的微环结构,随着半导体加工工艺和波导耦合技术的提高,光微环结构迅速发展,已经成功应用于紧凑光波导调制器<sup>[5,6]</sup>、光波分复用器<sup>[7,8]</sup>。目前的一些研究表明,采用微环共振器设计的光开关方案比目前常用光开关更有优势。微环共振器光开关作为一种高速互连中新的光开关实现,吸引了许多研究机构和企业界的注意。

美国哥伦比亚大学的 Keren Bergman 等<sup>[9]</sup>对微环共振光开关片上互连作了一些有益的探索,提出了片上光交换网络的实现方案。在方案中,她们充分利用光网络和电网络各自的优势,对数据包和控制信号分别采用不同的网络来传输,光网络和电网络互相弥补各自的不足,提高交换效率。对信息量比较大的数据包采用光网络传输效率更高,而对一些网络控制信号,如拓扑结构信息、路由计算、死锁仲裁以及路径的建立和撤销等信息,则通过电互连网络传输,充分利用电互连网络的延迟、缓冲等优势。

Keren Bergman 方案中使用的微环共振光开关的结构示意图如图 1 所示,在一个十字交叉的光波导的对角位置放置两个微环波导,微环波导具有与其结构相关的某个固定的共振频率。直波导中通过的光波频率与微环共振器共振频率不相同,光开关闭合,光波无障碍地通过直波导。当微环共振器附近的 p-n 结被注入自由载流子时,微环共振器会产生一个频率上变化,当其频率变得与直波导中的调制光波频率相同而产生共振,直波导中的光波因耦合到微环中而产生方向上的偏转,微环共振光开关导通,如图 1(a)中箭头所示,图 1(b)显示了由 4 个微环单元构成的  $4 \times 4$  的微环共振光开关交换模块,其中的 ER(electronic router)模块用于传输路由选择、优先级仲裁等控制信息,而数据包则通过光波导进行传输交换。

在 IBM 的 Thomas J. Watson 研究中心提出的微环共振光开关实现方案中<sup>[10]</sup>,采用并联的五个

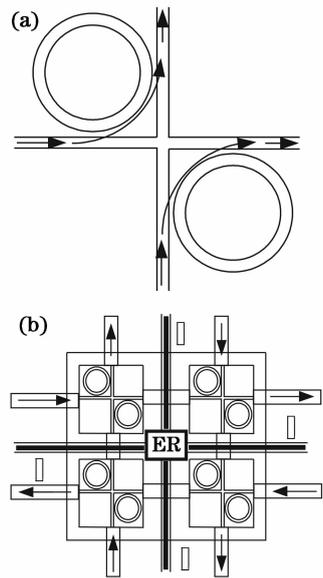


图 1 微环共振光开关示意图

(a) 微环共振光交换单元;(b)  $4 \times 4$  交换模块

Fig. 1 Schematic diagrams of microring switching element. (a) Photonic switching element; (b)  $4 \times 4$  switch. Four photonic switching elements controlled by an electronic router (ER)

微环制作成一个光开关结构,如图 2 所示。该光开关方案用微环层叠的方式换取微环共振光开关在宽带和宽温度范围的优势。通过调整各微环的耦合系数,可以在下行分支端口得到一个约 2 nm 宽的开关通道,该通道内光功率波动误差峰值不超过  $\pm 0.5$  dB。这种方案解决了微环共振光开关对波长敏感的缺点,可以提供高达 100 Gbit/s 的光载波数据传输,如果采用单一波长光波调制,该光开关可以在  $\pm 30^\circ\text{C}$  范围内正常使用,有效解决半导体器件对温度敏感的缺陷。

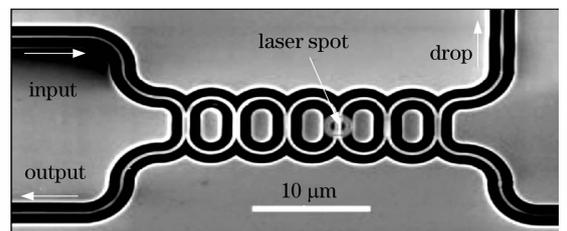


图 2 微环共振器光开关电子显微镜扫描图

Fig. 2 Scanning electron micrograph of silicon microring resonator optical switch

## 3 微环在高速互连中的应用

在高速互连中,以下三个因素决定了网络的性能:1)数据交换延迟;2)数据吞吐带宽;3)系统功耗;受损耗和串扰等因素的影响,基于铜线的电互连在

带宽和传输距离方面受到了限制,而且过多的电缆也会增加系统的功耗和布线的复杂度。与之相比,全光互连具有高带宽、低延迟、低功耗、无串扰和匹配及电磁兼容等优点,逐渐广泛应用于框架间、板间和片上的高速互连。

图3展示了一个 $2 \times 2$ 高速互连网络的交换节点,其中光开关采用简单的单环微环共振光开关实现。进行数据交换时,由FPGA根据数据包携带的地址信息,发出控制信号让相应光开关导通,实现数据传输。根据数据交换节点的数量,还可通过层叠的方式,生成 $N \times N$ 、不同拓扑的高速交换结构。

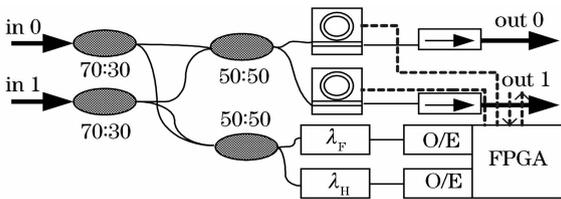


图3  $2 \times 2$  光开关交换节点

Fig. 3 Schematic of  $2 \times 2$  switching node

假设 in 0 端有调制光波信号输入,欲输出到 out 1 端口,数据交换实现方式如下:

1) in 0 输入端光波通过光纤耦合器分流,大部分的输入功率进入微环共振光开关,等待传送,少部分的功率被分流到滤波器。

2) 滤波器从获得的光波中分离出特定波长光波,该光波携带有数据包的帧信息和目的地址信息。

3) 过滤出的光波通过光电转换器件获得数据包的路由信息和帧信息。

4) 系统控制逻辑根据路由信息计算出数据包的目的地址,并对输出端口对应的光开关发出开启指令, out 1 对应的微环 P-N 结加电压,光路导通,数据通过 out 1 输出。

系统控制逻辑通过一片 FPGA 编程实现,用于实现数据包的目的地址解析,产生微环共振光开关控制信号,并实现控制模块之间的通信协作。同时有多个数据包请求某一个输出端口时,FPGA 根据预先编程的算法按一定的规则对数据包进行交换。

由于微环共振光开关不断拓展的数据通道带宽,使得微环共振光开关进行高速数据交换时,数据交换吞吐能力有明显优势,以 IBM 的 Thomas J. Watson 研究中心提出的微环光开关方案为例,微环共振器的带宽拓展到 2 nm,可同时使用几个不同波长的通道对数据进行调制。实验证明,该微环共振器光开关可以构成单通道容量达 40 Gbit/s 的交换系统,此时,通道间串扰完全可忽略不计。如果采用

层叠的方式,还可产生更大容量、更灵活的交换策略的交换模块。

系统的交换延迟由三部分确定:光信息传输与处理延迟、电信息处理延迟、微环共振光开关本身的延迟。光波进入交换节点时,通过耦合和滤波会产生延迟,通常数据在系统中耦合传输的延迟约为 4.3 ns<sup>[9]</sup>,以及对地址信息进行光电转换占用约 1.6 ns。电信息处理延迟是由 FPGA 对地址信息分析并产生相应控制信号的过程产生的延迟,这个延迟受算法和 FPGA 运算速度的影响,约为数纳秒。微环共振光开关本身的响应延迟,约为数十到几百皮秒。整个单级数据交换系统端到端的延迟在 10 ns 内,与目前比较快速的通过半导体光放大器光开关构成的光交换系统的 15.2 ns<sup>[9]</sup> 相比,速度提高至少 30%。

#### 4 微环共振光开关存在的一些挑战

光开关作为光通信系统的核心器件吸引了许多研究机构的关注,经过多年的努力,目前微环共振光开关在速度、功耗等方面已经具有很大的进步,同时,微环的应用还面临一些挑战。首先,目前提出的许多方案实现起来比较困难,例如文献[10]中提到的微环光开关,在实际应用中,各微环的 p-n 结之间会产生干扰,而且在消光比不足的情况下,由多环并联导致的通带内光功率波动将会对通信产生不可忽略的影响;另一方面,目前提出的各种微环共振器光开关普遍存在着消光比不足的缺点,这使得光路之间的串音成为不容忽视的问题,必然导致光包信号的检测和接收方面的一些问题。

虽然微环共振器具有光开关特性,但是通常的微环共振器光开关由于其物理特性的影响,速度依然不能满足要求。影响半导体开关速度有两个主要因素:1)载流子生命周期;2)载流子互相作用的长度。在大部分半导体材料中,载流子生命周期约为几个纳秒,这将限制半导体开关的速度低于 1 GHz。如果能采用一些工艺简单的技术缩短载流子的生命周期,将可能有机会使半导体微环光开关速度获得提高<sup>[3,11]</sup>。

#### 5 结 论

探讨了一种新的光开关在高速互连中的应用,详细分析了目前关于微环共振光开关的一些最新研究成果,总结出一些微环共振器作为光开关应用于

高速互连中时,尚需进一步研究的问题,高速光开关技术的进展是高速光交换网络发展的前提,因此高速光开关的研究是一项十分有意义的工作。随着越来越多的人加入到高速光开关的研究队伍中,微环共振光开关发展过程中遇到的这些问题有望在几年内获得解决。

### 参 考 文 献

- 1 Benjamin A. Small, Assaf Shacham, Keren Bergman. Ultra-low latency optical packet switching node[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.* , 2005, **17**(7):1564~1566
- 2 S. J. Emelett, R. Soref. Design and simulation of silicon microring optical routing switches [J]. *J. Lightwave Technol.* ,2005,**23** (4):1800~1807
- 3 V. Van, T. A. Ibrahim, K. Ritter. All-optical nonlinear switching in GaAs - AlGaAs microring resonators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.* ,2002,**14**(1):74~76
- 4 Marcatili. Optical frequency filter using disc cavity[P]. *US Patent* ,3558513. Filed in 1968
- 5 Q. Xu, B. Schmidt, S. M. Pradhan. Micrometre-scale silicon electrooptic modulator[J]. *Nature* , 2005,**435**:325~327
- 6 W. M. J. Green, M. J. Rooks, Ultra-compact, low RF power, 10 Gb/s silicon Mach-Zehnder modulator[J]. *Opt. Exp.* , 2007,**15**:17106~17113
- 7 F. Xia, M. Rooks, L. Sekaric. Ultra-compact high order ring resonator filters using submicron silicon photonic wires for on-chip optical interconnects[J]. *Opt. Exp.* , 2007,**15**:11934~11941
- 8 T. Barwicz. Silicon photonics for compact energy-efficient interconnects[J]. *Opt. Networking* , 2007,**6**:63~73
- 9 B. A. Small, A. Shacham, Keren Bergman. Ultra-low latency optical packet switching node [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.* ,2005,**17**(7):1564~1566
- 10 Y. V. William, M. J. Green, F. Xia. High-throughput silicon nanophotonic wavelength-insensitive switch for on-chip optical networks. [J]. *Nature Photonics* ,2008, **2**(4): 242~246
- 11 Tarek A. Ibrahim, W. Cao, Y. Kim. Lightwave switching in semiconductor microring devices by free carrier injection[J]. *J. Lightwave Technol.* , 2003,**21**(12) : 2997~3003