

半导体科学与技术丛书

硅光子学

余金中 主编



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

光子学是一门研究光子的产生和运动特性、光子同物质的相互作用及其应用的前沿学科,硅光子学专门研究硅以及硅基异质结材料(诸如 SiGe/Si、SOI等)等介质材料中光子的行为和规律,着重研究硅基光子器件的工作原理、结构与制造以及在光通信、光计算等领域中的实际应用。全书共 19 章,分别介绍硅基光子学基础、应用和发展趋势;硅基异质结构和量子结构的物理性质、制备方法;硅基光子器件,包括硅基发光器件、探测器、光波导器件;硅基光子晶体、硅基光电子集成、硅基光互连以及硅基太阳能电池。

本书可以作为高等院校高年级本科生和研究生的教材和参考书,也可作为半导体光子学、光电集成、光电子器件、信息网络系统、计算机光互连及相关技术领域的科研人员、工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

硅光子学/余金中主编. —北京:科学出版社,2011

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-030479-7

I. ①硅… II. ①余… III. ①硅-光子-研究 IV. ①O613.72 ②O572.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 038407 号

责任编辑:张 静 钱 俊/责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 3 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011 年 3 月第一次印刷 印张: 29 3/4

印数: 1—2 500 字数: 566 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动本世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005年3月16日

序

诞生于 20 世纪中叶的固体电子学作为信息产业的支柱,如今已深入千家万户,在国民经济、国防建设及办公和生活中无处不在地作出了不可替代的贡献。然而随着社会的进步、科技的发展和生活质量的提高,固体电子学和其他技术一样在需求满足上都显露出其一定的局限性。信息传输的容量、处理的速度及传递过程中的安全性、保密性等方面正逐渐面临新的挑战。革命导师恩格斯曾断言(大意):“社会的需求胜过十所大学的作用,是科学技术发展的最大动力。”邓小平同志曾经指出:“科学技术是第一生产力。”固体光子学的应运而生体现了对电子学功能运作的补充和拓展。固体光子学是研究光子作为传递信息的载体在介质中的产生与消失、关联与耦合、运动与操控、感知与探测,以及运作与运用的一门新的科学技术。基于半导体介质的光子学即半导体光子学。

毋庸置疑,硅在当今固体电子学中占据了不可替代的主角地位。化合物(GaAs、InP 等)半导体光子器件(如激光器、探测器等)则另据一隅,在光纤通信领域中得到成功的应用。然而把二者融合集成在一个芯片上,在材料与工艺上却存在难以逾越的“非兼容性”鸿沟。由此,时代的需求呼唤硅基光子学的诞生。然而硅是间接带隙、非极性半导体材料,发光效率很低,电光系数很小,这在很长一段时期内限制了有源光子器件的发展,使它登不上光子学的大雅之堂。

多孔硅高效发光的发现虽然时过近 20 年,其实际应用进展缓慢,但它却雄辩地说明:只要经过适宜的人工改造,硅仍然可以实现高效发光,包括增强电光效应。原子层生长和纳米技术的成熟,能带工程、声子工程和掺杂工程的综合应用,这些都为硅光子学的发展提供了坚实的物理和技术基础,加速了硅光子器件的发展步伐,并呈现出有望独树一帜的趋势,实现光子学与电子学在硅芯片上融合集成已时日不远,它无疑将促使当代信息技术的发展登上一个新的高峰,这就是硅光子学成为当今国内外半导体界关注热点的原因。无论是大学、科研院所,还是企业界都对硅光子学投入了相当的研发力量。

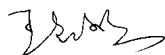
硅光子学的发展首先需要大批熟悉其科技内涵的科研人员与工程技术人员,一本兼容基础性和前沿性的硅光子学读物也是必不可少的。国外虽然出版过相关书籍,但大多以论文集形式介绍其前沿发展,缺乏基础性和系统性。余金中同志主编的《硅光子学》就是力图从基础内涵出发,以器件设计为核心,同时兼顾前沿应用的最新发展,系统全面地阐述硅基光子学的丰富内涵。

该书的撰写团队包括了在国内长期从事硅光子学研发与教学的科技人员,他们

在从事研究工作的多个方面都有自己的研发成果和实践体验。该书文字表述通顺，图表、数据翔实，无疑对关注与从事该领域研发的广大科技人员和在读的研究生是一本很有裨益的、可持续参阅的难得的读物。

本人诚挚推荐和深切期望，《硅光子学》的出版发行，必将有助于普及和提高在该领域工作的科技人员的素质，更快更好地推动我国硅光子学的发展。

谨此为序。



中国科学院院士

2010年7月28日

前 言

光同时具有波动性和粒子性. 随着科学的深入发展, 光更加明显地表现出量子特性, 对光的量子描述也越来越多, 光子学便应运而生. 从物理学的角度看, 光子学是研究光子的产生和运动特性、光子同物质的相互作用及其应用的一门前沿学科; 从工程技术的角度看, 光子学是一门研究光作为信息和能量的载体所赋予的特性、运动行为及其应用的工程技术.

信息光子学专门研究信息, 它是材料学、计算科学、通信学等许多学科相互交叉形成的一门新学科, 在广播、通信、计算机、化工、医疗等应用领域中, 以光为载体, 通过光的发射、传播、吸收、散射, 探测和研究物理信息、化学信息、生物信息、医学信息, 因而可以进行许多应用. 以固体材料为介质, 研究光子载体在固体介质中的产生、运动、控制、操作, 研究光子同固体物质的相互作用及其应用, 这就是固体光子学. 半导体光子学是固体光子学中最为重要的部分, 它专门研究半导体中光子的特性和运动规律. 硅光子学就更加具体了, 专门研究硅以及硅基异质结材料 (诸如 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 、SOI 等) 中光子的行为和规律, 特别是着重研究硅基光子器件的设计、制造和在光通信、光计算等领域中的实际应用. 因此, 硅光子学成为目前世界上十分热门的前沿学科.

半导体材料硅不仅是一种电子材料, 还是一种光子材料. 非常成熟的微电子加工工艺既为大规模集成电路作出了特殊贡献, 也为硅光子学提供了坚实的技术基础, 大大加速了硅光子学的形成和发展, 并且有进一步扩大和独树一帜的趋势, 因此硅光子学是一门非常新的前沿学科.

2004 年半导体大规模集成电路生产线的最小尺寸为 90nm, 目前已达 16nm. 对于光通信的 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波长来说, 它们在 Si、GaAs、InP 等材料中的波长 λ 在 350~400nm 范围内. 电子也具有波动性, 电子在半导体材料中的波长约为 10nm. 如果半导体材料的线度小于 10nm, 则会出现量子效应, 几何尺寸小于 10nm 的区域便成为量子区域. 比较上述“大规模集成电路生产线的最小尺寸”、“光波在半导体材料中的波长”和“电子在半导体材料中的波长”这三个“特征尺寸”, 可以看出: 现在半导体工艺的加工能力已经进入了光波波长的范围了, 人们可以很容易地设计加工出小于通信用光波波长 (在半导体材料中为 350~400nm) 的各种结构. 硅基光子器件的设计、制造和应用就成了理所当然的事情了. 集成电路的集成度每 18 个月提高一倍, 这便是著名的“摩尔定律”. 但是, 大规模集成电路生产线的最小尺寸最终会有一个物理极限, 不可能再小了. 相应地, 电子器件的集成度难以进一步提

高了,同时由于电子瓶颈的存在,硅电子器件高频特性也难以进一步提高.因此人们把希望寄托在光子器件上.

我们正处在一个将电子领域和光子领域二者合为一体的黄金时代.作为电子材料,硅基微电子学已经显示出巨大的威力;现在,作为光子材料,硅基光子学将再次发挥威力,其潜在的高性能器件和广泛应用将在硅中得到延伸.

相对化合物半导体光子学而言,硅光子学的研究起步较晚,1990年之后才逐渐兴起,但是最近五年突起奋进,在光子学理论、材料生长、器件设计制备和在光通信、光计算中的应用等方面,已经取得重大进展,并且大有如火如荼的发展之势.

近年来硅基光子器件的研究进展主要有:由于硅基应变材料系能带工程的研究与发展,现已研制出频率高达360GHz的异质结双极晶体管(HBT)、发射波长为1.2 μm 的Si量子点激光器和可见光多孔硅发光二极管、发射波长为1.55 μm 的Si基混合型激光器、探测灵敏度为0.9A/W、频率为40GHz的Si/Ge探测器和谐振腔增强型的Si_{1-x}Ge_xPIN光电二极管、调制频率高达40GHz的SOI光学调制器、通道数高达540的SiO₂/Si阵列式波导光栅(AWG)、 $N \times N$ SOI光开关阵列等.硅基异质结构材料和器件的发展趋势为:异质材料多型化、材料尺寸纳米化、物理性质量子化、功能特性完善化、光电集成复杂化、实际应用多样化.

硅基光电子集成具有十分诱人的前景.由于硅是间接带隙材料,发光效率非常低,在硅基发光器件的研究上有着很难逾越的困难.然而,2005年和2006年硅Raman激光器的CW工作和混合型硅基InP激光器的问世让我们看到了解决问题的希望.可以认为,科学研究是能够全面实现硅和硅基材料中光的产生、传输、调控、互连、探测等一系列问题的最好方法,因而人们不再怀疑硅作为光子材料的功能和作用了.众所周知,硅是最好的大规模集成电路材料.现在,它还会是最合适的光电子集成材料.将电子器件(Si_{1-x}Ge_x量子器件、HBT、CMOS、射频器件、隧道二极管等)、光子器件(激光器、探测器、光开关、光调制器等)、光波导回路集成在同一硅片或SOI片上,构成具有很多特殊光电性能的光电子集成电路,有可能实现光互连、光计算和人工智能.

硅光子学的研究、开发和应用正在快速发展,已经成为国内科技界的热门研究课题.无论是科学研究还是研究生教学都迫切需要一本该学科的专著,我们就是根据这一需要撰写这本《硅光子学》的.

本书共19章,可分为四大部分:第一部分引言,介绍硅基光子学基础,并概略地评述这一学科的应用和发展趋势.第二部分介绍作为光子材料的Si、SOI和硅基异质结构和量子结构的物理性质,包括Si_{1-x}Ge_x/Si等的外延和SOI的制备方法.第三部分为硅基光子器件,这是本书的核心,重点介绍硅基发光器件(LED、Raman激光器、量子级联激光器)、探测器(RCE-PD、键合在硅衬底上的III-V族化合物等)、光波导器件(光调制器、滤波器、光开关阵列、AWG等).第四部分包括硅基

光子晶体、硅基光电子集成、硅基光互连, 以及硅基太阳能电池。

硅光子学和光电子器件的发展得益于材料科学、激光物理、微电子学、计算机科学、微细加工技术、现代化学等学科和技术的成就, 它的进展又极大地促进了相邻学科的交叉和发展。硅光子学的材料、器件和应用在 21 世纪将会大显身手, 为信息化时代的发展作出历史性的重大贡献。光子独特功能的运用能够突破电子作为载体的局限性, 必将会带来历史性的重大突破。可以肯定“光子”将与“电子”携手合作, 和谐共建绚丽灿烂的信息时代。

本书将为读者提供完整的硅基光子学知识, 包括物理特性、工作原理、器件结构、应用领域和发展前景, 为从事相关研究、教学与开发产品提供详细和完整的资料。主要为高等院校的物理学科高年级本科生、研究生、教师、研究所的研究人员和信息产业的工程技术人员提供全面的硅光子学的知识, 也可供从事科技管理的高级人员参考。本书包括光子学基础、硅的基本物理特性、硅基异质结构和量子结构的外延生长、硅基发光和探测、硅基光波导、硅基光集成、硅光子晶体等近十年的最新研究成果和发展趋势, 以我们的研究成果和已经发表的科学论文为主要内容, 着重描述硅基光子学的物理思想, 突出我们的研究成果, 因此是一本硅基光子学的专著。

参加本书写作的有中国科学院半导体研究所的余金中、廖显伯、胡雄伟、陈少武、安俊明、李运涛、李智勇、肖希、胡应涛、朱宇、刘艳, 中国科学院院地合作局的余和军, 中国科学院长春光机与物理研究所的曾玉刚, 电子科技大学的张建国, 厦门大学的李成, 厦门三安光电公司的林桂江, 华中科技大学的黄庆忠, 新加坡微电子研究院的屠晓光, 新加坡国立大学的韩根全和新加坡国立南洋理工大学的刘艳, 日本东京都市大学的徐学俊等。

全书由多位作者写作不同章节, 最后由余金中统编, 许多章节经过三到五遍的修改甚至重新写作, 力求文字风格一致。每一章相对独立, 在统编时力求互相关联, 因此是一本系统的论著。

本书是从事硅光子学研究的科技人员的新著, 他们在该领域中从事研究多年, 最长的十六年, 最短的也有四、五年, 是该学科的直接参与者, 基础知识深厚, 工作经验丰富, 因此本书具有相当深厚的学术性。作者都是第一线的研究人员, 了解当前的研究动态和发展方向, 因此本书具有相当先进的前沿性。本书列入了大量的图表, 尽量准确地提供硅基异质结材料和器件的各种物理特性、电学和光学数据, 因此本书具有翔实的资料性。

硅基光子学的研究方兴未艾, 目前国内外许多大学和研究所都在开展相关研究, 本书的出版将对这一领域的研究有促进的作用。同时, 该领域发展很快, 因此本书不可能包含不断出现的新内容, 这只能留待日后新的著作进一步深入和扩展了。

本书的写作和出版得到许多专家的鼓励和帮助, 王启明院士是我国硅基光子学

的先驱,他对本书的写作提出过许多指导性的意见,夏建白院士给予了大力支持和鼓励,半导体研究所的俞育德研究员、北京邮电大学的任晓敏教授、浙江大学的王明华教授和杨德仁教授、清华大学的黄翊东教授、华中科技大学的张新亮教授和夏金松教授、科学出版社的田士勇等为本书的出版作了许多贡献,半导体研究所的王杏华为文稿作了许多默默无闻的贡献,博士生徐海华、周亮、熊康、韩伟静等参与了校对、制图等方面的细致工作,特别是科学出版社的张静和钱俊为本书进行了细致、繁琐、大量的编审工作.本书的出版获得中国科学院科学出版基金的资助.对他们的指导、鼓励、支持、帮助、参与和资助,我们一并表示衷心的感谢.

虽然本书的书稿历经四年多的编写和修改,但是依然会有遗漏、不足甚至不妥之处,恳请光电子专家和广大读者赐教和指正.

余金中

中国科学院半导体研究所

2010年7月23日

作者名录

- | | | |
|-------------------|-----|-------------------|
| 第1章 引言 | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第2章 硅锗的材料性质 | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第3章 硅基光子材料的外延生长 | 韩根全 | 新加坡国立大学电子及计算机工程系 |
| | 曾玉刚 | 中国科学院长春光机与物理研究所 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第4章 SOI 材料的性质及应用 | 陈少武 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第5章 硅基发光材料与器件 | 张建国 | 电子科技大学微电子与固体电子学院 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第6章 硅基光放大器和激光器 | 张建国 | 电子科技大学微电子与固体电子学院 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第7章 硅基量子级联和太赫兹激光器 | 林桂江 | 厦门三安光电公司 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第8章 硅基光电探测器 | 李成 | 厦门大学物理系 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第9章 硅基光波导 | 屠晓光 | 新加坡微电子研究院 |
| | 陈少武 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第10章 硅基微纳光波导调制器 | 徐学俊 | 日本东京都市大学硅纳米科学研究中心 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第11章 硅基微环谐振器 | 黄庆忠 | 华中科技大学 武汉光电子国家实验室 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第12章 硅基光波导开关阵列 | 李运涛 | 中国科学院半导体研究所 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第13章 硅基阵列波导光栅 | 安俊明 | 中国科学院半导体研究所 |
| | 胡雄伟 | 中国科学院半导体研究所 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第14章 硅基光耦合器 | 朱宇 | 中国科学院半导体研究所 |
| | 刘艳 | 新加坡南洋理工大学物理与数学学院 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第15章 硅基光子晶体 | 余和军 | 中国科学院院地合作局 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第16章 硅基光互连 | 肖希 | 中国科学院半导体研究所 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第17章 硅基慢光器件 | 胡应涛 | 中国科学院半导体研究所 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第18章 硅基光子集成 | 李智勇 | 中国科学院半导体研究所 |
| | 余金中 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第19章 硅基太阳能电池 | 廖显伯 | 中国科学院半导体研究所 |

目 录

序

前言

第 1 章 引言	1
1.1 信息时代的前沿学科 —— 光子学	1
1.2 硅电子学的发展和硅光子学的诞生	4
1.3 硅光子学 —— 高科技的焦点	11
1.4 本书的内容	14
参考文献	16
第 2 章 硅锗的材料性质	18
2.1 引言	18
2.2 Si、Ge 的晶体性质	19
2.2.1 晶体结构	19
2.2.2 晶格常数	20
2.2.3 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的晶格失配和临界厚度	22
2.3 能带结构	23
2.3.1 Si 的能带结构	23
2.3.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的能带结构	25
2.3.3 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 量子结构和超晶格	29
2.4 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的电学性质	30
2.4.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的载流子迁移率	30
2.4.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Ge}$ 中的二维载流子	32
2.5 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的光学性质	34
2.5.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的折射率	34
2.5.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的吸收系数	35
2.5.3 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的光荧光谱	36
2.5.4 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的 Raman 光谱	36
2.6 弛豫 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的物理参数	39
2.7 结束语	40
参考文献	41
第 3 章 硅基光子材料的外延生长	44
3.1 引言	44

3.2	分子束外延技术生长 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 材料	45
3.2.1	分子束外延技术简介	45
3.2.2	MBE 外延生长 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 材料	46
3.3	UHV/CVD 系统	55
3.4	UHV/CVD 材料生长动力学	57
3.4.1	Si/Si 同质结外延	57
3.4.2	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结外延	58
3.5	UHV/CVD 外延生长 Ge、GeSi 和 SiGeSn	60
3.5.1	UHV/CVD 生长 Ge	60
3.5.2	UHV/CVD 低温外延生长 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$	61
3.5.3	UHV/CVD 外延生长 SiGeSn	65
3.6	结束语	68
	参考文献	69
第 4 章	SOI 材料的性质及应用	72
4.1	引言	72
4.2	SOI 的制备方法	74
4.2.1	键合 - 背面腐蚀技术	74
4.2.2	注氧隔离技术	76
4.2.3	注氢智能剥离技术	78
4.2.4	注氧键合技术	80
4.2.5	SOI 制备方法的比较	80
4.3	SOI 材料的表征技术	81
4.3.1	SOI 材料的晶体质量	82
4.3.2	SOI 材料的载流子寿命和表面复合	84
4.4	SOI 的应用与发展趋势	85
4.4.1	SOI CMOS 电路	86
4.4.2	SOI MOSFET 技术	87
4.4.3	SOI 在微电子领域的应用及市场概况	88
4.4.4	SOI 技术的发展趋势	90
4.4.5	SOI 光子集成技术	92
	参考文献	94
第 5 章	硅基发光材料与器件	96
5.1	硅基材料发光机理	97
5.1.1	半导体材料发光机理	97
5.1.2	硅基掺杂分立发光中心发光机理	97

5.2 硅基发光	98
5.2.1 硅纳米结构发光	98
5.2.2 体硅发光材料与器件	101
5.2.3 稀土离子掺杂硅基发光材料与器件	104
5.2.4 硅基等电子发光材料与器件	106
5.2.5 Ge/Si 量子结构及布里渊区折叠	107
5.3 结束语	108
参考文献	108
第 6 章 硅基光放大器和激光器	112
6.1 硅基纳米结构的光增益与激光器	112
6.1.1 硅基纳米结构光增益与激射	112
6.1.2 局域化硅纳米晶体受限量子结构电注入受激发射	113
6.2 硅基掺铟光放大器和激光器	115
6.3 硅基拉曼激光器	117
6.4 硅基等电子缺陷发光光泵激射器件	118
6.5 硅基异质结构混合型激光器	119
6.5.1 AlGaInAs/Si 混合型激光器	119
6.5.2 硅基 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结构激射器件	120
6.5.3 硅锗 MOS 结构电注入激射器件	122
6.6 硅基激光器发展前景	123
参考文献	125
第 7 章 硅基量子级联和太赫兹激光器	128
7.1 $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 量子级联激光器的能带计算	129
7.1.1 $k \cdot p$ 方法计算 $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 量子阱的空穴能级	129
7.1.2 中远红外 (太赫兹) $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 量子级联激光器的能带设计	133
7.2 $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 量子级联激光器的增益和损耗	137
7.2.1 $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 量子级联激光器的增益系数	137
7.2.2 $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 量子级联激光器的波导和损耗	140
7.3 $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 量子级联结构的外延生长和表征	145
7.4 $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 量子级联激光器的光电特性	148
7.5 结束语	151
参考文献	151
第 8 章 硅基光电探测器	153
8.1 硅探测器工作原理	153
8.1.1 硅 PIN 光电二极管	153

8.1.2	硅 MSM 光电二极管	154
8.1.3	光电探测器的性能参数	154
8.2	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 垂直结构 PIN 光电二极管	155
8.3	RCE $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 多量子阱光电二极管	157
8.3.1	共振腔探测器自洽解析理论	157
8.3.2	硅基共振腔的制备	162
8.3.3	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ MQW RCE 光电探测器的制备	163
8.3.4	RCE 探测器的特性	163
8.4	Si 基 Ge 光电二极管	166
8.4.1	硅基 Ge 材料外延技术	166
8.4.2	Si 基 Ge 探测器	168
8.5	硅基 III-V 族化合物光电二极管	171
8.6	结束语	173
	参考文献	174
第 9 章	硅基光波导	177
9.1	光波导中的模式	177
9.2	脊形波导单模条件	181
9.2.1	SOI 矩形截面脊形波导的单模条件	182
9.2.2	SOI 梯形截面脊形波导的单模条件	184
9.3	单模条件的计算方法	185
9.3.1	束传播法 (BPM)	185
9.3.2	时域有限差分法 (FDTD)	188
9.3.3	薄膜匹配法 (FMM)	190
9.4	光波导的损耗	190
9.4.1	截断法	190
9.4.2	F-P 腔光谱分析法	191
9.4.3	傅里叶谱分析方法	192
9.5	结束语	194
	参考文献	195
第 10 章	硅基微纳光波导调制器	196
10.1	硅基微纳光波导的模式特性	196
10.1.1	硅基一维限制平板波导	196
10.1.2	条形波导和脊形波导	198
10.2	硅基微纳光波导的损耗	201
10.3	硅基微纳光波导的偏振相关性	205

10.4 硅基微纳光波导的调制	206
10.4.1 光波的调制	206
10.4.2 硅的光调制机理	208
10.5 硅基微纳光波导调制器的结构	214
10.5.1 硅基微纳光波导调制器的电学结构	214
10.5.2 硅基微纳光波导调制器的光学结构	217
10.6 硅基微纳光波导调制器进展	221
10.7 结束语	223
参考文献	224
第 11 章 硅基微环谐振器	227
11.1 微环谐振器的工作原理	227
11.1.1 单个微环	227
11.1.2 级联微环	229
11.2 微环谐振器的光学性质	233
11.2.1 振幅特性	234
11.2.2 相位特性	238
11.3 微环谐振器的设计	241
11.3.1 波导的设计	241
11.3.2 耦合器的设计	243
11.3.3 内损耗的估算	244
11.4 微环谐振器的制备与测试	246
11.4.1 工艺流程	246
11.4.2 电子束光刻	247
11.4.3 干法刻蚀工艺	248
11.4.4 氧化硅生长技术	249
11.4.5 微环谐振器的测试	250
11.5 SOI 微环谐振器的应用	251
11.5.1 光滤波器	252
11.5.2 非线性光学器件	256
11.5.3 光延时线与光缓存	257
11.6 发展趋势	258
参考文献	259
第 12 章 硅基光波导开关阵列	262
12.1 硅基光波导开关的工作原理	262
12.2 硅基光波导开关阵列的拓扑结构	264

12.2.1	完全无阻塞型光波导开关阵列	264
12.2.2	重排无阻塞型光波导开关阵列	267
12.2.3	阻塞型光开关阵列	268
12.3	器件参数与热光效应	269
12.4	器件的模拟分析与优化	272
12.5	硅基光开关阵列的性能	276
12.6	结束语	277
	参考文献	278
第 13 章	硅基阵列波导光栅	282
13.1	阵列波导光栅的工作原理	283
13.2	AWG 的器件参数和设计	286
13.3	AWG 的计算机模拟	290
13.4	AWG 性能的优化	294
13.5	AWG 的制备	306
13.6	AWG 的特性和应用	308
	参考文献	312
第 14 章	硅基光耦合器	316
14.1	引言	316
14.2	模斑变换器	317
14.2.1	正向楔形模斑变换器	318
14.2.2	反向楔形模斑变换器	320
14.2.3	狭缝式模斑变换器	321
14.3	棱镜耦合器	322
14.3.1	反向棱镜耦合器	322
14.3.2	折射率渐变半透镜耦合器	323
14.4	光栅耦合器	323
14.4.1	垂直型光栅耦合器	324
14.4.2	水平双光栅耦合器	330
14.5	结束语	331
	参考文献	332
第 15 章	硅基光子晶体	335
15.1	引言	335
15.2	光子晶体的理论	336
15.2.1	基于 Bloch 理论的平面波展开法	336
15.2.2	超元胞方法	339

15.2.3	有限时域差分法	340
15.2.4	计算举例: 负折射效应	342
15.3	硅基光子晶体的制备	344
15.3.1	三维硅基光子晶体的制备	344
15.3.2	二维硅基光子晶体的制备	345
15.3.3	二维硅基光子晶体器件设计与应用	353
15.4	结束语	359
	参考文献	359
第 16 章	硅基光互连	361
16.1	引言	361
16.2	微电芯片中的互连技术	362
16.2.1	电互连技术的特点	362
16.2.2	光互连的优势	364
16.2.3	实现光互连的方式	365
16.3	硅基片上光互连	366
16.3.1	硅作为光子学材料的优势	366
16.3.2	硅基光互连系统中的关键器件	367
16.4	片上光互连技术	370
16.4.1	片上光学时钟网络	370
16.4.2	片上光学数据总线	372
16.4.3	片上光学网络	375
16.5	结束语	380
	参考文献	381
第 17 章	硅基慢光器件	384
17.1	引言	384
17.2	慢光基础	385
17.2.1	基本概念	385
17.2.2	基于材料色散的慢光	386
17.2.3	基于波导色散的慢光	387
17.2.4	延迟、带宽与损耗	389
17.3	硅基波导慢光器件	390
17.3.1	硅基微环谐振腔中的慢光	391
17.3.2	硅基光子晶体慢光	397
17.4	慢光的应用	399
17.5	结束语	399