

DOI:10.16136/j.joel.2022.06.0775

面向片上光互连的无源 H 树网络设计

黄锦扬¹, 蒋林^{1*}, 张岩²

(1. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:传统的片上电互连已无法满足多核处理系统日益增长的通信需求,在延迟、能耗和带宽方面更具优势的片上光互连逐渐引起关注。为了降低片上光网络(optical network-on-chip, ONoC)硬件开销和提升光网络性能,本文提出一种基于微环谐振器的 16 端口无源 H 树光互连网络。利用宽带微环谐振器设计 4 组转向光路由器,降低微环谐振器使用并完成端口选择,将信号传输到 8 端口接收光路由器以及 3 级和 4 级光开关来满足信号的无争用传输。实验结果表明,在 16×16 阵列规模下与 Crossbar、 λ -Router、GWOR、LACE、Light 等无源网络结构相比,无源光 H 树网络仅需使用 72 个微环谐振器。网络平均插入损耗 1.49 dB,与 λ -Router、GWOR、TAONoC 相比分别降低了 21.5%、10.7%、59.7%,各路径平均信噪比为 17.48 dB,与 λ -Router、GWOR、Light 相比分别提高了 38.5%、36.0%、17.1%。

关键词:片上光互连; 无源网络; 光路由器; 微环谐振器

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)06-0569-09

Design of passive H-tree network for on-chip optical interconnection

HUANG Jinyang¹, JIANG Lin^{1*}, ZHANG Yan²

(1. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Traditional on-chip electrical interconnection has been unable to meet the increasing communication demands of multi-core processing systems. On-chip optical interconnection, which has advantages in terms of delay, energy consumption, and bandwidth, has gradually attracted attention. In order to reduce the hardware overhead of optical network-on-chip (ONoC) and improve the performance of the optical network, this paper proposes a 16-port passive H-tree optical interconnection network based on a microring resonator. The broadband micro-ring resonators is used to design 4 sets of steering optical routers, the use of micro-ring resonators is reduced and port selection is completed, and signals is transmitted to 8-port receiving optical routers and 3-level and 4-level optical switches to meet the contention-free transmission of signals. The experimental results show that compared with passive network structures such as Crossbar, λ -Router, GWOR, LACE, and Light, the passive optical H-tree network only needs 72 microring resonators at the 16×16 array scale. The average network insertion loss is 1.49 dB, which is reduced by 21.5%, 10.7%, and 59.7% respectively compared with λ -Router, GWOR, and TAONoC. The average signal-to-noise ratio of each path reaches 17.48 dB, which is compared with λ -Router, GWOR, and Light respectively, increased by 38.5%, 36.0%, and 17.1%.

Key words: on-chip optical interconnection; passive network; optical router; microring resonator

* E-mail: jianglin@xust.edu.cn

收稿日期: 2021-12-16 修订日期: 2021-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(61772417, 61834005, 61802304, 61602377)和榆林市科技计划项目(CXY-2020-026)资助项目

1 引言

随着多核处理器的发展,高效的片上通信对多核处理器的系统性能提升具有重要作用。传统的片上电互连在满足通信需求的同时,能耗开销越来越大,难以继续在时延、功耗和可靠性等因素之间取得平衡^[1]。片上光网络(optical network-on-chip, ONoC)的出现为解决这一困难提供了新的思路。ONoC在传输速度、通信带宽、能耗效率等方面更具优势,是解决芯片级通信最具前景的方案^[2]。

对于大规模的片上光互连网络,核心间的通信遭受高等待时间、高拥塞和高插入损耗的困扰。同时随着通信规模的扩大,硬件开销也成为阻碍光网络拓展的主要因素。文献[3]中提出了一种低串扰和插入损耗 5×5 的光路由器,与其他 5 端口路由器架构相比,它使用更少的微环谐振器和波导交叉点;文献[4]中提出了一种基于维序路由算法的新型 7×7 无阻塞光路由器和一种可以确保光路由器中的微环谐振器数量最少的方法;文献[5]提出了一种基于网格的虚拟集群划分的双层光网络架构,减少网络中长距离通信的跳数;文献[6]提出了一种波长重用分层光网络结构,它利用无阻塞波长路由 λ -Router 和分层网络来重用有限数量的波长。已提出的一些光路由器及网络结构都在通过减少硬件开销或者优化光网络结构来提升网络传输效率,但是,这些光网络结构存在网络规模较小,拓展的同时容易造成硬件开销过大,且光路由器插入损耗高,网络可靠性差等问题。因此,提出一种面向片上光互连的无源 H 树网

络,通过各级无源光路由器设计 16 端口 H 树形拓扑的片上光互连网络,减少微环谐振器使用,降低光路由器插入损耗,提高光信号传输信噪比。本文的主要贡献总结如下:

- 1) 提出一种使用多级光路由器的无源 H 树网络结构,实现阵列处理器中处理元簇间的无阻塞并发访问。
- 2) 设计转向光路由器、光接收路由器、光开关减少微环谐振器的使用。
- 3) H 树光传输网络与同规模的网络结构相比,具有较低的插入损耗和较高的信噪比。

2 光网络结构设计

2.1 无源 H 树光传输网络拓扑结构设计

片上光互连架构不但决定着片上网络中不同节点的互连方式,同时影响路由器的端口和网络链路数量,进而影响网络的时延、功耗和可靠性等性能。因此,选择和设计合适的片上拓扑结构将 ONoC 的性能有很大的提升。与通过电、热控制微环谐振器开关状态的有源光网络不同,无源光网络采用不同半径的微环谐振器使其对不同波长的信号产生谐振,从而控制信号的转向和传输^[7]。

利用无源微环谐振器设计各级光路由器,第 1 级 16 端口转向光路由器(Router),第 2 级 8 端口接收光路由器(eight_switch),第 3 级 4 端口光开关(four_switch),第 4 级 2 端口光开关(two_switch)。基于 H 树拓扑结构的各级光路由器布局如图 1 所示,搭建无源 H 树光传输网络,满足多核处理器之间的高效互连通信需求。

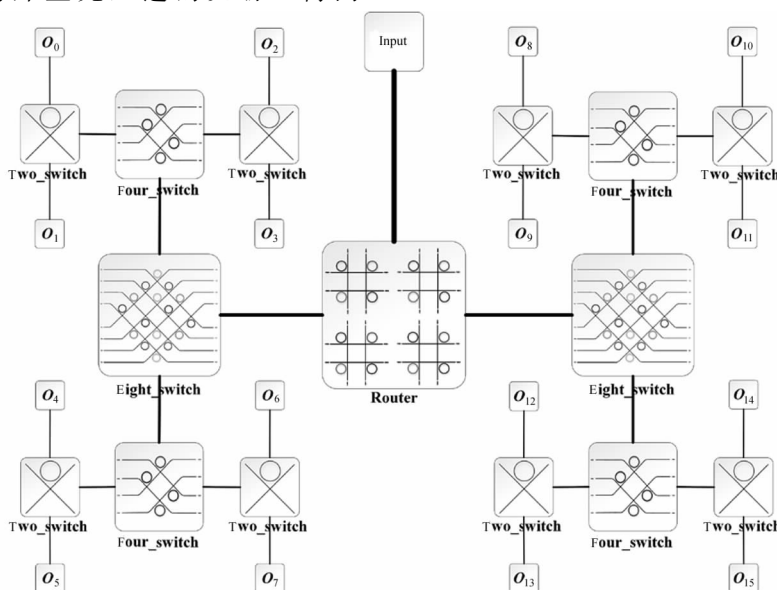


图 1 H 树光传输网络建模

Fig. 1 H-tree optical transmission network modeling

处理器层发出的电信号经电光转换调制成光信号在光H树网络中传输。信号传输到光H树树干节点时,向下传输到第1级的16端口光路由器,两端连接两个8端口光路由器,每个8端口光路由器又分别连接两个4端口光开关,最后传输到最基本的2端口光开关将光信号从光H树的树干传输到末端的树枝节点,之后进行光电转换调制成电信号,传输到片外存储器。

整个光H树传输网络除第一级转向光路由器外,第2、3、4级路由器分别使用16、4、1个满足两种波长传输的宽带微环谐振器。设计的7个光路由器包含1个16端口转向光路由器,2个8端口光接收路由器和4个4端口无阻塞光开关,最后使用8个微环谐振器作为最后一级的光开关。

2.2 微环谐振器设计

微环谐振器(micro-ring resonator, MR)和波导是光互连网络的基本组件^[4]。有源光网络中微环谐振器的谐振状态由电压控制,无源光网络中微环谐振器的谐振波长由材料和几何尺寸决定^[8]。在H树传输网络中,为了实现多个源节点和目的节点的同时并发访问,设计的微环谐振器支持多个光信号同时传输。

如图2所示,微环谐振器的微环位于输入端口的交叉波导左侧或者右侧,使光信号通过微环时将满足谐振条件的信号耦合进微环,经90°或者270°转向输出,其余信号沿着原波导传输。当输入端信号 λ_i 、 λ_j 、 λ_m 、 λ_n 经过微环谐振器,属于谐振波长组 λ_G 的信号 λ_i 、 λ_m 耦合进微环分别经过90°和270°转向由另一端输出,不属于谐振波长组的信号 λ_j 、 λ_n 则沿着波导直接输出,从而实现不同波长信号的转向传输。

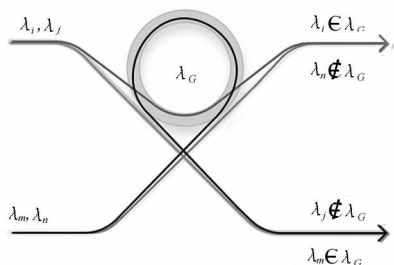


图2 微环谐振器原理图

Fig. 2 Schematic diagram of microring resonator

2.3 光路由器设计

第1级的转向光路由器如图3所示,主要负责最开始的信号转向任务。根据目的端口位置,将光信号转向并传输到目的端口所在的第2级光接收路由

器上。转向光路由器由4组相同结构的转向开关构成,其中使用的16个微环谐振器分为4种,均为宽带微环谐振器,主对角线MR允许同时传输16个谐振波长的光信号,副对角线MR允许同时传输8个谐振波长的光信号。将全部波长信号分为4组谐振波长组,分别标记为 G_a 、 G_b 、 G_c 和 G_d ,谐振波长组 G_a 包含波长 λ_1 、 $\lambda_3 \cdots \lambda_{15}$,谐振波长组 G_b 包含波长 λ_2 、 $\lambda_4 \cdots \lambda_{16}$,谐振波长组 G_c 包含波长 λ_{18} 、 $\lambda_{20} \cdots \lambda_{32}$,谐振波长组 G_d 包含波长 λ_{17} 、 $\lambda_{19} \cdots \lambda_{31}$ 。转向光路由器的主对角线MR对 G_a 和 G_c 组光信号谐振,副对角线MR分别对 G_b 、 G_d 组光信号谐振,从而完成光信号的转向需求。

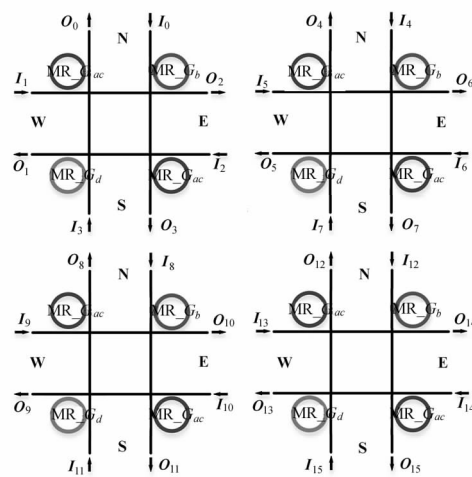


图3 第1级转向光路由器

Fig. 3 Level 1 steering optical router

第2、3、4级的光路由器使用的微环谐振器均为对两种不同谐振波长谐振的宽带微环谐振器。将32种波长分为16组不同的谐振波长组 G_{x-y} ($x=1-16$, $y=x+16$)。路由器使用的微环谐振器 MR_{x-y} ,其中 $x-y$ 代表微环谐振器对 λ_x 和 λ_y 的波长谐振。

由于无源微环谐振器只能满足特定波长的转向开关,若全部使用转向光路由器来进行光信号的传输,虽然理论上能减少微环谐振器的使用,但是为了满足信号各个端口之间的通信,在一次信号传输过程中可能需要微环谐振器的多次耦合,从而导致当多个信号同时通过该微环谐振器时,产生阻塞且无法满足个别路径的光信号传输需求。因此,设计的H树网络的第2级8端口接收光路由器(如图4所示)和第3级4端口光开关(如图5所示),以及最后一级转向开关必须满足信号的无阻塞互连,使经过转向路由器传输进来的光信号能够无阻塞传输到任意输出端口。

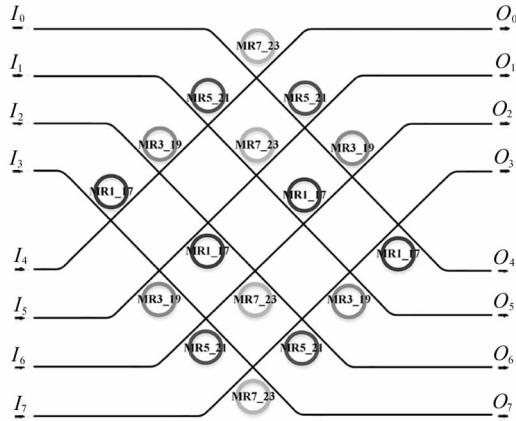


图4 第2级8端口光接收路由器

Fig. 4 Level 2 8-port optical receiving router

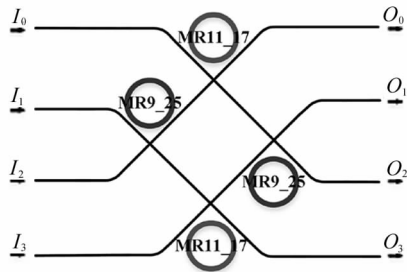


图5 第3级4端口光开关

Fig. 5 Level 3 4-port optical switch

表1 16端口光H树波长分配表

Tab. 1 16-port optical H-tree wavelength allocation table

Input	Output															
	O_0	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7	O_8	O_9	O_{10}	O_{11}	O_{12}	O_{13}	O_{14}	O_{15}
I_0	λ_9	λ_{11}	λ_{13}	λ_{15}	λ_1	λ_3	λ_5	λ_7	λ_2	λ_4	λ_6	λ_8	λ_{10}	λ_{12}	λ_{14}	λ_{16}
I_1	λ_1	λ_3	λ_5	λ_7	λ_9	λ_{11}	λ_{13}	λ_{15}	λ_{10}	λ_{12}	λ_{14}	λ_{16}	λ_2	λ_4	λ_6	λ_8
I_2	λ_{17}	λ_{19}	λ_{21}	λ_{23}	λ_{25}	λ_{27}	λ_{29}	λ_{31}	λ_{26}	λ_{28}	λ_{30}	λ_{32}	λ_{18}	λ_{20}	λ_{22}	λ_{24}
I_3	λ_{25}	λ_{27}	λ_{29}	λ_{31}	λ_{17}	λ_{19}	λ_{21}	λ_{23}	λ_{18}	λ_{20}	λ_{22}	λ_{24}	λ_{26}	λ_{28}	λ_{30}	λ_{32}
I_4	λ_{11}	λ_9	λ_{15}	λ_{13}	λ_3	λ_1	λ_7	λ_5	λ_4	λ_2	λ_8	λ_6	λ_{12}	λ_{10}	λ_{16}	λ_{14}
I_5	λ_3	λ_1	λ_7	λ_5	λ_{11}	λ_9	λ_{15}	λ_{13}	λ_{12}	λ_{10}	λ_{16}	λ_{14}	λ_4	λ_2	λ_8	λ_6
I_6	λ_{19}	λ_{17}	λ_{23}	λ_{21}	λ_{27}	λ_{25}	λ_{31}	λ_{29}	λ_{28}	λ_{26}	λ_{32}	λ_{30}	λ_{20}	λ_{18}	λ_{24}	λ_{22}
I_7	λ_{27}	λ_{25}	λ_{31}	λ_{29}	λ_{19}	λ_{17}	λ_{23}	λ_{21}	λ_{20}	λ_{18}	λ_{24}	λ_{22}	λ_{28}	λ_{26}	λ_{32}	λ_{30}
I_8	λ_{13}	λ_{15}	λ_9	λ_{11}	λ_5	λ_7	λ_1	λ_3	λ_6	λ_8	λ_2	λ_4	λ_{14}	λ_{16}	λ_{10}	λ_{12}
I_9	λ_5	λ_7	λ_1	λ_3	λ_{13}	λ_{15}	λ_9	λ_{11}	λ_{14}	λ_{16}	λ_{10}	λ_{12}	λ_6	λ_8	λ_2	λ_4
I_{10}	λ_{21}	λ_{23}	λ_{17}	λ_{19}	λ_{29}	λ_{31}	λ_{25}	λ_{27}	λ_{30}	λ_{32}	λ_{26}	λ_{28}	λ_{22}	λ_{24}	λ_{18}	λ_{20}
I_{11}	λ_{29}	λ_{31}	λ_{25}	λ_{27}	λ_{21}	λ_{23}	λ_{17}	λ_{19}	λ_{22}	λ_{24}	λ_{18}	λ_{20}	λ_{30}	λ_{32}	λ_{26}	λ_{28}
I_{12}	λ_{15}	λ_{13}	λ_{11}	λ_9	λ_7	λ_5	λ_3	λ_1	λ_8	λ_6	λ_4	λ_2	λ_{16}	λ_{14}	λ_{12}	λ_{10}
I_{13}	λ_7	λ_5	λ_3	λ_1	λ_{15}	λ_{13}	λ_{11}	λ_9	λ_{16}	λ_{14}	λ_{12}	λ_{10}	λ_8	λ_6	λ_4	λ_2
I_{14}	λ_{23}	λ_{21}	λ_{19}	λ_{17}	λ_{31}	λ_{29}	λ_{27}	λ_{25}	λ_{32}	λ_{30}	λ_{28}	λ_{26}	λ_{24}	λ_{22}	λ_{20}	λ_{18}
I_{15}	λ_{31}	λ_{29}	λ_{27}	λ_{25}	λ_{23}	λ_{21}	λ_{19}	λ_{17}	λ_{24}	λ_{22}	λ_{20}	λ_{18}	λ_{32}	λ_{30}	λ_{28}	λ_{26}

3 H树网络配置与通信过程仿真

3.1 H树网络波长分配

在处理器发送响应请求信号通过光电转换元件进行存储访问之前,无源光网络中的微环谐振器必须先根据波长分配表配置波长,使光信号通过光路由器时可以满足各端口之间的互连,然后处理器将信号包耦合到配置的波长,以完成处理器组之间的互连通信。

在片上光H树互连网络中,使用32种不同波长的光信号 $\lambda_1 \sim \lambda_{32}$,来满足16个输入和输出端口之间通信要求。不同端口之间通信使用的波长如表1所示。信号经转向光路由器传输到2级8端口光接收路由器,端口依次连接到2个3级的4端口无阻塞光开关。左右两端的8端口路由整体结构相同,采用相同形式的波长分配表。左端8端口光路由器对 $\lambda_1 \sim \lambda_{31}$ 中的奇数类型波长谐振,如表2所示。右端8端口光路由器对 $\lambda_2 \sim \lambda_{32}$ 中的偶数类型波长谐振,波长分配方式与左端类似。

表 2 左端 8 端口光路由器整体波长分配表
Tab. 2 The overall wavelength allocation table
of the left 8-port optical router

Input	Output							
	O_0	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6	O_7
I_0	λ_{1_17}	λ_{3_19}	λ_{5_21}	λ_{7_23}	λ_{9_25}	λ_{11_27}	λ_{13_29}	λ_{15_31}
I_1	λ_{3_19}	λ_{1_17}	λ_{7_23}	λ_{5_21}	λ_{11_27}	λ_{9_25}	λ_{15_31}	λ_{13_29}
I_2	λ_{5_21}	λ_{7_23}	λ_{1_17}	λ_{3_19}	λ_{13_29}	λ_{15_31}	λ_{9_25}	λ_{11_27}
I_3	λ_{7_23}	λ_{5_21}	λ_{3_19}	λ_{1_17}	λ_{15_31}	λ_{13_29}	λ_{11_27}	λ_{9_25}
I_4	λ_{9_25}	λ_{11_27}	λ_{13_29}	λ_{15_31}	λ_{1_17}	λ_{3_19}	λ_{5_21}	λ_{7_23}
I_5	λ_{11_27}	λ_{9_25}	λ_{15_31}	λ_{13_29}	λ_{3_19}	λ_{1_17}	λ_{7_23}	λ_{5_21}
I_6	λ_{13_29}	λ_{15_31}	λ_{9_25}	λ_{11_27}	λ_{5_21}	λ_{7_23}	λ_{1_17}	λ_{3_19}
I_7	λ_{15_31}	λ_{13_29}	λ_{11_27}	λ_{9_25}	λ_{7_23}	λ_{5_21}	λ_{3_19}	λ_{1_17}

3.2 各级光路由器端口连接

不同的光信号从转向光路由器的输入端口 I_0 —

I_{15} 输入,传输到相应输出端口连接到 8 端口光路由器。转向光路由器的输出端口 O_0 — O_{15} 分别连接第 2 级光路由器的 n 、 $n+4$ 、 $n+8$ 、 $n+12$ …($n=0,1,2,3$) 输入端口,即转向光路由器每个转向组的西向(W)和北向(N)连接光 H 树左端,东向(E)和南向(S)连接光 H 树右端,因此,通过路由转向后的光信号可以传输到不同的 2 级光路由器。转向光路由器的输入输出端口对与第 2 级左右两边的 8 端口光路由器输入端口连接如表 3 所示。

图 6 是左端 2、3、4 级光路由器的整体架构图,上一级的输出端口依次与下一级输入端口相连,斜对角线的输入输出端口,如 I_0 与 O_7 , I_1 与 O_6 等等可以在不启用微环谐振器的情况下直接通过。右端光路由器整体结构与左端相似,输入端口为 I_8 — I_{15} ,输出端口 O_8 — O_{15} 。

表 3 转向光路由器端口连接表
Tab. 3 Steering optical router port connection table

Steering router	Input															
	I_0	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	I_{15}
Output	O_1	O_0	O_0	O_1	O_5	O_4	O_4	O_5	O_9	O_8	O_8	O_9	O_{13}	O_{12}	O_{12}	O_{13}
Left-input	I_4	I_0	I_0	I_4	I_5	I_1	I_1	I_5	I_6	I_2	I_2	I_6	I_7	I_3	I_3	I_7
Output	O_2	O_3	O_3	O_2	O_6	O_7	O_7	O_6	O_{10}	O_{11}	O_{11}	O_{10}	O_{14}	O_{15}	O_{15}	O_{14}
Right-input	I_8	I_{12}	I_{12}	I_8	I_9	I_{13}	I_{13}	I_9	I_{10}	I_{14}	I_{14}	I_{10}	I_{11}	I_{15}	I_{15}	I_{11}

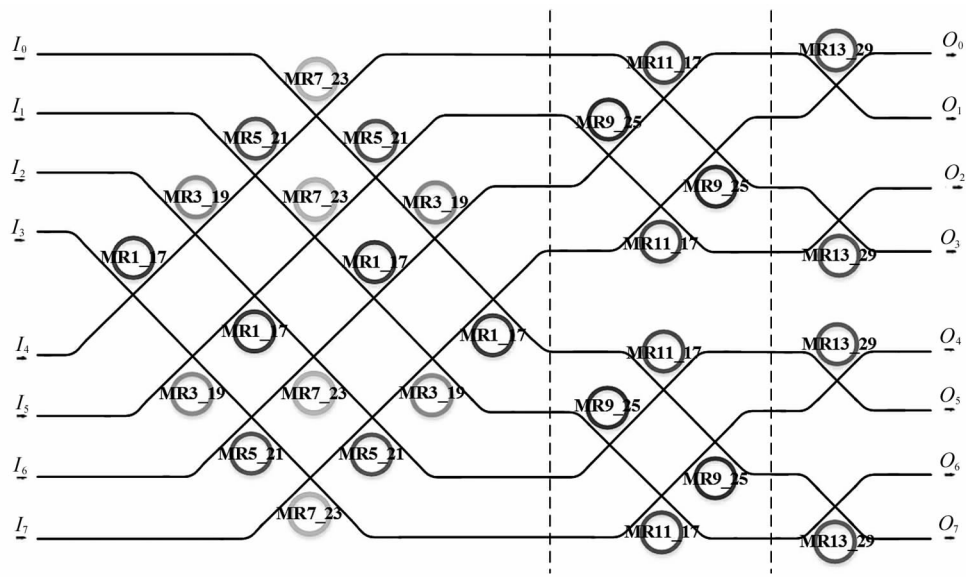


图 6 左端 8 端口光路由器整体架构

Fig. 6 The overall architecture of the left 8-port optical router

3.3 H 树网络通信过程及仿真

在整个通信过程中,在处理器发送信号请求之

前,相应信号包的信息先从处理器层传输,经过电光转换模块之后传输到光网络,最后通过光互连网络

传输到目的端口。

处理器在决定向其他处理器发送信号时,根据目的端口位置,将信号耦合到不同谐振波长组的波长上。每个转向组的北向输入信号选择 G_a 组波长信号可以完成北向西转向,选择 G_b 组波长信号可以完成北向东转向;南向输入信号选择 G_a 组波长信号可以完成南向西转向,选择 G_b 组波长信号可以完成南向东转向;东向输入信号选择 G_d 组波长信号可以完成东向北转向,选择 G_c 组波长信号可以完成东向南转

向。 G_a 和 G_d 组的波长信号经转向传输到 H 树网络左端, G_b 和 G_c 组的波长信号经转向传输到 H 树网络右边。

完成转向处理的光信号传输到 2、3、4 级的光路由进行无阻塞传输。通信仿真过程如图 7 所示,当 I_8 端口与 O_6 端口通信时,根据波长分配表 1,将处理器传输的信号经电光转换后调制到波长 λ_1 ,属于 G_a 波长谐振组。光信号从转向光路由器的北向 I_8 输入,经 MR_ G_{ac} 转向后,从南向 O_9 输出, O_9 端口连接到左端 8 端口光接收路由器的 I_6 端口,光信号经 MR1_17 转向进而传输到 O_6 端口。

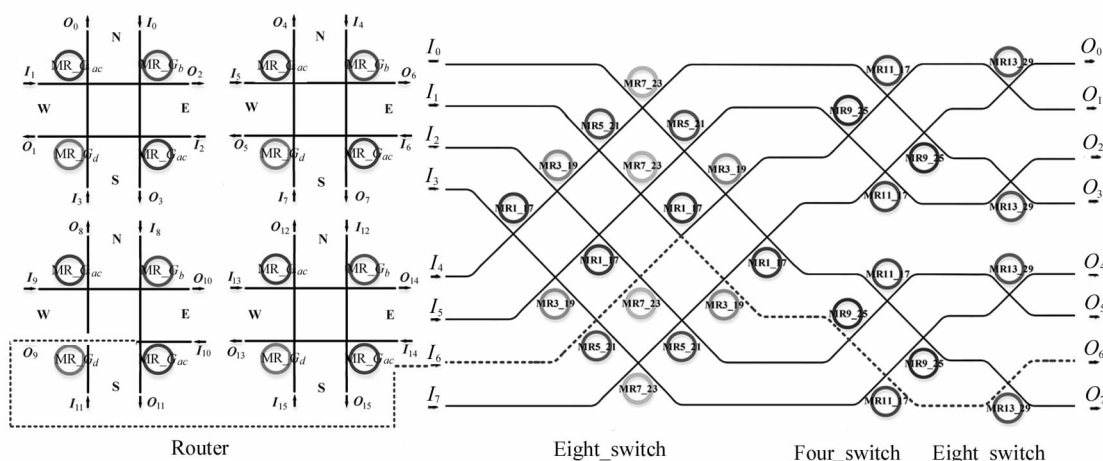


图 7 通信仿真过程

Fig. 7 Corresponding simulation process

由于无阻塞光路由器可以满足任意输入端口和任意输出端口之间的通信,因此,完成转向的光信号随后通过第 2 级接收光路由器和第 3 级的无阻塞光开关,经末级转向开关便能将信号传输到目的端口。

4 实验与性能分析

4.1 微环谐振器数量使用对比

微环谐振器占据了光路由器芯片面积的绝大部分,在满足各端口互连通信的同时,减少微环谐振器的使用,可以降低光路由器的硬件开销,同时降低光网络的插入损耗。

论文提出的片上光 H 树传输网络相比传统的网络结构,通过将路由器分级为转向光路由器、光接收路由器和无阻塞光开关,减少用于转向的微环谐振器的使用。第 1 级转向光路由器使用 16 个微环谐振器,两端的第 2 级 8 端口接收光路由器分别使用同样数量的微环谐振器,第 3 级为 4 个使用 4 个微环谐振器的光开关,第 4 级基本光开关由 8 个微环谐振器组

成。因此,各级光路由器分别使用 16、32、16、8 个,共 72 个微环谐振器来搭建无源 H 树网络。

传统的无源网络如 Crossbar、 λ -Router、GWOR 等^[9]由于输入端口与输出端口分离不利于微环谐振器和波导布局,且每个微环谐振器仅用于一对输入输出端口之间的通信,导致资源利用率低,总体硬件消耗大。在 16×16 阵列规模下,Crossbar、 λ -Router、GWOR 分别需要 256、240、224 个微环谐振器。如图 8 所示,与其他 16×16 规模的经典无源网络结

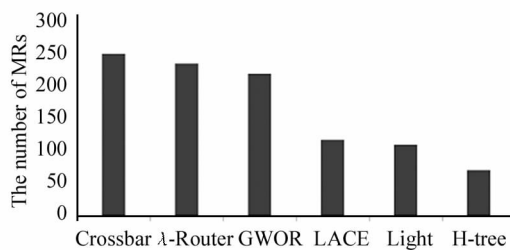


图 8 各网络结构使用微环数量

Fig. 8 The number of microrings used in each network structure

构如 Crossbar、 λ -Router、GWOR 相比,片上光 H 树传输网络减少大量微环谐振器的使用,而相比于最新的一些无源光网络架构如 LACE^[10]和 Light^[11],微环谐振器使用减少了 66.7%和 55.6%。

4.2 网络建模与面积消耗

在 OMNeT++ 仿真平台的光学设备库中,基本光学设备的建模是通过 C++ 实现的^[12]。通过调用光设备库中的器件,构建光互连网络模型,从而实现光互连网络的实例化。搭建的片上光互连 H 树传输网络模型分为 6 个部分:处理器层、电光转换器、调制器、光互连 H 树网络层、光电转换器和数据模块。

根据文献[13]的面积计量方法,所有微环谐振器的尺寸相同,直径为 5 μm ,波导间距为 15 μm ,同时预留 5 μm 的间隙避免信号串扰。分别对无源 H 树网络各级光路由器消耗面积进行计算,可得 1、2、3、4 级光路由器面积消耗为 3 600 μm^2 、9 800 μm^2 、2 500 μm^2 、800 μm^2 ,共计 16 700 μm^2 。H 树传输网络对比其他同规模的无源网络结构的面积消耗如表 4 所示,由于 Light 利用 4 个微环谐振器组成基本交换单元,再逐步拓展成更大规模,因而同样有较小的面积消耗,而 λ -Router 和 LACE 因为输入输出端口分别位于互连架构两侧,不利于各节点的位置分布和波导布局,导致面积消耗较大。

表 4 各类网络结构面积消耗

Tab. 4 Area consumption of various network structures

Structure	Area/ μm^2
λ -Router	19 600
LACE	24 500
Light	16 025
H-tree	16 700

4.3 网络插入损耗对比

插入损耗不仅决定着输入端口注入的最小光信号功率,以及输出端口处检测光信号的灵敏度,更影响着信噪比、误码率等路径通信性能^[14]。无源 H 树网络的光路由器级插入损耗分析不同输入输出端口对间路径的插入损耗,且不同输入输出端口对的插入损耗一般不同。其中不同路径上使用的波导的数量和微环谐振器的数量是影响插入损耗的主要参数。在第 2、3、4 级路由器中,对角线路径无需耦合进微环谐振器即可传输,因此具有较低的插入损耗。而在其余路径中,光信号需要先经过转向光路由器,而后经过第 2、3、4 级中的其中一个光开关才能传输到目的端口,因此这些路径具有较大的插入损耗。

不同路径的插入损耗满足式(1)的逻辑关系。

$$L_{\text{insert}} = \sum L_{\text{bend}} + \sum L_{\text{cross}} + \sum L_{\text{drop}} + \sum L_{\text{through}}, \quad (1)$$

式中, L_{insert} 表示插入损耗, L_{bend} 表示信号通过弯曲波导的损耗, L_{cross} 是信号通过交叉波导的损耗, L_{drop} 是微环谐振器的耦合损耗, L_{through} 表示通过微环谐振器的损耗。依据文献[15]提出的各个参数的特定插入损耗值如表 5 所示,并对各级光路由器进行参数配置。

表 5 不同插入损耗参数值

Tab. 5 Parameters of different insertion loss

Parameter	Value/dB
L_{bend}	0.013
L_{cross}	0.050
L_{drop}	0.500
L_{through}	0.010

论文提出的光 H 树网络通过设计多级光路由器,减少微环谐振器的使用,与其它同等规模的光网络结构性能对比如表 6 所示,包括最大插入损耗以及平均插入损耗。实验结果表明与 λ -Router、GWOR、TAONoC^[16]等无源光路由器相比,平均插入损耗分别降低了 21.5%、10.7%、59.7%。与 Light 相比,平均插入损耗有所差距,但最大插入损耗降低 4.8%。

表 6 各类网络结构插入损耗

Tab. 6 Insertion loss of various network structures

Structure	Insertion loss/dB	
	Max	Avg
λ -Router	1.99	1.81
GWOR	2.21	1.65
TAONoC	2.38	2.38
Light	1.75	1.10
H-tree	1.67	1.49

4.4 网络信噪比分析

无源 H 树光网络由微环谐振器、光波导等基本光器件组成。光信号在通过光器件时,会不可避免地造成部分能量泄露到其他信号中,从而形成其他信号的串扰噪声,影响光路由器及整个片上光互连的可靠性。因此,通过采用多级光路由器,优化微环谐振器布局,同时减少交叉波导的使用,从而降低微环谐振器之间的串扰噪声。 λ -Router 和 GWOR 光网络结构本身具有可拓展性,Light 网络结构利用 3

种基本的 4 端口光路由器实现网络规模的拓展。因此,实验中主要分析由光路由器搭建的 16×16 阵列规模下的网络级信噪比。

根据文献[11]中的实验方案,将激光器功率设为 20 dB/m,光信号耦合进微环谐振器时的串扰参数设置为 -25 dB,通过微环谐振器的串扰参数设置为 -20 dB,通过交叉波导的串扰参数设置为 -40 dB,得到 16×16 阵列规模下不同光网络结构的信噪比(signal to noise ratio, SNR)如表 7 所示。无源 H 树网络与同规模的片上光互连结构如 λ -Router、GWOR、Light 相比,各路径平均信噪比分别提高了 38.5%、36.0%、17.1%。

表 7 各类网络结构信噪比

Tab. 7 SNR of various network structures

Structure	SNR/dB	
	Min	Avg
λ -Router	10.13	10.75
GWOR	7.37	11.19
Light	10.11	14.49
H-tree	13.26	17.48

5 结 论

提出了一种基于微环谐振器的无源片上光互连网络,通过设计转向光路由器以及各级光路由器开关搭建 H 树传输网络,满足片上网络的通信需求。实验结果表明,无源 H 树网络与其他 16×16 规模的经典无源网络结构如 Crossbar、 λ -Router、GWOR 相比,仅使用 72 个微环谐振器。光路由器整体的插入损耗较低,与同规模的片上光互连结构如 λ -Router、GWOR、TAONoC 相比,无源 H 树网络插入损耗分别降低了 21.5%、10.7%、59.7%。同时还具有较高的信噪比,与 λ -Router、GWOR、Light 相比,无源 H 树网络各路径平均信噪比分别提高了 38.5%、36.0%、17.1%。

参考文献:

- [1] GUO P X, HOU W G, GUO L, et al. Fault-tolerant routing mechanism in 3D optical network-on-chip based on node reuse[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2020, 31(3): 547-564.
- [2] CHAUDHARI B, PATIL S. Optimized designs of low loss non-blocking optical router for ONoC applications[J]. International Journal of Information Technology, 2020, 12(1): 91-96.
- [3] SHI X H, WU N, GE F, et al. Srax: a low crosstalk and insertion loss 5×5 optical router for optical network-on-chip[C]//IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 14-17, 2019, Lisbon, Portugal. New York: IEEE, 2019: 3102-3105.
- [4] FADHEL M, GU H X and WEI W T. DORR: a DOR-based non-blocking optical router for 3D photonic network-on-chips: regular section[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2021, 104(5): 688-696.
- [5] SU Y, XIE Y, SONG T, et al. A novel virtual-cluster based architecture of double-layer optical networks-on chip[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(14): 3553-3562.
- [6] LIU F Y, ZHANG H B, CHEN Y W, et al. Wavelength-reused hierarchical optical network on chip architecture for manycore processors[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2019, 4(2): 231-244.
- [7] LI M C, TSENG T M, TALA M, et al. Maximizing the communication parallelism for wavelength-routed optical networks-on-chips[C]//2020 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC), January 13-16, 2020, Beijing, China. New York: IEEE, 2020: 109-114.
- [8] YAO R J, YE Y Y. Toward a high-performance and low-loss cros-benes-based optical network-on-chip architecture[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2020, 39(12): 4695-4706.
- [9] YANG W, CHEN Y W, HUANG Z Y, et al. Path-based routing and wavelength assignment for multiple multicasts in optical network-on-chip[C]//2019 IEEE 21st International Conference on High Performance Computing and Communications, August 10-12, 2019, Zhangjiajie, China. New York: IEEE, 2019: 1155-1162.
- [10] HUANG L, GU H X, TIAN Y H, et al. Universal method for constructing the on-chip optical router with wavelength routing technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(15): 3815-3821.
- [11] ZHENG Z D, LI M C, TSENG T M, et al. Light: a scalable and efficient wavelength-routed optical networks-on-chip topology[C]//2021 26th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC), January 18-21, Tokyo, Japan. New York: IEEE, 2021: 568-573.
- [12] ASADINIA S, MEHRABI M, YAGHOUBI E. Surix: non-blocking and low insertion loss micro-ring resonator-based

- optical router for photonic network on chip[J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 77(1): 4438-4460.
- [13] LEE J H, KIM M S, HAN T H. Insertion loss-aware routing analysis and optimization for a fat-tree-based optical network-on-chip[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2018, 37(3): 559-572.
- [14] WERNER S, NAVARIDS J, LUJAN M. Designing low-power, low-latency networks-on-chip by optimally combining electrical and optical links[C]//2017 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA), February 4-8, 2017, Austin, TX, USA. New York: IEEE, 2017: 265-276.
- [15] LU Y S, YU S J, CHANG Y W. Topological structure and physical layout codesign for wavelength-routed optical networks-on-chip[C]//2020 57th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC), July 20-24, 2020, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2020: 1-6.
- [16] YANG Y T, CHEN K, GU H X, et al. TAONOC: a regular passive optical network-on-chip architecture based on comb switches[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2019, 27(4): 954-963.

作者简介:

蒋 林 (1970—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事专用集成电路设计、计算机体系结构方面的研究。