

并行光收发模块与光互连*

陈雄斌[†] 唐君 周毅 裴为华 刘博 陈弘达

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以 GaAs 基 VCSEL 列阵为光源成功研制出 12 路并行光发射模块, 总速率达 37.5Gbps; 以 GaAs 基 12 路 PIN 探测器列阵为接收单元研制出响应速率达 30Gbps 的 12 路并行光接收模块; 采用并行光收发模块研制出并行光传输系统, 其系统传输速率达 10Gbit/s. 该并行光发射和接收模块以及并行光传输系统能应用于高性能计算机等系统的光互连.

关键词: 甚短距离; 垂直腔面发射激光器; 并行光传输; 光互联

EEACC: 4270; 6260C

中图分类号: TN303

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0529-04

1 引言

随着计算机、网络及其他设备甚至芯片间信息传输速度的增加, 原有的铜线传输因为高频信号随频率增加而呈指数衰减, 传输频率到 10GHz 就已经接近传输极限. 通过 PCB 的电互连也已经成为目前计算机系统性能提升的瓶颈, 根据 Xilinx 公司的研究报告, FR4 板材在采用发射端的预加重和接收端的后均衡技术后, 10GHz 信号也仅可以传送 0.5m 左右. 研究新型光交换和光互连技术, 及其在光系统、光网络、光设备中的应用, 已经成为越来越迫切的要求. 光互连有高达 50THz 的可用带宽, 同时还具有抗干扰和低损耗的特点. 目前, 节点之间的光互连已经达到 30Gbps, 传统意义上的计算机系统内部的互连也正走向通信模式, 高速串行点对点连接正在代替并行总线, 基于包交换的协议将代替独立控制信号, 异步协议也将代替同步协议, 光互联技术将进入计算机系统. 板间光互连将是首先采用的技术, 然后是板内芯片间光互连和芯片内光互连. 国外 Intel 公司等单位, 国内中国科学院半导体研究所等单位在开展硅基光电子集成电路的研究^[1~3], 希望能用标准的 CMOS 工艺来实现芯片间和芯片内的低价格光互连.

光互连有两种互连传输方式: 一种是利用棱镜、透镜、平面镜和衍射器件等在自由空间实现光信号传输的自由空间光互连; 另外一种是利用光纤或者平面波导来实现光信号传输的波导光互连. 本文主要讨论基于甚短距离 (very short reach, VSR) 光收

发模块的波导光互连技术.

2 甚短距离并行光收发模块技术

甚短距离是指最大连接长度不超过 600m (一般不超过 300m), 是局内路由器之间、通信设备机架背板之间的连接距离. 任何通过光信号实现较短距离内的互连, 满足距离和速率要求的传输技术都可以统称为甚短距离传输技术, 而不必局限于传输的具体业务. 从 2000 年光网络互连论坛 (optical internetworking forum, OIF) 开始制定 VSR 的相关建议以来, 国外有 FUJITSU, Optointech, CoreOptic, Agilent, EMCORE, PICOLIGH, ALVESTA 和 PARACER 等公司相继推出了一系列 VSR 产品. 国内高校和科研单位对并行光收发模块及 VSR 技术也做了一些相关理论研究, 研制开发了一些实验产品和系统. 对于成本要求很严的短距离应用场合, 例如光通路和存储域网络 (SAN)、以太网、SDH/SONET 甚短距离范围传输链路和局内链路 (局内交换机、路由器和集线器之间) 乃至设备内部链路等应用场合, 采用较为经济的光通信技术开发短距离光传输系统来占领短距离通信市场具有重要的意义. 所以 VSR 并行光收发技术应运而生.

2.1 VSR 并行光发射模块

传统的边发射激光器的注入电流方向是垂直于光学谐振腔和激光出射方向的, 而垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的注入电流方向与光学谐振腔和激光出射方向是相同的, 故称其为面发射器件. 从工作

* 国家自然科学基金 (批准号: 60502005) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2005AA311030, 2006AA01Z239) 资助项目

[†] 通信作者. Email: chenxiongbin@semi.ac.cn

2006-11-30 收到

原理看, VCSEL 与普通激光器没有什么不同, 但是将谐振腔旋转 90° , 便变成了一种比较特殊的激光器. 首先, 由于 VCSEL 的谐振腔很短, 一般为微米量级, 故纵模间隔为几十纳米量级, 易实现单纵模工作. 纵模间隔 $\Delta\lambda$ 的计算见下式:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L_{\text{eff}}N_g} \quad (1)$$

式中 λ 为激光器的中心波长; L_{eff} 为激光器的等效腔长; N_g 为增益介质的群折射率. 同时 VCSEL 还具有圆形窄波束激射、设计简单、耦合效率高、器件尺寸小、电光转换效率高、无需温控、功耗小等优点. 特别是它易于集成与测试, 可以在同一器件上制造多个 VCSEL 阵列, 利用 VCSEL 做光源可以制造出低成本、高速率发射机.

VSR 并行光发射模块主要由 VCSEL 列阵、驱动电路列阵、控制及接口电路、光电耦合接口、印制电路板及封装部件组成. 它能把输入的低压差分电信号转换成光信号输出. 按通道数目来分有 4 路和 12 路两种方案, 按照总的传输速率来分目前主要有 10G, 30G, 37.5G 以及 40G 这几种. 其中 10G 和 40G 这两种标准速率方案可以与 OIF 的 VSR4 以及 VSR5 相关建议相对应, 可以适用于 OIF 规范的甚短距离光传输系统. 例如万兆以太网、光纤通道等技术, 这些技术都需要在较短距离内, 通过光互连实现大容量信息的传送. 其技术实现, 特别是物理层和数据链路层的技术方案同甚短距离光传输技术密切相关.

采用波长为 850nm 的 GaAs 基 VCSEL 列阵做光源, 我们研制出了 37.5 Gbit/s 高速率的 12 信道并行光发射模块. 所采用的 VCSEL 列阵工作波长在 850nm 附近, 阈值电流为 4mA, 输出光功率大于 1mW, 3dB 带宽大于 3.9GHz. 研制出的 12 路并行光发射模块的单信道 3dB 调制带宽可达 3.6GHz. 在国外, EMCORE 公司和 Corona 公司在 2004 年上半年联合推出的 OptoCube 40-S 12×3.35 Gbps 可插拔发射和接收模块总速率达到了 40Gbit/s. 这些模块可以通过高性能的插座安装到线路上, 尺寸依旧保持在 $13\text{mm} \times 13\text{mm}$. 发射模块采用了 850nm VCSEL 技术. Picolight 公司也已经生产出 40Gbit/s 的 VSR 并行光发射模块, 其型号为 PL-RTCP-01-S63-11, 外形如图 1 所示. 从多家公司均有相关产品可以看出 VSR 并行光发射模块的相关研究技术已经比较成熟.

2.2 VSR 并行光接收模块

从功能上说, VSR 并行光接收模块主要由光电探测器列阵、前置放大器、增益放大器、信号检测电路以及 LVDS 信号输出设备组成. 从结构上讲, 它

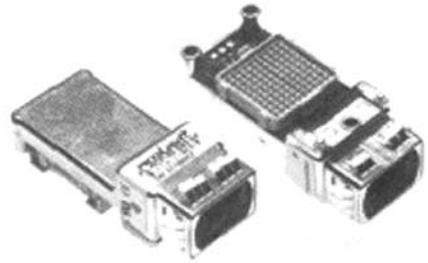


图 1 Picolight 公司的 40Gb/s 并行光收发模块
(图片来自 Picolight 公司)

Fig. 1 40Gb/s parallel optical transmitter and receiver modules of Picolight company

主要由光电探测器列阵、接收电路芯片、外围电路印刷电路板、光电接口以及封装屏蔽组件等部分构成. 它的核心部件是光电探测器. 光电探测器通过吸收光子产生电子-空穴对 (EHPs) 来达到探测光信号的目的. 对于某一特定的探测器材料来说, 只有波长 λ 小于截止波长 λ_g 的光信号才能激发 EHPs. λ_g 的计算如以下公式所示:

$$\lambda_g (\mu\text{m}) = \frac{1.24}{E_g (\text{eV})} \quad (2)$$

式中 E_g 为材料的带隙能量. 对于 InP 材料来说, E_g 为 1.35eV, 故对应的 λ_g 为 $0.91\mu\text{m}$; 对于 GaAs 材料来说, E_g 约为 1.15eV, 故对应的 λ_g 约为 $1.08\mu\text{m}$.

采用砷化镓 (GaAs) 1×12 的 PIN 探测器列阵做探测器, 我们研制出了 30Gbit/s 的 VSR 并行光接收模块. 该模块的 GaAs 1×12 PIN 探测器列阵的制备工艺采用了金属有机化学气相沉积法 (MOCVD). 这种探测器的响应度典型值为 0.5A/W . 虽然 PIN 光电二极管的灵敏度没有 APD 的高, 但它在工作时不需要加很高的偏置电压, 这对于低电压模块设计来说非常重要. 探测器的带宽超过 4GHz, 在 2V 偏压情况下, 暗电流约为 1nA, 结电容约为 1pF. 接收电路芯片的作用主要是对由光探测器阵列转换来的电信号进行放大. 它由前置放大器、单端-双端转换电路和限幅放大器 (limiting amplifier, LA) 构成. 接收电路芯片的工作电压为 3.3V, 可处理的最小光电流信号为 $20\mu\text{A}$, 该模块单信道数据处理能力为 2.5Gbit/s. 在国外, EMCORE 公司和 Corona 公司共同推出的 40Gbit/s 并行光收发模块 OptoCube 40-S 支持 600m 多模光纤传输. Picolight 公司也推出了型号为 PLRRCP-00-S63-11 的 40Gbit/s VSR 并行光接收模块, 其外形也如图 1 所示. 由此可见, 40G bit/s 的 VSR 并行光接收技术也已经成熟.

3 高性能计算机中光互连技术

高性能计算机通过采用多处理器、多存储器、多 IO 设备进行并行处理来提高系统的处理速度和处理能力。互连网络是用来连接处理器、存储器和 IO 设备并承担不同处理器执行体间同步和通信功能的系统部件。其实现需要跨越芯片、PCB、模块、子系统、系统等多个层次，如何确保高带宽、低延迟的互连和交换是高性能计算机系统工程实现中的技术难点。随着高性能计算机性能发展要求的进一步提高，

以前的电互连、电交换技术由于其带宽、互连密度、能耗、时钟完整性和抗干扰性等方面的限制，使其成为了制约系统整体性能的关键因素，也严重影响计算机系统的可扩展性。因此有必要在电互连、电交换技术基础上加快发展光互连和光交换技术。国外有多家研究机构分别开发了自己的实验系统，譬如美国 Columbia 大学的 Data-Vortex 实验系统，美国 IBM、Corning 公司的 OSMOSIS 实验系统（其体系结构如图 2 所示）^[4]。同时 Molex、AIST 公司以及 Texas 大学和 IBM Zurich 实验室还设计了一些光互连背板。

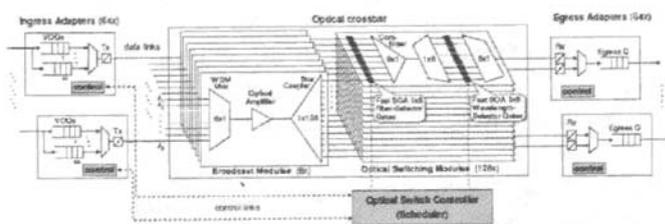


图 2 用空分复用和波长复用实现同步广播和选择的数据交换系统（图片来自 www.ciphotonics.com）

Fig. 2 B&S switch with combined space and wavelength-division switching

3.1 Rapid IO 技术

CPU 运行速率的飞速提高，使得总线速率的进展相形见绌。总线的速率甚至成为系统整体性能提升的瓶颈。同时众多位宽不同的总线标准的出现，使总线接口日益烦琐。为了应对这些问题，出现了 Rapid IO 技术。Rapid IO 是一种开放式的高速率接口标准，可灵活应用于多种总线的高速互连。同时，Rapid IO 还考虑到未来性能进一步提高的问题，可以很方便地进行升级。Rapid IO 可以应用到 CPU、高速 ASIC 和存储器等芯片之间的互连或是高速设备控制面板和功能模块等板块之间的互连或是设备与设备互连等多个领域。Rapid IO 还考虑到和 PCI 总线兼容的问题，可以汇接多路高性能 PCI 总线。

3.2 Infiniband 技术

Infiniband 是一种高性能的 I/O 接口，主要用于数据中心和大规模的应用服务供应商。1999 年，戴尔、IBM 和微软等多家公司组成 Infiniband 商业联盟 (IBTA)，成为 Infiniband 技术开发和商业推广的关键组织。Infiniband 的链路是一种点对点的构造，单路 Infiniband 链路的传输速率为 2.5Gb/s (SDR)，5.0Gb/s (DDR) 以及 10.0Gb/s (QDDR)^[5]。Infiniband 可以提供 1, 4, 8 或者 12 路并行 Infiniband 链路。Infiniband 的物理介质可以

是光纤也可以是铜缆，光纤的传输距离为 10m~10km，铜缆的传输距离约为 17m。从传输距离来看，Infiniband 分两类：一类是长距离传输，一类是短距离传输。长距离传输的 Infiniband 采用单模光纤，短距离的传输基本上都是采用 OM1 和 OM2 类多模光纤。Infiniband 的 4 路 SDR 并行传输模式，总传输速率为 10Gb/s，与 VSR4-3.0 标准所要求的目标相同。VSR4-3.0 标准是用 4 根光纤并行传输数据，每路的传输速率为 2.5Gb/s，两者的物理层可以共享。

现在高性能计算机内部使用的高速通信卡主要使用 Quadrics、Myrinet 和 Infiniband 这三种技术，其中 Quadrics 的带宽可达 4GHz，Myrinet 的带宽可达 2GHz，Infiniband 的带宽最高可达 10GHz。前面两种为公司专有技术，而 Infiniband 则为通用标准技术。这三种技术都同时支持物理层的铜线连接和光纤连接，其中 Infiniband 还直接支持 VSR 标准。Infiniband 收发信号支持的接口宽度包括 1, 4, 8 和 12 路。所以如果采用 12 路的传输方案，Infiniband 技术最高可以支持 120Gbps 的通信链路，不过目前一般主机提供的 I/O 接口最高速率仅为 30Gbps 左右，因此可以使用我们已研制的 30Gbps 并行光收发模块来实现 12 路的并行光互连。

4 VSR 并行光传输系统

我们利用 VSR 并行光收发模块成功研制出了

甚短距离 12 信道 SDH 光传输系统,该系统总的传输速率为 10Gbit/s.该系统能把 16 位宽的 STM-64 的 10Gbit/s 电信号转换成 12 路光信号,并实现全双工传输.同时,由于该系统采用了冗余编码技术和冗余通道技术,使系统具有较强的检错和纠错能力.该系统结构紧凑,系统子板的 PCB 大小仅为 47mm × 93mm,尺寸大小符合 XENPAK II 标准,小于 CISCO 公司的相应产品以及所有适用 XENPAK 标准的类似系统.系统子板结构如图 3 所示,系统子板左边背面的 300 针 MSA 连接器用来实现与外部的 16 位宽 10Gbit/s SDH 电信号以及时钟的连接,同时完成电源的供给、控制信号的输入、状态信号的输出功能.子板右边为可插拔的 VSR 并行光收发模块,用来实现 12 路 1.25Gbit/s 光信号的收发.系统信号格式的转换通过板上的 SerDes 集成芯片来实现,同时为了便于系统调试,我们还配置了一个 JTAG 连接器接口.两块系统子板通过两根 12 芯的多模光纤带可以实现 10G SDH 电信号的全双工光传输.

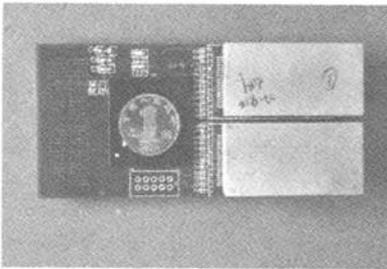


图 3 VSR 并行光传输系统子板

Fig. 3 VSR parallel optical transmission subsystem

5 结论

本文介绍了 VSR 并行光收发模块以及系统的研制.随着高速并行光收发模块技术发展的日趋成熟,高性能计算机和通信系统及设备对短距离高速光互连需求的日益增加,这种基于高性价比 VSR 并行光收发模块的光互连技术将会得到广泛应用.不过目前光互连用于计算机系统还有一个致命的弱点,就是没有相应的光交换技术.光交换技术,尤其是针对高性能计算机中以包交换为主的细粒度连接方式的交换技术,值得我们进行研究.相信很快我们就能看到高性能计算机以及路由器中板间光互连技术的全面国产化,并在不久的将来实现板内光互连和光交换.

参考文献

- [1] Rong H, Liu A, Jones R, et al. An all-silicon Raman laser. *Letters to Nature*, <http://www.nature.com/nature>, 2005
- [2] Snyman L W, Aharoni H, Biberic A, et al. Optical sources, integrated optical detectors and optical waveguides in standard silicon CMOS integrated circuitry. *Proceedings of SPIE*, 2000, 3953:20
- [3] Yamada A, Sakuraba M, Murota J. Propagation characteristics of Si nitride optical waveguide integrated with Si p-i-n diodes for light emitter and detector. *1st IEEE International Conference on Group IV Photonics*, 2004:142
- [4] Hemenway R, Grzybowski R R. Optical-packet-switched interconnect for supercomputer applications. *J Optical Networking*, 2004, 3(12):901
- [5] Infiniband SM Trade Association. *Infiniband TM architecture specification*, 2004, 2:94

Parallel Optical Transmitter and Receiver Modules with Optical Interconnection*

Chen Xiongbin[†], Tang Jun, Zhou Yi, Pei Weihua, Liu Bo, and Chen Hongda

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A new 12 channels parallel optical transmitter module, in which a GaAs-based VCSEL array has been selected as the optical source, is capable of transmitting 37.5Gbps data over hundreds of meters. A new 12 channels parallel optical receiver module, in which a GaAs-based photo detector array of PIN type has been selected as the optical receiver unit, is capable of responding to 30Gbps data. A novel parallel optical 10G bit/s transmission system based on parallel optical transmitter and receiver modules was made. This kind of parallel optical transmitter module, receiver module and transmission system can be used in high performance computer systems for optical interconnection.

Key words: very short reach; VCSEL; parallel optical transmission; optical interconnection
EEACC: 4270; 6260C

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0529-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60502005) and the National High Technology Development Program of China (Nos. 2005AA311030, 2006AA01Z239)

[†] Corresponding author. Email: chenxiongbin@semi.ac.cn

Received 30 November 2006