

半导体导波光学器件
理论及技术

**Semiconductor Guided-Wave
Optical Devices
Theory and Technology**

赵策洲 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

半导体导波光学器件理论及技术/赵策洲著.
—北京:国防工业出版社,1998.6
ISBN 7-118-01857-0

I. 半… II. 赵… III. 波导光学-半导体器件
-概论 IV. TN25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 28973 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 12½ 316 千字
1998 年 6 月第 1 版 1998 年 6 月北京第 1 次印刷
印数:1—1000 册 定价:23.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎
秘书长	崔士义			
委员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨呈豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

前 言

目前,光集成(OIC)和光电子集成(OEIC)的研究工作主要集中在铌酸锂(LiNbO_3)和Ⅲ-V(或Ⅱ-Ⅳ)族化合物半导体上,至于微电子工业中举足轻重的硅(Si)材料,受到的注意却是微乎其微的。早在70年代,就曾排除在硅上实现单片集成光路的可能性,当时的理由是硅不具备电光效应(实际上是指普科尔(Pockels)效应)和受激辐射的作用。

80年代中后期的研究表明,硅的这两个固有缺陷不是完全不可克服的。硅虽然没有普科尔效应(即线性电光效应),但有其他一些效应可资利用,如弗朗兹-凯尔迪什(Franz-Keldysh)效应、克尔(Kerr)效应和等离子体色散效应(Plasma Dispersion Effect),其中等离子体色散效应相当显著,足以实现电光调制。尽管对硅的受激辐射作用(即制作硅激光器)的研究是否有进展目前尚不清楚,但是硅的发光现象已被发现。多孔硅发光是目前半导体技术研究的热点之一。在硅单晶中掺杂,利用等电子陷阱发射波长为 $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$ 的红外光已有不少实验报道。并且,用硅材料来制作 $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$ 波长的全硅雪崩二极管探测器和硅化铂肖特基二极管探测器,也已成为可能。由此, $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$ 波长的硅集成光路的可行性已经得到初步论证。尽管这其中还有不少问题,如电光调制器的电流偏大,制作硅的激光器是否可能等,但无论如何,把光电子器件集成到硅单晶衬底上,是混合集成极有吸引力的选择。这种混合集成,不但可以利用分子束外延(MBE)、金属有机物化学气相淀积(MOCVD)等技术生长锗硅/硅(GeSi/Si)光电探测器,而且利用这些技术还可以在硅衬底上制作铟镓砷磷(InGaAsP)红外激光器、铝镓砷(AlGaAs)双异质结激光二极管,以及砷化镓(GaAs)

电光调制器等。因此,对硅的光集成理论和工艺进行研究与总结,就非常必要了。

同时,硅材料还有其本身独特的优点。首先,硅作为半导体中应用最为广泛的一种材料,其成本最低,加工工艺最为成熟;其次,在 $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$ 波长范围内,硅是透明的,而这正是石英光纤的长波长低损耗窗口。众所周知,光电子集成和光集成是在光纤通信和计算机的高速发展下提出来的。在电子计算机中列入光互连,被称为混合光/电子计算机;如果用集成光路取代集成电路,就是光计算机。利用光的高并行性($>10^6$)及快响应($<10^{-9}\text{s}$),未来全光计算机的速度可以超过 10^{15}bit/s 的运算。这将是研究中的巨型计算机 CRAY-3 运算速度的 1 万(10^4)倍。由于目前先进电子计算机中的 CPU 几乎无一例外都是由硅的超大规模集成(VLSI)电路构成的,因此,无论是用集成光路还是用集成光电子回路来取代 CPU 中的硅的 VLSI,都必须从硅入手,因为目前只有硅才能超大规模集成。因此,从光纤通信和计算机这个角度来看,研究硅的光集成和光电子集成是避免不了的。

另外,由于微电子技术的广泛应用,刺激了其自身的加速发展,使其更新换代的周期越来越短,集成度越来越高,加工线宽已进入深亚微米量级,日益接近于硅片集成电路的物理极限,并且使芯片内部及芯片之间电互连的紧凑性也必须面对诸多的限制因素,例如:(1)芯片之间存在时钟歪曲现象;随着铝引线宽度的减小,电迁移趋近临界值;由于高频和长程互连,传递信号的大小及形状将改变,以至于无法传输数字信号。(2)电子线路要实现吉赫兹(GHz)数量级的带宽传输比较困难(有 10^{10}Hz 运算上限)。假如用光波导连接代替铝引线连接,用光子代替电子,则不但能克服这些限制因素,而且光学回路的运算速度也将比电子电路的要快 10^4 倍。因此,从集成电路自身的角度而言,研究硅的导光机制和电光调制等效应也就迫在眉睫了。

综上所述,由于以上原因,刺激了硅(含 SOI)光集成有源和无源器件的研究。这些研究虽然目前只是实验室的工作,但硅或以硅

为衬底的混合集成光路的商品化,只是一个时间问题了。

绝缘体上的硅(Silicon On Insulator 简称 SOI)材料所形成的微电子器件比体硅材料所形成的微电子器件具有诸多的优点,如 SOI 器件克服了体硅器件固有的闩锁效应、低抗辐射能力、无法形成三维器件和大规模集成能力有限等。作为硅材料的 SOI 新型材料,不但在工艺上与体硅工艺相兼容,而且 SOI MOSFET 具有极好的等比例缩小性质,使得 SOI 技术在深亚微米 VLSI 中的应用具有极大的吸引力。无闩锁效应、源漏寄生电容小、易形成浅结、无金属穿透结效应、良好的跨导和亚阈值斜率、良好的抗辐射能力等只是 SOI 技术优于体硅技术的几个优点。SOI 器件和电路还有其他许多优于体硅器件的性质,在导波光学器件和集成光路中,SOI 材料不仅有良好的导波性能,而且还可利用 SOI 集成电路和器件中的诸多优点为 SOI 导波光学服务。

本书是根据国内外有关文献及作者所在的西安交通大学刘恩科教授课题组近 5 年来的科研成果而写成的,大部分内容反映了硅导波光学和集成光学 90 年代以来的新进展,它凝聚了作者和刘恩科教授、李国正教授、刘育梁博士后、刘志敏博士、高勇博士、刘西钉博士、郑玉祥博士、李娜博士,以及课题组的其他同志的心血和汗水。

全书共分八章。第一章分析和阐述了介质波导耦合模理论及 SOI 耦合器制造技术,包括耦合模方程、耦合系数的几种算法、半导体条形波导的制备技术和 SOI 光栅耦合器等内容。第二章分析和阐述了半导体分支波导及劈形波导的原理和技术,包括劈形波导、劈形过渡、波导连接器、对 Y 结分支角的讨论、脊形分支波导的束传播法分析和非对称 X 结分支波导传输特性等内容。第三章介绍了半导体无源波导器件,包括无间距定向耦合器、横向耦合器、光纤波导耦合器、光纤定位 V 型槽、棱镜波导耦合器、光栅耦合器、光波导透镜、硅微透镜阵列、光波导反射镜和光波导棱镜等内容。第四章介绍了 SOI 中硅膜基本性质及其电光效应,包括 PIN 结基本性质、PN 结开关特性、用于脊形波导的 PN 结二维解析模

型与数值模型、硅中的等离子体色散效应和克尔效应等内容。第五章分析和介绍了硅波导中的调制效应和各种硅单波导调制器原理和技术,包括光波调制的基本概念、半导体条形光波导中的调制效应、 P^+N 结单波导调制器、PIN 结单波导调制器、GeSi/Si 异质结单波导调制器、双注入结型场效应管单波导调制器、MOS 结构单波导调制器和模位移硅单波导调制器等内容。第六章分析和讨论了半导体非干涉型光波导调制开关原理和技术,包括对称与非对称全内反射开关、全内反射开关中的光学隧穿效应和相位变化关系、X 结开关和 Y 结开关等内容。第七章分析和讨论了半导体干涉型光波导调制开关原理和技术,包括定向耦合开关、M-Z 电光调制开关、M-Z 热光调制开关和 M-Z 调制开关的多种形式等内容。第八章介绍了半导体导波光学器件在光纤通信、光信息处理、光计算机以及光传感器等方面的应用,包括集成光电开关网络、集成光电子数/模及模/数转换器、微型多道成像光谱分析系统、集成光路射频频谱分析器、集成光路光纤陀螺、导波光学传感器、光计算、光神经网络和光纤通信复用系统等内容。全书由赵策洲执笔,刘恩科审校。

作者希望本书能够满足从事半导体器件及从事光电子器件研究和研制的工作人员,以及从事其他相关领域的科研人员和工程技术人员的需要,同时,也可作为理工科大学有关专业的研究生和高年级本科生的教学参考书。为此,在内容安排上既包含了一般的定性讲解,也包括深入的理论分析。由于导波光学本身的复杂性,较严格的数学分析是必不可少的,但是我们在理论推导过程中,在明确物理概念的前提下,力求做到简明扼要、深入浅出。限于篇幅,本书重点讨论硅、并以 SOI 为主的半导体导波光学器件,并简单讨论化合物半导体导波光学器件。

承蒙西安电子科技大学的周南生教授,西安理工大学的陈治明教授,中科院半导体所的王守觉院士,中科院西安光机所的侯洵院士在百忙之中对本书全稿进行了审阅和指正,在此谨向他们表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，加之半导体导波光学器件领域本身正处于研究和发展之中，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者和专家批评指正。

编著者

于西安电子科技大学

目 录

第一章 介质波导耦合模理论及半导体耦合器	1
1.1 引言	1
1.2 介质波导的弱耦合理论和耦合模方程	1
1.2.1 耦合模方程	1
1.2.2 两同向波间的耦合	4
1.2.3 耦合系数的计算	8
1.2.4 两反向波间的耦合	34
1.3 半导体耦合器	37
1.3.1 半导体条形波导制备技术	37
1.3.2 SOI 定向耦合器	41
1.3.3 SOI 光栅耦合器	42
参考文献	43
第二章 半导体分支波导和劈形波导	46
2.1 引言	46
2.2 劈形波导和波导连接器	46
2.2.1 劈形波导	47
2.2.2 波导连接器	48
2.2.3 Y 结分支波导中的劈形过渡	50
2.3 Y 结平面分支波导	56
2.3.1 本地模法	56
2.3.2 台阶近似法	58
2.3.3 Y 结分支角的考虑	59
2.3.4 平面 Y 结分支波导的传播常数最接近准则	63
2.3.5 低损耗大角度平面 Y 结分支波导	65

2.4 脊形分支波导的传输特性	66
2.4.1 基本理论方法 I——傍轴近似 BPM	67
2.4.2 基本理论方法 I——正向广角 BPM	72
2.4.3 BPM 数值计算的可靠性	75
2.4.4 硅和 SOI 分支波导的传输特性	77
2.5 硅脊形分支波导的研制与应用	82
2.6 非对称 X 形分支波导	83
参考文献	84
第三章 半导体无源导波器件	87
3.1 引言	87
3.2 无间距定向耦合器	87
3.3 横向耦合器	90
3.3.1 直接聚焦耦合器	90
3.3.2 端接耦合器	90
3.3.3 光纤波导耦合器	98
3.4 光纤与平面波导的定向耦合	109
3.5 棱镜波导耦合器和光栅耦合器	110
3.6 波导偏振器	113
3.7 光波导透镜、反射镜和棱镜	114
3.7.1 波导透镜	115
3.7.2 波导反射镜	122
3.7.3 波导棱镜	123
3.8 其他导波无源器件	123
附录 3.A 平面波导偏振器理论推导	124
3.A.1 理论分析	125
3.A.2 算例与讨论	127
参考文献	129
第四章 硅膜基本性质及其电光效应	133
4.1 引言	133

4.2 硅的 PN 结性质	133
4.2.1 PIN 结基本性质	133
4.2.2 PN 结的开关特性	134
4.3 用于脊形结构的 PN 结二维模型	138
4.3.1 二维近似解析模型	138
4.3.2 浅 PN 结二维精确解析模型	144
4.3.3 二维 PN 结的有限元法分析	152
4.4 硅的电光效应	155
4.4.1 硅的直接电光效应	155
4.4.2 硅的间接电光效应	157
参考文献	161
第五章 硅单波导调制器	163
5.1 引言	163
5.2 光波调制的基本概念和参数	163
5.2.1 一般概念	164
5.2.2 主要调制参数	166
5.3 半导体光波导中的调制效应	167
5.3.1 半导体脊形波导中的调制效应	168
5.3.2 半导体条形波导中的调制效应	170
5.4 各种硅单波导调制器	171
5.4.1 P ⁺ N 结大注入单波导调制器	171
5.4.2 PIN 二极管单波导调制器	178
5.4.3 GeSi/Si 异质结单波导调制器	181
5.4.4 双注入场效应晶体管单波导调制器	183
5.4.5 MOS 结构单波导调制器	185
5.4.6 N ⁺ NPP ⁺ 二极管单波导调制器	189
附录 5.A 式(5-16)的推导	193
附录 5.B 式(5-20)的推导	197
附录 5.C 体硅 DIFET 调制器设计	199
5.C.1 双注入效应	200
5.C.2 体硅结栅控制双注入波导电光调制器的设计	202

5.C.3 结论	205
参考文献	206
第六章 半导体非干涉型光波导电光调制开关	209
6.1 引言	209
6.2 全内反射型硅波导电光调制开关	210
6.2.1 概述	210
6.2.2 非对称全内反射型开关	211
6.2.3 对称全内反射型开关	226
6.3 X结和Y结调制开关	236
参考文献	239
第七章 半导体干涉型光波导电光调制开关	242
7.1 引言	242
7.2 定向耦合调制开关	242
7.2.1 定向耦合开关	242
7.2.2 无间距定向耦合开关	250
7.3 Mach-Zehnder 干涉型调制开关	260
7.3.1 硅 M-Z 干涉型电光调制器	260
7.3.2 硅 M-Z 干涉型热光调制器	271
7.3.3 M-Z 干涉型调制器的多种形式	278
参考文献	282
第八章 导波光學器件的应用及其发展	285
8.1 引言	285
8.2 半导体集成光波导开关网络	289
8.2.1 开关网络的特点与构成	289
8.2.2 完全无阻塞光开关阵列与重排无阻塞光开关阵列	292
8.2.3 用于京比特级网络的光电开关	299
8.3 集成光电子运算器	300
8.3.1 光子逻辑门单元探索	301

8.3.2 集成光电子逻辑线路	312
8.4 集成光电子数/模、模/数转换器	318
8.4.1 A/D 转换器	318
8.4.2 D/A 转换器	323
8.5 导波光学器件在集成光路谱分析仪和光纤陀螺 中的应用	324
8.5.1 在微型多道成像光谱分析系统集成化中的应用	324
8.5.2 集成光路频谱分析器	328
8.5.3 导波光学器件在集成光路干涉仪光纤陀螺中的应用	330
8.6 光波导传感器	340
8.6.1 介质波导传感器的特点和基本原理	340
8.6.2 硅光波导压力传感器	343
8.6.3 硅光波导干涉仪压力传感器	347
8.7 导波光学器件在未来光计算机和光通信中的应用	354
8.7.1 光互连与光计算	354
8.7.2 光通信容量的扩展	359
8.7.3 展望	367
参考文献	372

Contents

Chapter 1	Coupled Mode Theory of Dielectric Wave-	
	guides and Semiconductor Couplers	1
1.1	Introduction	1
1.2	Weak Coupled Mode Theory of Dielectric Wave-	
	guides and Coupled Mode Equation	1
1.2.1	Coupled Mode Equation	1
1.2.2	Coupling between Two Forward Waves	4
1.2.3	Calculation of Coupling Constant	8
1.2.4	Coupling between Two Backward Waves	34
1.3	Semiconductor Couplers	37
1.3.1	Technology of Semiconductor Strip Waveguides	37
1.3.2	SOI Directional Couplers	41
1.3.3	SOI Gating Couplers	42
	References	43
Chapter 2	Semiconductor Branch Waveguides and	
	Tapered Waveguides	46
2.1	Introduction	46
2.2	Tapered Waveguides and Waveguide Connectors	46
2.2.1	Tapered Waveguides	47
2.2.2	Waveguide Connectors	48
2.2.3	Tapered Transition in Y-Junction Branch Waveguides	50
2.3	Planar Y-Junction Branch Waveguides	56
2.3.1	Local Mode Method	56
2.3.2	Step Approximate Method	58