



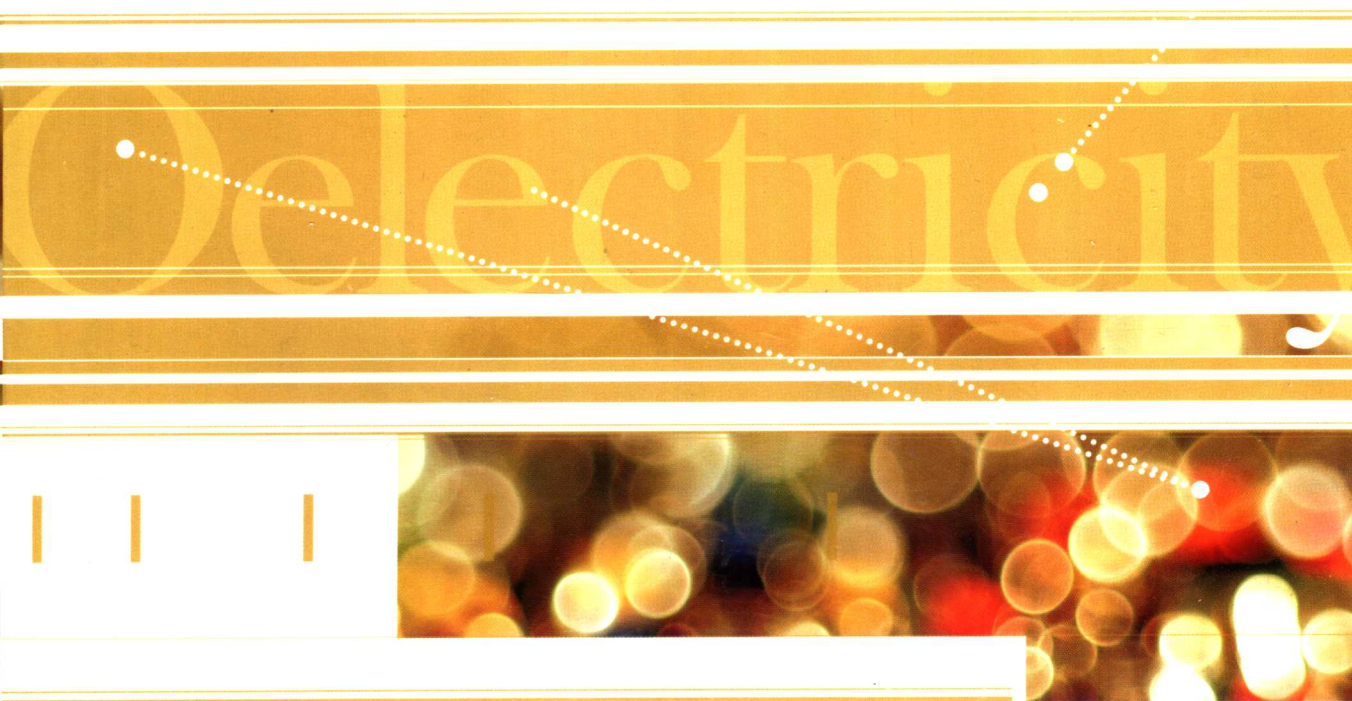
“十一五”国家重点图书出版规划项目
光电技术与系统精品丛书

光互连网络技术

Optics Inter-connected

•• Networks Techniques

张以谟 主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子信息科技专著出版专项资金资助出版
“十一五”国家重点图书出版规划项目
光电技术与系统精品丛书

光互连网络技术

张以谟 主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

采用多处理器、多存储器、多 I/O 设备进行并行处理是实现巨型计算机的根本方法,而互连网络是连接它们的系统部件,是系统的重要组成部分。当前光互连已经和网络技术紧密地结合在一起。本书分三个部分,分别介绍了光互连的基础知识,光互连网络器件基础,光互连技术问题。

本书主要为从事巨型计算机和集群系统光互连和光交换硬件系统、光网络设计,光通信技术及其他光信息设备的科研人员、教学人员和产业科技人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

光互连网络技术/张以谟主编. —北京:电子工业出版社, 2006.12

(光电技术与系统精品丛书)

ISBN 7-121-03273-2

I. 光… II. 张… III. 光纤通信—通信网 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 119165 号

责任编辑:许 楷 窦 昊

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:34.5 字数:753 千字 插页:2

印 次:2006 年 12 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系电话:(010) 68279077;邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

丛 书 编 委 会

名誉顾问

王大珩 中国科学院院士、中国工程院院士，中国科学院研究员

主 任

张以谟 天津大学教授

委 员 (排名不分先后)

母国光 中国科学院院士，南开大学教授

王启明 中国科学院院士，中国科学院研究员

金国藩 中国工程院院士，清华大学教授

周立伟 中国工程院院士，北京理工大学教授

黄尚廉 中国工程院院士，重庆大学教授

叶声华 中国工程院院士，天津大学教授

倪国强 北京理工大学教授

宋菲君 中国科学院研究员

秘 书 长

丁伯瑜 中国光学学会副秘书长，北京理工大学教授

联络委员

许 楷 电子工业出版社策划编辑

王春宁 电子工业出版社高级策划编辑

序 言

20 世纪 50 年代出现了计算机, 60 年代高锟博士提出“光通信技术”, 同期出现了激光器, 80 年代斯坦福大学顾德曼教授提出“光互连技术”。二十多年来由于巨型计算机的发展, 以及大规模并行处理 (MPP) 系统和机群系统的发展, 低损耗、高带宽、高速传输、抗干扰已成为高性能结点之间通信所必需, 但在电互连中存在所谓“电子瓶颈”。光互连在一定程度上能够满足上述要求并能够克服“电子瓶颈”。“光互连网络技术”中的主要内容包括: 光互连结构、光链路、光交换、光路由等技术, 并已逐步形成“光互连”技术及产品体系。其特殊性能已在科技、工业、军工、能源、生物、医学等领域中开始发挥重要作用。

为了从器件、部件和技术的角度较为全面地阐述光互连技术, 故编写这本《光互连网络技术》作为参考书和教学用书, 希望能对推广光互连应用技术起到积极作用。

(1) 编写思路、特色 由于计算机光互连网络正在发展和完善之中, 对于从事光互连网络技术的工程技术人员、研究人员及有关专业学生等, 需要一本从器件、部件和技术的角度较为全面阐述光互连技术的图书。本书力争能够做到: 讨论和阐述的内容符合学科前沿性、先进性, 注意理论性; 例证有实用性; 适当反映作者科研组所从事的研究和开发工作; 通过本书可使读者较为全面地掌握光互连网络技术有关硬件基本知识, 进而为应用该知识在实际工作中发挥有益的作用。

(2) 内容简介 第一部分 (第 1~4 章) 为光互连的基础知识: 主要叙述电互连和光互连的比较, 光互连的物理依据及其特点; 互连网络体系结构概述, 巨型计算机和 MPP 系统的定义及其互连特点; 互连网络体系结构。第二部分 (第 5~7 章) 为光互连网络器件基础: 主要介绍器件工艺基础知识, 光互连网络中的光源和探测器, 光集成器件等。第三部分 (第 8~12 章) 为光互连技术: 主要叙述光互连技术及光链路技术, 光交换技术, 有旋转层 (用于雷达车、摄像车等) 的光互连, 即光旋转连接器。并讨论有关前沿技术在光交换中的应用, 包括实时空间光调制器、全息术、声光器件和 MEMS 等特点及其在光交换中的应用。

本书在编写过程中, 承蒙赵红东教授协助核对了器件工艺概述和重要光电器件部分, 陈才和教授和孙德贵研究员协助核对了光集成器件部分, 井文才教授和唐峰博士编写了光链路部分, 于晋龙教授协助编写了光开关部分, 吕旦妮博士编写了全息光互连部分, 贾大功博士编写了旋转连接器部分, 对于本书的完成起到了重要作用。我的学生和家人对本书的编写给予了重要支持, 李月女士在本书编写过程中做了重要的文秘工作, 就此一并致谢。

主编 褚明谦

目 录

第一部分 光互连的基础知识	(1)
第1章 概述	(3)
1.1 光互连网络概念及背景	(3)
1.2 从光的本性讨论实现光互连的物理依据	(5)
1.3 光互连系统的一些技术特性	(7)
1.4 光互连的发展史	(8)
参考文献	(11)
第2章 计算机系统体系结构概述	(12)
2.1 概述	(12)
2.2 巨型计算机	(12)
2.2.1 巨型计算机的定义	(12)
2.2.2 巨型计算机并行处理的粒度	(13)
2.2.3 MPP 系统与并行处理器系统的定义	(13)
2.2.4 MPP 系统和并行向量系统之间的差别	(15)
2.3 计算机分类学	(17)
2.3.1 Flynn 分类法	(17)
2.3.2 Skillicorn 分类学	(19)
2.3.3 Bell 的分类学	(20)
2.3.4 Frietman-van Nifterick 分类学	(20)
2.4 巨型计算机体系结构的分类学	(21)
2.4.1 光互连网络设计过程中的体系结构与物理结构	(21)
2.4.2 并行计算机扩展	(21)
2.5 结论和展望	(23)
参考文献	(24)
第3章 光互连网络概述	(25)
3.1 概述	(25)
3.1.1 大规模并行计算机中的互连网络	(25)

3.1.2	电互连的优势与限制	(25)
3.1.3	光互连的优越性	(26)
3.1.4	光互连技术的实现方式	(27)
3.2	网络拓扑学	(28)
3.2.1	网络拓扑的基本概念	(28)
3.2.2	基本网络拓扑类型	(28)
3.2.3	多级开关网络 (multistage networks)	(32)
3.3	并行计算机系统中的光纤互连技术	(35)
3.3.1	光互连网络的多路复用	(35)
3.3.2	多路复用的类型	(36)
3.3.3	光的多路解复用	(37)
3.3.4	加/减多路复用	(41)
3.4	同步光网络	(41)
3.4.1	SONET 标准	(42)
3.4.2	环状结构 SONET	(42)
3.5	密集波分复用 (DWDM)	(43)
3.5.1	光谱传输的窗口	(44)
3.5.2	DWDM 的发展	(45)
3.5.3	DWDM 的运行	(46)
3.5.4	放大器和 DWDM	(47)
	参考文献	(49)

第 4 章 光互连系统 (52)

4.1	概述	(52)
4.1.1	并行处理系统互连网络主要参数	(53)
4.1.2	提高互连网络性能的途径	(54)
4.1.3	光网络的评价特性	(55)
4.2	并行计算机系统中的光纤互连技术	(59)
4.2.1	光电混合互连	(59)
4.2.2	光纤镶嵌机敏层互连背板	(60)
4.2.3	光纤与光源的耦合	(60)
4.3	光电混合光纤互连方式	(62)
4.3.1	并行处理系统中光互连网络的特点	(62)
4.3.2	并行光互连链路	(63)
4.3.3	聚合物光导材料与光互连	(63)

4.3.4	WDM 技术与光互连	(65)
4.4	自由空间光互连背板	(66)
4.4.1	自由空间多面镜光互连	(66)
4.4.2	透镜-多面镜连接器	(66)
4.4.3	透镜-多面镜组合光学背板的相关器件	(67)
4.4.4	自由空间多成像互连背板	(71)
4.4.5	动态实验测量	(76)
4.4.6	光学模块的模拟	(80)
4.5	平板波导双向光背板总线	(82)
4.5.1	计算机电子背板总线系统限制	(82)
4.5.2	双向光背板总线体系结构	(83)
4.5.3	多机系统光背板总线实验结果	(84)
4.5.4	光背板总线系统的理论限制	(86)
4.5.5	总线协议适用于光背板总线系统	(90)
4.5.6	双向光背板总线质量的影响因子	(92)
4.6	基于智能像素自由空间光互连	(93)
4.6.1	自由空间互连与智能像素概述	(93)
4.6.2	智能像素三维光互连系统	(96)
4.6.3	VCSEL/Si 智能像素阵列	(98)
4.6.4	智能像素阵列光机处理系统	(100)
4.6.5	智能像素阵列的封装	(101)
4.7	空分-波分复用联合的广播和选择 (B&S) 交换系统	(102)
	参考文献	(105)
第二部分 光互连网络器件基础		(111)
第 5 章 器件制备技术概述		(113)
5.1	半导体衬底制备	(113)
5.1.1	直拉法生长硅单晶	(113)
5.1.2	GaAs 的生长	(115)
5.2	扩散掺杂和离子注入	(117)
5.2.1	扩散	(117)
5.2.2	离子注入	(120)
5.3	光刻技术	(125)
5.3.1	集成电路设计中的光刻概述	(125)

5.3.2	接触式/接近式光刻机	(128)
5.3.3	投影光刻机	(130)
5.3.4	掩模缺陷检测和分辨率提高	(133)
5.3.5	光刻胶	(137)
5.4	物理淀积薄膜制备	(142)
5.4.1	蒸发	(142)
5.4.2	溅射	(146)
5.4.3	化学气相淀积	(149)
5.5	外延生长	(153)
5.5.1	外延生长原理	(153)
5.5.2	外延生长设备	(157)
5.6	器件隔离	(163)
5.6.1	PN 结隔离和氧化物隔离	(163)
5.6.2	硅的局部氧化隔离技术	(165)
5.6.3	沟槽隔离	(166)
5.6.4	绝缘体上硅隔离技术	(168)
5.6.5	半绝缘衬底	(169)
5.7	器件接触和金属化	(170)
5.7.1	肖特基接触与欧姆接触	(170)
5.7.2	合金接触与多层金属化	(171)
	参考文献	(174)

第 6 章 光源及探测器

6.1	光电子器件概述	(178)
6.1.1	激光器	(178)
6.1.2	光电探测器及阵列光电导探测器	(180)
6.1.3	无源光电子器件	(182)
6.1.4	光纤器件	(183)
6.1.5	二元光学元件	(185)
6.2	光电子材料	(186)
6.2.1	铁电氧化物基材料	(186)
6.2.2	玻璃基材料	(187)
6.2.3	硅基材料	(187)
6.2.4	III-V 族化合物	(188)
6.2.5	II-VI 族化合物	(188)

6.2.6	有机聚合物材料	(188)
6.2.7	磁光材料	(189)
6.2.8	LiF 材料	(190)
6.3	发光二极管	(192)
6.3.1	发光二极管的结构和基本工作原理	(192)
6.3.2	高速发光二极管	(198)
6.3.3	超辐射发光二极管 (SLD)	(201)
6.4	半导体激光二极管和激光器组件	(204)
6.4.1	半导体激光二极管的应用和分类	(204)
6.4.2	法布里-珀罗型激光二极管	(205)
6.4.3	分布反馈激光二极管和分布布拉格反射器激光二极管	(209)
6.4.4	量子阱激光器	(212)
6.4.5	垂直腔面发射激光器 (VCSEL)	(218)
6.4.6	激光器组件	(219)
6.4.7	衡量激光二极管和激光器组件的常用参数	(220)
6.5	光电探测器和光接收组件	(233)
6.5.1	PN 结光电二极管	(233)
6.5.2	肖特基光电二极管	(236)
6.5.3	集成光学型光电探测器	(238)
6.5.4	光接收组件	(240)
6.5.5	光电探测器和光接收组件常用参数	(242)
	参考文献	(246)
第 7 章	光互连网络中的光集成器件	(248)
7.1	集成光学器件概述	(248)
7.2	集成光学调制器	(249)
7.2.1	铁电晶体集成光学器件	(249)
7.2.2	波导 Mach-Zehnder 干涉仪型电光调制器	(250)
7.2.3	对集成光学调制器的性能要求	(251)
7.2.4	其他集成光学调制器	(252)
7.3	III-V 族半导体集成光学器件	(253)
7.3.1	GaAs 基集成光学器件	(253)
7.3.2	InP 基集成光学器件	(260)
7.4	硅基集成光学器件	(267)
7.4.1	硅光波导	(267)

7.4.2	SiO ₂ 光波导	(269)
7.4.3	硅光波导集成光学器件	(270)
7.4.4	SiO ₂ 基波导集成光学器件	(274)
7.5	聚合物基集成光学器件	(282)
7.5.1	聚合物光波导	(283)
7.5.2	聚合物光功率分配器	(286)
7.5.3	聚合物波导偏振分束器和偏振器	(288)
7.5.4	聚合物基波分复用器/解复用器	(292)
7.5.5	聚合物波导光束偏转器	(297)
7.6	SiO ₂ 基 PLC 平台上的混合集成技术	(300)
7.6.1	多芯片光混合集成技术	(300)
7.6.2	光电多芯片组件集成技术	(302)
7.6.3	PLC 光收发两用机组件	(306)
7.6.4	PLC 平台多信道 LD 组件	(307)
7.6.5	PLC 波导隔离器	(307)
7.6.6	PLC 高速混合集成光接收机阵列组件	(309)
	参考文献	(310)

第三部分 光互连技术

第 8 章 光链路技术

8.1	计算机光互连技术概况	(317)
8.1.1	计算机高速互连协议	(318)
8.1.2	计算机专用互连系统	(319)
8.2	计算机时分复用光纤互连技术	(326)
8.2.1	时分复用高速光互连链路	(327)
8.2.2	时分复用高速光互连环网	(332)
8.2.3	光互连环网的扩展	(336)
8.3	计算机波分复用光互连网络	(337)
8.3.1	计算机双波长环网	(339)
8.3.2	粗波分复用光互连网络	(341)
8.4	计算机空间红外无线互连技术	(343)
8.4.1	计算机间红外数据链路	(343)
8.4.2	计算机红外无线网络	(351)
	参考文献	(356)

第 9 章 光开关在光互连技术中的应用	(360)
9.1 概述	(360)
9.1.1 网络中开关的作用	(360)
9.1.2 开关在网络中的作用	(364)
9.1.3 各种开关方式	(366)
9.1.4 ATM 交换	(369)
9.1.5 光学对开关技术的作用	(370)
9.2 光开关的原理	(371)
9.2.1 光开关是实现光交换的核心器件	(371)
9.2.2 光交叉连接	(372)
9.2.3 光分插复用器	(374)
9.3 光开关的结构	(382)
9.3.1 光开关的性能及参数	(382)
9.3.2 光开关的分类及其原理	(383)
9.3.3 其他类型光开关	(389)
9.4 光交换原理和光开关矩阵	(392)
9.5 自由空间光开关	(393)
9.5.1 自由空间光学	(393)
9.5.2 SEED 开关	(397)
9.5.3 EARS 开关	(399)
9.5.4 智能像素	(400)
9.5.5 多级光束位移器型光开关	(401)
9.5.6 相干光光开关	(402)
9.6 热光型光开关	(402)
9.6.1 热光型光开关原理	(402)
9.6.2 2×2 热-光开关和复用器/解复用器	(403)
9.6.3 $N \times N$ 热-光矩阵光开关	(405)
9.6.4 热-光数字开关	(406)
9.7 聚合物波导调制器和开关	(409)
9.7.1 聚合物波导调制器	(409)
9.7.2 聚合物数字开关	(411)
9.7.3 聚合物热光开关	(412)
参考文献	(414)

第 10 章 全息术用于交换技术	(418)
10.1 全息术的基本原理	(418)
10.1.1 全息术的基本概念	(418)
10.1.2 体全息图及布拉格选择性	(419)
10.2 全息光互连原理及方法	(420)
10.3 全息复用技术	(423)
10.3.1 空间复用技术	(424)
10.3.2 随机位相编码复用	(424)
10.3.3 位移复用	(428)
10.3.4 角度复用	(433)
10.4 全息互连元件的制作	(436)
10.4.1 全息透镜阵列	(437)
10.4.2 交叉光互连全息元件	(437)
10.4.3 光互连主板	(439)
10.4.4 多级衍射全息光栅	(440)
10.5 可擦除全息记录与全息图的固化	(442)
10.5.1 光折变全息存储机理	(443)
10.5.2 可擦除全息记录	(445)
10.5.3 全息图的热固定	(447)
10.5.4 全息图的光固定	(449)
10.6 计算全息图	(452)
10.6.1 相息图	(454)
10.6.2 Dammann 光栅和位相光栅	(455)
10.6.3 位相计算全息光栅	(456)
10.7 全息图用于光互连网络中的交换	(457)
10.7.1 全混洗网络	(457)
10.7.2 蝶型互连	(460)
10.7.3 印刷电路板之间的全息光互连	(462)
10.7.4 多级扇出/扇入互连网络	(464)
10.8 多级电控全息交叉互连	(467)
参考文献	(469)
第 11 章 实时空间光调制器用于光交换	(475)
11.1 概述	(475)

11.1.1	实时空间光调制器	(475)
11.1.2	光学空间光调制器互连网络模型	(477)
11.2	液晶光阀实时空间光调整器用于光交换	(480)
11.2.1	液晶材料	(480)
11.2.2	液晶光阀器件	(483)
11.2.3	阴极射线管耦合液晶光阀	(486)
11.2.4	液晶光阀实时空间调制器互连方案	(487)
11.3	声光调制器光互连方案	(490)
11.3.1	声光器件的原理和结构	(490)
11.3.2	声光调制器	(493)
11.3.3	声光光子开关光互连	(495)
11.4	数字微镜器件光学交叉开关	(497)
11.5	折变晶体光互连	(498)
11.5.1	光折变晶体概述	(498)
11.5.2	光折变晶体互连方案	(500)
	参考文献	(502)
第 12 章	光纤旋转连接器	(505)
12.1	概述	(505)
12.2	光纤旋转连接器的种类及工作原理	(509)
12.2.1	光纤旋转连接器的种类	(509)
12.2.2	光纤旋转连接器的工作原理	(509)
12.2.3	光纤连接器的装配误差	(511)
12.3	透镜扩束旋转连接器	(513)
12.3.1	透镜扩束旋转连接器原理	(513)
12.3.2	自聚焦透镜旋转连接器	(516)
12.4	有源光纤旋转连接器	(520)
12.4.1	单通道有源光纤旋转连接器	(521)
12.4.2	多通道有源光纤旋转连接器	(523)
12.5	无源光纤旋转连接器	(523)
12.5.1	无源光纤旋转连接器的发展	(523)
12.5.2	无源光纤旋转连接器的类型	(524)
12.5.3	单通道无源光纤旋转连接器	(525)
12.5.4	多通道无源光纤旋转连接器	(526)
12.5.5	菲涅耳透镜的多通道光纤旋转连接器	(527)

12.6 多波长光纤旋转连接器	(528)
12.6.1 无源多路空间光旋转连接器	(528)
12.6.2 红外旋转连接器	(530)
12.6.3 红外旋转连接器的角度偏差、离轴偏差和轴向偏差	(532)
参考文献	(534)
编后语	(537)

第一部分 光互连的基础知识

本部分包括：光互连网络概念及背景，大规模并行计算机的互连性质，从光的本性讨论实现光互连的物理依据。为了解光互连技术的特点，有必要讨论计算机的体系结构和计算机分类学，即巨型计算机、大规模并行处理（MPP）系统与并行处理器系统等，以便介绍计算机光互连的结构和性能。在考虑光互连的条件下，在互连网络设计过程中，要考虑体系结构和物理结构。在了解计算机的分类和体系结构的基础上，讨论了大规模并行计算机中的互连网络的特点、网络拓扑学的概念及网络拓扑的基本类型。并行计算机系统的光纤互连技术，光互连网络的多路复用及解复用的主要类型。介绍了同步光网络（SONET）和波分复用（WDM）及其光谱窗口。阐述了互连网络的主要参数。讨论了光网络的评价特性，包括调制传递函数和强度函数的应用。叙述了并行计算机系统的光纤互连技术：光电混合互连，光电混合光纤互连方式，并行光互连链路信息的光电子技术，聚合物光导材料与光互连，WDM 技术用于计算机光互连，自由空间光互连底板，平板波导双向光底板总线的结构、协议与特点，智能像素自由空间光互连等。

