



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 15

硅基光电子学

〔美〕周治平 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 15

硅基光电子学

〔美〕周治平 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

硅基光电子学/(美)周治平主编. —北京:北京大学出版社,2012.8
(中外物理学精品书系·前沿系列)

ISBN 978-7-301-21006-2

I. ①硅… II. ①周… III. ①硅基材料—光电子学—研究 IV. ①TN304.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 166412 号

书 名: 硅基光电子学

著作责任者:〔美〕周治平 主编

责任编辑:王剑飞

标准书号: ISBN 978-7-301-21006-2/O·0877

出版发行:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014

出版部 62754962

印 刷 者:北京中科印刷有限公司

经 销 者:新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 19.75 印张 357 千字

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 54.00 元

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

举报电话:(010)62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

《中外物理学精品书系》 编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：(按姓氏笔画排序,标*号者为执行编委)

王力军	王孝群	王牧	王鼎盛	石兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱星
向涛	刘川*	许宁生	许京军	张酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭卫*
资剑	龚旗煌	崔田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础,同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到,改革开放三十多年来,随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展,我国物理学取得了跨越式的进步,做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下,近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看,尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书,但系统总结物理学各门类知识和发展,深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源,并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考,仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是展现近年来中国物理学者的研究水平和成果,北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了《中外物理学精品书系》,试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家,确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富,涵盖面广,可读性强,其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结,也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示;既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态,也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说,《中外物理学精品书系》力图完整呈现近现代世界和中国物理科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

《中外物理学精品书系》另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究

的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,《中外物理学精品书系》还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子亲身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套《中外物理学精品书系》的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

《中外物理学精品书系》编委会 主任
中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

内 容 简 介

本书是笔者在微纳光电子领域多年研究和教学基础上完成的,系统描述了硅基光电子学的基础理论、器件原理及应用前景。全书共 10 章。第 1~3 章讲述了硅基光电子学的起源及所需的基本知识;第 4 章介绍了硅基无源器件;第 5~8 章为硅基有源器件,包括光源、调制器、探测器、表面等离子体激元器件等;第 9 章介绍器件工艺与系统集成;第 10 章探讨了硅基光电子学的应用。

本书可作为高等院校电子学、光电子学、物理电子学、微电子与固体电子学、通信与信息系统、计算机技术等专业高年级本科生和研究生相关课程的教材。对于在相关领域内工作的研究人员和工程技术人员,本书也是一本有用的参考书。

前 言

晶体管这个被誉为 20 世纪最伟大的发明改变了世界,而以硅材料为基础的微电子器件则以其低功耗、低成本、易集成等优点迅速占领了绝大部分电子市场,并成为当时高科技产业的重要支柱.从晶体管的发明、集成电路的出现,到计算机的不断更新换代,再到通信网络的飞速发展,人类生活的各个层面无不打下了微电子的烙印——微电子产品已经被用到人们物质生活的各个层面;微电子的设计思想和制作方法也已经渗入到不同学科及领域.

然而,微电子器件的进一步小型化使得集成电路的互连延迟效应及能耗问题成了以电子作为信息载体的高速集成电路技术的一个不可逾越的障碍.与电子相比,光子作为信息载体具有巨大的优势:光子没有静止质量,光子之间也几乎没有干扰,光的不同波长可用于多路同时通信,因此利用光子的通信信息技术具有更大的带宽和更高的速率.

所谓硅基光电子学,就是研究、开发以光子和电子为信息载体的硅基大规模集成技术.其核心内容就是研究如何将光子器件“小型化”、“硅片化”并与纳米电子器件相集成,即利用硅或与硅兼容的其他材料,应用硅工艺,在同一硅衬底上同时制作若干微纳量级,以光子、电子为载体的信息功能器件,形成一个完整的具有综合功能的新型大规模集成芯片.

虽然硅材料在光电效应方面存在着“先天不足”,而光子器件在尺寸方面也“衍射受限”,但将微电子和光电子结合起来,开发硅基大规模光电子集成技术,已经成为信息技术发展的必然和业界的普遍共识.本书的目的之一在于为这一历史进程提供理论研究和开发的支持,希望其内容能够对读者起到一个“抛砖引玉”的作用.

本书是笔者在微纳光电子领域多年研究和教学基础上完成的,系统描述了硅基光电子学的基础理论、器件原理及应用前景.全书共 10 章.第 1~3 章讲述了硅基光电子学的起源及所需的基本知识;第 4 章介绍了硅基无源器件;第 5~8 章为硅基有源器件,包括光源、调制器、探测器、表面等离子体激元器件等;第 9 章介绍器件工艺与系统集成;第 10 章探讨了硅基光电子学的应用.笔者及其所领导的硅基光电子及微系统研究团队是本书编写过程中的主要贡献者.其中笔者编写了第 1,2,6 章,杨俊波编写了第 3 章,吴华明编写了第 4 章,王兴军编写了第 5,7 章,肖功利编写了第 8 章,冯俊波编写了第 9 章,易华祥编写了第 10 章.在成书过程中,王雨竹、侯金、王冰、郭瑞民、胡飞飞、王磊、伍丹华、高琳斐、谈

卫、龙祁峰、涂芝娟、尹兵、尹美、陈特、臧凯、袁格、洪凌宇、王人泽等提供了相关协助及修改意见。

感谢科技部、国家自然科学基金委员会、北京大学、华中科技大学、乔治亚理工学院为本书的编写在科研项目和工作环境方面的支持。也感谢 IEEE IV 族光电子学国际会议(International Conference on Group IV Photonics)这一信息交流平台为本书的形成所提供的部分思路和灵感。

周治平

2011年12月24日于北京

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 从微电子到光电子	(1)
§ 1.2 硅基光电子学的发展	(5)
§ 1.3 硅基光电子学的应用.....	(12)
§ 1.4 总结.....	(13)
参考文献	(14)
第二章 硅中光子与电子的相互作用	(16)
§ 2.1 波动光学与光子光学.....	(16)
§ 2.2 半导体能带结构.....	(25)
§ 2.3 硅基光子晶体带隙结构.....	(47)
§ 2.4 硅中光子与载流子的相互作用.....	(58)
参考文献	(70)
第三章 硅基光波导	(73)
§ 3.1 电磁理论基础.....	(73)
§ 3.2 光波导基本理论.....	(86)
§ 3.3 波导耦合理论.....	(94)
§ 3.4 SOI 光波导.....	(99)
参考文献.....	(103)
第四章 硅基无源器件	(105)
§ 4.1 光栅器件	(105)
§ 4.2 光子晶体平板波导	(109)
§ 4.3 多模干涉耦合器	(115)
§ 4.4 阵列波导光栅	(118)
§ 4.5 微环谐振腔	(125)
§ 4.6 总结	(133)
参考文献.....	(134)
第五章 硅基光源	(140)
§ 5.1 光发射的基础理论	(140)

§ 5.2	硅放大的限制	(145)
§ 5.3	硅基发光材料	(146)
§ 5.4	硅基发光二极管	(151)
§ 5.5	硅基激光器	(154)
§ 5.6	总结	(157)
	参考文献	(157)
第六章	硅基光学调制	(161)
§ 6.1	光学调制原理	(161)
§ 6.2	光学调制评价	(163)
§ 6.3	硅基电光调制	(164)
§ 6.4	硅基热光调制	(185)
§ 6.5	硅基声光调制	(189)
	参考文献	(196)
第七章	硅基光电探测器	(199)
§ 7.1	光电探测器的基本原理	(199)
§ 7.2	光电探测器的特性和结构	(202)
§ 7.3	硅光电探测器	(210)
§ 7.4	锗硅光电探测器	(212)
§ 7.5	总结	(225)
	参考文献	(225)
第八章	硅基表面等离子激元器件	(229)
§ 8.1	表面等离子激元概述	(229)
§ 8.2	表面等离子激元局域增强特性	(240)
§ 8.3	表面等离子体激元器件	(242)
§ 8.4	总结	(250)
	参考文献	(251)
第九章	硅基光电子器件工艺与系统集成	(255)
§ 9.1	平面工艺	(255)
§ 9.2	薄膜制备	(258)
§ 9.3	光刻技术	(262)
§ 9.4	刻蚀技术	(276)
§ 9.5	系统集成	(281)
§ 9.6	总结	(283)
	参考文献	(283)

第十章 硅基光电子学的应用	(284)
§ 10.1 光互连——集成高速硅基互连芯片.....	(284)
§ 10.2 光通信——集成 100 Gbit/s 相干传输芯片	(290)
§ 10.3 光传感——集成光学传感片上系统芯片.....	(294)
§ 10.4 太阳能电池.....	(297)
参考文献.....	(300)

第一章 绪 论

§ 1.1 从微电子到光电子

微电子时代的发展可以追溯到晶体管的出现. 1947年12月16日, 美国 AT&T 公司 Bell 实验室的三位科学家 William Shockley, John Bardeen 和 Walter Brattain 制成了世界上第一支晶体管, 开始了以晶体管代替电子管的时代, 从而拉开了微电子时代的序幕. 晶体管这个被誉为 20 世纪最伟大的发明改变了世界, 而以硅(Si)材料为基础的半导体工业迅速占领了绝大部分市场, 并成为当时高科技产业的重要支柱. 从晶体管的发明、集成电路(integrated circuit, IC)的出现、计算机的不断更新换代, 再到通信网络的飞速发展, 人类生活的各个层面无不打下了微电子的烙印——微电子产品已经被用到人们物质生活的各个层面; 微电子的设计思想和制作方法也已经渗入到不同学科及社会领域. 这一时代被誉为“微电子时代”是恰如其分的. 但是, 随着微电子技术往纵深方向发展, 其量子特征也逐渐表现出来. 近 50 年来一直成功地描述了 IC 发展趋势的摩尔定律也正在接近极限.

1.1.1 微电子技术所面临的挑战

微电子技术是建立在以三极管等半导体器件为核心的集成电路基础上的, 其主要产品集成电路芯片是构成各种电子电路和电子信息系统的核心部件. 60 多年来, 微电子技术按照摩尔定律预测的那样, “半导体芯片的集成度每 18 个月增长一倍, 而价格则降低一半”, 以惊人的速度一直发展着. Intel 公司曾宣布, 从 2011 年的下半年开始, 将采用新的 22 nm 工艺生产新一代的微处理器^[1]. 而根据国际半导体技术蓝图(ITRS)2009 年发布的半导体技术路线图预测, 到 2016 年时, 世界集成电路闪存线宽将减小至 15.9 nm; 而到 2024 年时, 最小线宽更是减小达到 6.3 nm, 接近理论极限^[2]. 届时, 以硅为基础的微电子技术由于物理极限的限制, 将很难继续遵循摩尔定律来发展^[1]. 首先, 随着微纳器件集成度的进一步提高, 器件线宽的进一步减小, 电互连所固有的局限性将促使芯片的发热量迅速增加, 引起串扰、噪声、功耗、时延等多方面的问题, 从而使器件无法正常工作; 其次, 是现有的加工设备已经接近工艺极限, 通过减小线宽的方法来提高芯片的工作频率和集成度面临非常大的工艺问题; 此外, 当线宽进入深纳米尺寸时, 如何避免量子效应导致相邻导线之间的量子隧穿, 也面临前所未有的挑战^[3~7].

可见,用电子作为信息载体的微电子技术,当器件的加工线宽发展到深纳米尺度时,将遇到其发展的理论与技术瓶颈.因此,亟需新的理论与技术解决上述诸多限制与问题,否则信息技术的发展将裹足不前,并严重影响人类社会和经济的进一步向前发展^[3~7].

1.1.2 集成光路的发展

在 21 世纪,人们将迈入一个高度信息化的时代.信息时代的特征是:信息量十分巨大,信息传递非常快捷,信息处理十分迅速.目前大部分的信息是由电子传导的.电子具有静止质量,且电子之间存在库仑作用,因此电子的运动及电信号易受电磁场干扰,从而限制了电子通信的容量和速率.与电子相比,光子作为信息载体具有巨大优势:光子没有静止质量,光子之间也几乎没有干扰,光的不同波长可用于多路同时通信,因而光信息传输可具有更大的带宽和更高的速率.另一方面,光信号处理速度很高,且不受电磁场干扰.这些优点使得光子技术在未来的信息化社会中必将扮演非常重要的角色.

受到了微电子集成电路技术的启迪和促进,光子学发展的一个重要目标就是要实现集成光路^[8].集成光路是利用光波导将光发射、光耦合、光传输、光调制、光逻辑、光处理以及光接收等器件连接在一起,集成到同一基底上,构成的具有一定独立功能的微型光子学系统.

图 1.1 为一套典型的集成光路系统结构示意图,它包含了光的产生、耦合、传输、调制、探测等几个部分.

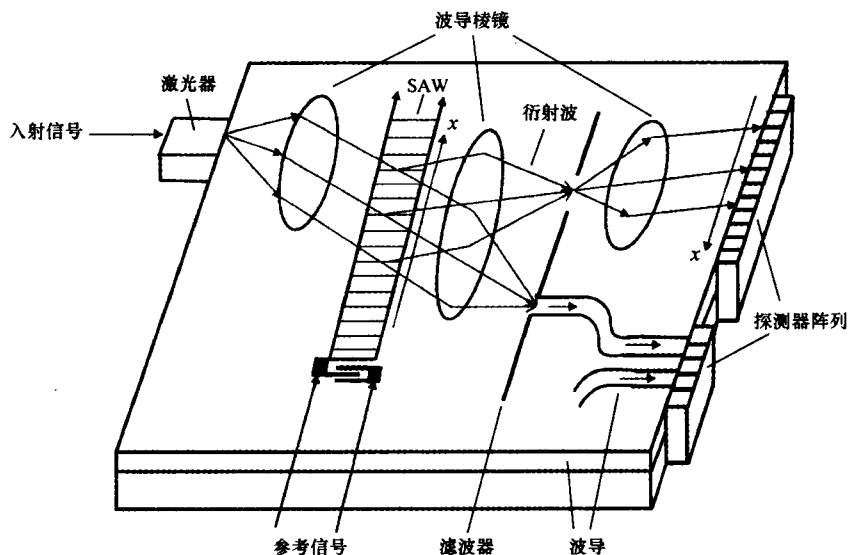


图 1.1 一套典型的集成光路系统结构示意图

目前,集成光路的发展已经初具规模,并在光通信及光信息处理方面显示出电子学无法比拟的优越性.与普通光学系统相比,集成光路具有很多优点:信号带宽大,容易实现密集波分复用,尺寸小,重量轻,功耗小,成批制备成本低,可靠性高等.得益于微电子制备技术和光电子学的发展,集成光路正以其独特的优势进入了迅速发展的阶段.表 1.1 列出了集成光路和集成电路的比较.

表 1.1 集成光路和集成电路的比较

	集成光路	集成电路
基本作用	光波导中的光传输及光与电子、晶格的相互作用	基底表面附近的电子传输与控制
基本元器件	光波导、半导体激光器、探测器等	晶体管、电阻、电容等
元器件尺寸(厚度方向)	波长量级、纳米量级	数十纳米至微米
元器件尺寸(长度方向)	微米至数毫米,关键部分甚至纳米量级	数十纳米至微米
器件之间的连接	光波导,难点在于需要精确的耦合对准	电气布线,优点在于直接导体连接
元器件可靠性	目前还存在问题,通常需要检测全部元件	几乎没问题,通常只进行抽检
元器件制作工艺	多样,目前还在研究开发中	成熟的工艺

但是,集成光路目前在实践中仍然面临许多尚未克服的技术和性能障碍,在理论上也有待新的突破.最主要的问题是集成光路中还没有统一的标准制备技术,导致制造成本很高.这主要是由于集成光路和微电子制备技术相比,选用的材料、各个元器件的制备工艺和工作原理等有很大不同,如集成光路选用的材料有 Si, LiNbO₃, InP 等,微电子制备技术的基体材料是 Si. 微电子中的基本单元是晶体管,而集成光路的基本单元包括激光器、探测器、调制器、滤波器等,各个器件的工作原理都不相同.当前,集成光学的研究热点主要集中在以下几个方面:

- ① 提高集成光路的可靠性和稳定性;
- ② 减小器件尺寸,提高集成度;
- ③ 制备工艺优化,减小光波导传输损耗;
- ④ 突破目前的“光-电-光”转换瓶颈;
- ⑤ 提高光通信用多波长光源的性能、成本、可靠性;
- ⑥ 研究新的耦合技术以便实现高性能的耦合,解决光纤或激光器与波导的耦合难题.

然而,由于光逻辑和光处理器件的发展相对缓慢,具有真正“计算”功能的集成光路还正处于早期探索阶段.

1.1.3 光电子集成

众所周知,光和物质间存在着诸如光电、电光、声光、磁光,热光等多种线性或非线性物理效应,可以用来实现各种功能丰富的微纳光电器件.当纯粹的电子或光子集成遇到困难时,将两者结合不失为一种折中的选择.特别是,在集成电路和集成光路都有了相当程度积累的今天,努力发展光电子集成就显得非常自然了.可以预见,未来的信息化时代将是光子载体与电子载体携手合作,互相补充,最终走向融合统一,实现光电集成回路的时代^[3~7].

图 1.2 为 20 世纪 90 年代由 R. A. Soref 建议的硅基光电子混合集成芯片^[9],包含了光的产生、放大、耦合、传输、调制、探测和高速电子电路等部分.其光信号通过光纤与波导直接耦合的方式与外界相连.所有的光电子器件均由 III-V 族半导体构成,并且与电子电路分别制作,混合集成.

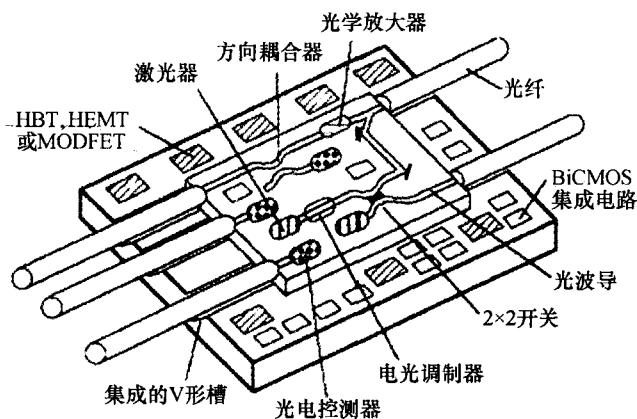


图 1.2 20 世纪 90 年代的硅基光电子混合集成系统示意图

图 1.3 是 Intel 公司给出的光互连与电互连(主要指铜线互连)在成本和带宽关系上的博弈图^[10].从图中我们可以看出,在当前以及今后一段时期内光互连技术与电互连技术将共同存在,但是当芯片的工作频率扩展到 40 GHz 以上时,光互连的优势将凸显,并且将逐渐取代电互连成为芯片互连技术的主体.

然而,应用于以电子为主要信息载体的集成芯片中的光互连技术是一定要与电子及电子技术相互作用的.光子技术与电子技术在硅基底上的融合导致了硅基光电子学的发展.