

陈媛媛 著

北京工商大学学术专著出版资助项目

Supported by the Press Found of Beijing Technology and Business University

SOI

光波导器件



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

SOI 光波导器件

陈媛媛 著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

绝缘衬底上的薄膜硅材料 (Silicon-on-insulator, SOI) 是一种新型的硅材料, 近年来在半导体光电子学领域的应用日益广泛。SOI 光波导器件的研究成为目前硅光子学研究的一个热点问题。本书系统地介绍了 SOI 材料的无源导波光学器件, 特别是光开关器件的理论原理以及器件制作方面的最新研究成果。

本书叙述深入浅出, 理论联系实际。书中大部分内容反映了近几年来 SOI 无源光波导器件的最新进展。本书主要供从事半导体集成光学和导波光学器件研究及研制的工作人员, 以及其他相关领域的科研人员、工程技术人员阅读, 也可作为理工科大学有关专业的研究生的教学参考书。

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

SOI 光波导器件 / 陈媛媛著. —北京: 电子工业出版社, 2010.8
ISBN 978-7-121-11760-2

I. ①S… II. ①陈… III. ①硅—光波导—光学元件 IV. ①TN252

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 173751 号

策划编辑: 郭鹏飞

责任编辑: 鄂卫华

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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

开 本: 787×1092 1/16 印张: 9.5 字数: 196 千字

印 次: 2010 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 28.00 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, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

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

服务热线: (010) 88258888。

序

在信息领域，将光子看作信息载体，研究光子的产生和运动特性，这种专门研究光子的信息功能和应用的新型科学便是信息光子学。专门以固体材料为介质，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，这种专门研究固体中的光子性能的新型科学便是固体光子学。以半导体材料为介质的光子学，研究半导体介质中光的产生传输、控制、探测特性和在信息系统中的应用。半导体材料中，硅是应用最广的电子材料。近年来，硅在光子学领域中逐渐活跃起来，成为一种潜力很大的光子材料。相应地，逐步发展形成了硅基光子学。

半导体材料中，III-V 族半导体已经研制成了不同波长的激光器和探测器，在光纤通信等系统中得到广泛的应用。硅是间接带隙的半导体材料，发光效率低，这在很长一段时间内限制了它在光学领域中的发展。然而近二十年来的研究表明，硅也是一种很好的光学材料。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。硅光子学是一门非常新的前沿学科，特别是近一两年来，信息系统和计算机科学技术的发展，要求速率更高、功耗更少、集成度更高的光电子集成模块，进一步促进了片上系统和光互连的发展。因此，硅光子学不再只是一门学科，而是一门实实在在的高新技术。对硅光子学的深入学习、研究、开发、应用已经成为国内外的热点。因此，有关硅光子学的书籍应运而生了。

SOI 是英文 Silicon on Insulator（绝缘衬底上的硅）的简称，它是一种新型的硅基集成电路和光电子集成材料。SOI 材料具有一系列的优点：

1. 在材料性质上具有硅的所有优点。
2. SOI 已经是批量生产的材料，在市场上可以买到各种型号片子。
3. 对于光通信用的长波长来说，硅是透明的，适合于制作长波长波段的波导器件。
4. 硅和二氧化硅的折射率相差很大，有很强的光学限制作用。
5. 这种很强的光学限制作用使得器件的尺寸很小，因而能够在同一芯片上制作很多器件，从而实现光电子器件的集成。
6. SOI 基的电子和光子器件的制作工艺同 CMOS 工艺兼容，因此，CMOS 工艺为进一步批量生产 SOI 光电子器件和光电子集成回路提供了坚实的技术基础。

陈媛媛同志对 SOI 光波导和光子器件进行过多年的研究工作，她结合自己的研究成果和国内外的研究进展编写的这本《SOI 光波导器件》力图综合地、系统地描述 SOI 光子器件的基础知识和最新进展，这是一本国内首次专门介绍 SOI 基光子器件的物理原理、器件设计和在信息系统中的应用的书籍。

硅基光子学的研究刚刚起步，大有方兴未艾的趋势。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。对光电子领域的广大读者，尤其是从事研发的高级科学工程人员和在读的研究生，该书会有参考价值。

谨以此作序。

中国科学院半导体研究所 余金中
2010 年 7 月 7 日

前 言

近年来光纤通信和光信息处理等技术迅速的发展进步，以光子作为信息和能量载体的光子学日益蓬勃壮大。光波导器件作为光子学的重要组成部分越来越受到有关研究人员的重视。在光电子集成技术中，高速率和大容量密集波分复用网络系统，需要重点解决高速传输、复用与解复用、光分插复用、光交叉互连、光波导开关以及高速光调制等问题，而这些技术的实现则离不开高性能和高可靠性的各类光波导结构与器件。随着光波导器件的研究成熟，走向市场，人们正在实现从电子学时代向光子学时代的飞跃。

基于 SOI 材料的波导器件是硅基光子学研究的热点之一。SOI 材料最初由于具有抗辐射等优点主要是被应用于微电子技术中。从 20 世纪 80 年代后期开始，SOI 材料以其良好的导波性能在导波光学器件和光电子器件方面逐渐获得了越来越广泛的应用。特别是大截面尺寸的脊型结构波导的研制成功，降低了 SOI 单模波导与光纤的耦合损耗，极大地推动了 SOI 光波导器件的发展。目前，SOI 材料的制备技术已经比较成熟，拥有氧离子注入、键合背向腐蚀、注氢智能剥离等多种技术。同时加工工艺的改善也使得 SOI 波导传输损耗不断降低。SOI 材料用于制作光波导器件的优越性主要表现在以下几点：

- SOI 光电子工艺与标准的 CMOS 工艺完全兼容，为实现高集成度的光电子回路提供了可能；
- SOI 材料具有很好的导波特性，传输损耗小；
- 导波层硅和限制层二氧化硅之间的折射率相差很大，单个器件有可能做得很小，有利于大规模集成；
- 制备技术成熟多样，成本低廉。

全书共分为 7 章。第 1 章介绍了 SOI 波导材料的性能、制作方法以及 SOI 光波导的常用分析方法；第 2 章介绍了 SOI 波导的单模条件，损耗、耦合特性，重点分析了热氧化方法对损耗的改善结果；第 3 章分析和介绍了 SOI 弯曲波导的损耗机理和影响因素，比较了改善弯曲波导损耗的各种方案；第 4 章介绍了 SOI 基 MMI 光耦合器的基本原理，重点分析了紧缩型耦合器的设计。第 5 章分析介绍了湿法腐蚀的 SOI 基 2×2 光开关的设计、制作以及后期封装测试的实验结果。第 6 章分析介绍了大规模光开关阵列的设计、制作和性能测试结果。第 7 章阐述了 SOI 光波导器件的应用和发展。

本书由陈媛媛著，书中的主要内容来自作者在中科院半导体研究所集成光电子国家重点实验室期间在硅基光子学领域的研究成果。半导体所的余金中、陈少武研究员，严清峰、夏金松、王小龙、王章涛、樊中朝、李艳萍、杨笛、刘敬伟、孙飞、李运涛、李智勇、屠晓光、黄庆忠、徐学俊、肖希、朱宇博士等对笔者的研究工作给予了很大的支持和帮助，在本书的编写过程中也得到了他们的许多帮助，余金中研究员更是在百忙之中为本书写了序言，在此向他们表示衷心的感谢。同时感谢北京工商大学学术专著出版资助项目对本书出版的资助。由于本人学术水平有限，对书中的差错和不当之处，恳求读者批评指正。

陈媛媛
2010 年 7 月

目 录

第 1 章 SOI 光波导材料	1
1.1 引言	1
1.2 硅基光波导材料	2
1.2.1 几种光波导器件的材料的比较	2
1.2.2 硅光子学的发展	3
1.2.3 几种硅基光波导材料的比较	4
1.3 SOI 材料制作技术、性能比较及损耗特性	8
1.4 波导制造的基本工艺	11
1.5 SOI 光波导的数值模拟	14
1.5.1 束传播方法 (BPM)	15
1.5.2 有效折射率法	18
参考文献	20
第 2 章 SOI 波导结构及特性	21
2.1 SOI 脊型波导的结构	21
2.1.1 矩形截面 SOI 脊型波导单模条件	22
2.1.2 SOI 矩形截面的脊形波导的制作过程	24
2.1.3 梯形截面 SOI 脊型波导单模条件	25
2.1.4 SOI 梯形截面的脊形波导的制作过程	26
2.2 SOI 波导的损耗	27
2.2.1 SOI 波导的传输损耗	28
2.2.2 光波导端面处的耦合损耗	29
2.3 热氧化方法减小波导散射损耗	30
2.3.1 热氧化的原理	30
2.3.2 物理模型和 Suprem 工艺模拟	30

2.3.3 实验和模拟结果的比较讨论	31
2.3.4 分次氧化方法的讨论	34
2.4 SOI 波导与光纤的耦合	35
参考文献	39
第 3 章 SOI 弯曲波导的研究	41
3.1 弯曲波导损耗机理的分析	41
3.1.1 等效折射率法的近似	41
3.1.2 平面弯曲波导的损耗机理	42
3.2 影响损耗的因素	44
3.2.1 损耗系数公式	44
3.2.2 宽度、脊高比、半径和弯曲损耗的关系	45
3.3 最佳单模弯曲波导结构参数的确定	46
3.4 弯曲损耗的改善方法	47
3.4.1 在波导连接处引入偏移量	48
3.4.2 弯曲波导形状的改善	49
3.4.3 在波导外侧刻槽	50
3.4.4 几种改善方法的实验结果比较	51
参考文献	52
第 4 章 光耦合器	53
4.1 多模干涉耦合器的基本原理	53
4.2 多模干涉耦合器的特性	60
4.2.1 自映像质量	60
4.2.2 损耗和均匀性	60
4.3 紧缩型多模干涉耦合器的设计	61
4.3.1 抛物线锥形多模干涉耦合器	62
4.3.2 强限制多模干涉耦合器	63
4.3.3 紧缩型的 1×2 3 dB 多模干涉耦合器的设计	64
4.3.4 紧缩型的 1×2 3 dB 多模干涉耦合器的制作容差分析	66
参考文献	68

第 5 章	SOI 光开关	69
5.1	湿法化学腐蚀原理	70
5.1.1	硅 KOH 各向异性腐蚀的微观描述	70
5.2	2×2 开关单元的设计	72
5.2.1	单模波导的设计	72
5.2.2	MZI 结构原理	74
5.2.3	多模干涉耦合器的设计	74
5.2.4	热光调制机制	77
5.3	2×2 开关单元的制作	78
5.4	2×2 开关单元的测试数据分析	79
5.5	端面反射损耗的改善	85
5.5.1	端面反射损耗	85
5.5.2	端面反射率的优化	88
5.6	光开关的封装	89
5.6.1	波导与光纤阵列的耦合对准方法	89
5.6.2	封装基板的制作	91
5.6.3	引线键合	92
5.6.4	封装盒的设计	93
5.6.5	测试结果	94
	参考文献	96
第 6 章	大规模 SOI 光开关阵列	97
6.1	硅的 ICP 干法刻蚀技术	97
6.2	光开关阵列的拓扑结构	99
6.2.1	光开关阵列的分类	99
6.2.2	完全无阻塞型光开关阵列	99
6.2.3	重排无阻塞型光开关阵列	101
6.2.4	阻塞型光开关阵列	102
6.3	光开关阵列的设计	103
6.3.1	阵列结构	103
6.3.2	模斑变换器的引入	104

6.3.3 交叉波导的设计	106
6.4 光开关阵列的制作过程	110
6.5 8×8 重排无阻塞型光开关阵列的实验测试结果	113
6.6 16×16 阻塞型光开关阵列的实验测试结果	118
参考文献	124
第 7 章 SOI 光波导器件的应用及其发展	125
7.1 硅基光子学与光互连技术	125
7.2 光网络中节点技术的发展	129
7.3 SOI 光开关发展概述	131
7.4 其他 SOI 无源光波导器件的研究进展	139
参考文献	143

第 1 章 SOI 光波导材料

1.1 引言

作为目前研究得最透彻的半导体材料，硅材料容易获得、成本低廉且工艺成熟。硅在微电子领域的成功引导人们考虑其在光学上的应用。硅在石英光纤的长波长低损耗窗口（即 $1.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 波长范围内）是透明的，这使其在导波光学方面的应用成为可能。因此，随着光纤通信的迅猛发展，全硅光集成技术成为该领域中的重要方向。纯粹的硅对光是没有限制作用的，必须在硅上形成对光起限制作用的光波导结构才能制作硅的导波光学器件。硅基光波导主要包括硅基 IV 族波导和硅基聚合物波导。其中，硅基 IV 族波导主要包括外延硅/重掺杂硅波导、 SiO_2 光波导、 SiGe/Si 合金光波导和 SOI 光波导。

SOI（Silicon-on-Insulator）技术已经出现几十年了，但取得突破性的进展还是在 20 世纪 80 年代后期。在微电子方面，SOI 器件和电路有许多优于纯硅材料器件的性质，如无门锁效应、源漏寄生电容小、易形成浅结、无金属穿通结效应、良好的跨导和低阈值斜率。在光电子器件方面，由于 Si 的折射率（3.5）比 SiO_2 的折射率（1.5）大很多，所以 SOI 材料本身就构成了很好的导波结构，这为 SOI 材料在光电子器件方面的应用打下了良好的基础。但是，早期 SOI 材料并没有在光电子器件方面得到广泛的应用。其原因一方面是由于 SOI 材料的生长技术不理想，通过各种方法生长的 SOI 材料的损耗都在 $0.5\ \text{dB/cm}$ 量级，使得用这种材料制成的光波导器件损耗比较大；另一方面，由于 Si 和 SiO_2 的大折射率差，因而，要在 SOI 平板波导中传输单模，Si 波导层的厚度要小于 $0.3\ \mu\text{m}$ ，而标准单模光纤的芯区直径约为 $9\ \mu\text{m}$ ，这就使得 SOI 平板波导与单模光纤的耦合效率极低。人们在这两个方面进行了大量工作，首先是 SOI 材料生长技术取得了很大的进展，已经能够生长出传输损耗小于 $0.1\ \text{dB/cm}$ 的 SOI 材料，尽管相对于 SiO_2 材料的传输损耗（一般约为 $0.2\ \text{dB/km}$ ）仍然较大，但是 SOI 材料一般是用来制作各种类型的光波导器件而不是光纤，其尺寸一般为厘米量级或更小，所以，SOI 材料生长技术的进步使得用 SOI 材料制造低损耗光波导器件成为可能。脊形波导结构是集成光学中一种非常重要的结构。1990 年，R. A.Soref 系统地研究了 SOI 大截面脊形波导的模式特性，从理论上指出：在 SOI 大截面脊形波导中实现单模传输是可能的，通过合理设计，SOI 脊形波导结构与标准单模光纤的耦合损耗已经能够做到小于 $0.2\ \text{dB/端面}$ 。以上几个方面的发展使得利用 SOI 材料制作光波导器件的条件已经成熟。

本章介绍用于制作光波导器件的几种硅基光波导材料及其优缺点几种 SOI 材料制作技术、性能比较及损耗特性，SOI 光波导的基本制作工艺，包括光刻、刻蚀等；波导设计中常用的模拟方法，即光束传播法（BPM）和有效折射率法（EIM）。

1.2 硅基光波导材料

1.2.1 几种光波导器件的材料的比较

光波导是集成光路及其元器件中最基本的构成单元，其作用类似电路中的导线，用来实现不同器件之间的光路连接，对光波主要起着限制、传输、耦合的作用。用于制作光波导器件的材料主要有 III-V 族化合物材料、铁电氧化物材料和硅基材料下面简要说明其各自的优缺点。

III-V 族化合物材料是用来制造光波导器件的一种很好的材料。这类材料的最大优点是可以与有源器件（如激光器、光探测器、光放大器等）实现单片集成，但这类材料也存在着明显的不足。首先，这类材料的光传输损耗比较大（0.5 dB/cm），因而较难用来制作低损耗的光波导器件；其次，是这类材料的价格非常昂贵，增加了器件的成本。

铁电氧化物材料（主要是 LiNbO_3 ）的最大优点是具有较大的电光系数，比非铁电材料高一个数量级，可获得快的电光响应；具有宽的光透明范围（从可见到红外），好的热稳定性和化学稳定性。但这类材料制成的光波导器件不能与其他电子器件集成，而且这类材料制成的光波导器件的损耗比较大。

硅在微电子领域里已经成为不可替代的材料；在光子学领域，硅也正在逐渐占据主导地位。硅在光通讯信波段对光的吸收很小，而且其加工工艺和集成电路工艺非常成熟，因此随着光纤通信的迅猛发展，全硅光集成技术成为该领域中的重要方向。硅是共价键间接带隙半导体材料，发光效率和电光系数小，少数载流子迁移率低，阻碍了硅在光电子领域的发展。目前，OEIC 技术中的主要材料是 III-V 族半导体材料，如 AlGaAs/GaAs 和 InGaAsP/InP ，但硅材料在光电子方面有很多优点：

- 易得、价廉，可以得到完整晶格结构的大尺寸硅片；
- 良好的热学性质，可以直接作为集成芯片的热沉，受环境影响小，毒性小；
- 电学性能好，根据不同工艺，硅可以是导体、半导体或绝缘体；
- 机械性能好，便于封装和安装；
- 表面氧化和抛光后是淀积薄膜的理想表面。各向异性腐蚀可得到光滑的条形、脊形结构和 V 形槽；条形、脊形结构是半导体激光器、探测器等光波导器件的基本结构，V 形槽是集成和封装时用作对准的理想结构；
- 易与硅微电子工艺兼容。成熟的工艺和材料直接为制备硅光电子器件所采用，



使硅光电集成技术在经济效益上占有优势。

1.2.2 硅光子学的发展

20 世纪 70 年代，人们开始了通信用光波回路的研究，最初的想法是研制光学超级芯片，在这个芯片里含有光发射器、调制器、放大器、隔离器、探测器以及这些器件的控制电路等，但是还没有一种材料适合制作上述所有的器件，也就是说，“光回路还需要找到它们的硅材料”——这是比拟硅在微电子领域的统治地位而言。与在微电子领域的统治地位相反，硅并不是很好的光子材料，因此，在光子领域并没有得到足够的重视。从 20 世纪 80 年代中期开始，研究者便开始进行相关研究，期望使硅成为实用的光材料，然而，和其他诸如 III-V 族化合物半导体、铌酸锂、二氧化硅等材料相比，没有取得突破性的进展。一些小的进展不足以使大家的注意力从其他材料上转移到硅材料上来。

硅之所以不能成为好的光材料，主要有以下两个原因。首先硅是间接带隙材料，没有本征发光机制，这意味着不可能用常规手段在硅上制作出高效率的发光器件，如激光器。III-V 化合物族材料由于直接带隙的优点成为制作激光器的首选。另外硅的晶体结构是中心反演对称结构，所以没有直接电光效应（Pockels 效应）。不能用快速的直接电光效应制作高速调制器件。在铌酸锂等具有直接电光效应的材料上，通过加电场可以调节材料的折射率，从而实现对光的调制，这种器件的调制频率可以达到 10 GHz。其他的电调制方式还有电吸收调制、电折射调制等，但这些效应在硅材料中都较弱。另外，还可以通过热光效应来改变硅的折射率，但是热调制方式相对较慢，为微秒量级。还可以通过诸如自由载流子的方式对硅的折射率进行调制，这种间接电光效应称为载流子色散效应，它会同时导致载流子吸收。受到载流子扩散速度、复合速度的限制，这种调制方式也比较慢，虽然有文献报道速度可以达到 GHz，但实际器件的调制速率只有 20 MHz。然而，最近实现的几项重大进展使硅基光电子集成变得可行。首先研究结果朝着硅基发光，特别是硅基激光器的方向前进了一大步。实现硅基发光的技术有掺稀土元素铒发光、利用低维结构的量子限制效应发光、位错工程、拉曼放大等技术。最近新加坡的 ST Microelectronics 实现了商业化的硅基发光二极管。更值得大家关注的是，2004 年中国台湾的研究人员已经实现了硅基的电注入光受激辐射，向硅基激光器前进了一大步。另一方面，Intel 公司在 2004 年初利用成熟的微电子工艺实现了在 SOI 上调制速率达到 GHz 的光调制器。他们的器件利用自由载流子色散效应，采用 MZ 结构，调制区和 CMOS 二极管结构相似，可以采用目前非常成熟的 CMOS 工艺制作^[1]。Intel 公司的突破给我们提供了一种在 Si 上制作更高速的光器件的发展方向。随着最近 Si 作为一种光电子材料的困难一个个被跨越，Si 在集成光子领域的命运也随之改变。相信在不久的将来，Si 将成为一种廉价的，制作技术成熟的光子材料，使制作超级光学芯片成为可能。可以说，集成光电子已经找到它自己的 Si，光电子的 Si 时代正在向我们走来。

1.2.3 几种硅基光波导材料的比较^[2]

硅基光波导主要包括硅基 IV 族波导和硅基聚合物波导。其中，硅基 IV 族波导主要包括外延硅/重掺杂硅波导、SiO₂ 光波导、SOI 光波导和 SiGe/Si 合金光波导。

硅基聚合物光波导制备工艺简单、传输损耗小，但热稳定性和抗湿性差是其致命弱点。用聚合物材料制作光波导器件是目前研究的热点之一。从普遍意义上讲，聚合物材料易于合成、取材广泛、价格低廉，可以最终得到性价比高的器件；各种特殊的聚合物材料还具有各自特殊的光学特性，如中心对称聚合物的光学偏振不灵敏性、氟化聚合物的低光学损耗等；一般的聚合物都具有较大的热光系数（一般在 -10^{-4} K^{-1} 的量级），比 SiO₂ 材料高一个量级，可以利用热光效应来实现材料折射率的调制。聚合物材料可以直接淀积在 Si 衬底上，可以实现光电集成。目前，聚合物材料的光传输损耗已经可以做到比较低（在 $1.3 \mu\text{m}$ 约为 0.1 dB/cm ，在 $1.55 \mu\text{m}$ 约为 0.5 dB/cm ），因而可以用来制作低损耗的器件。目前，聚合物材料所面临的困难主要是环境条件（如温度、湿度）的变化对聚合物材料性能的影响。为确保长期工作的稳定性，要求聚合物玻璃化温度高。如何保持聚合物材料在高温下的光学、机械和物理特性仍然是一项艰巨的课题。

在硅基 IV 族波导中，最早提出的用于波长范围为 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的硅基光波导是掺杂硅光波导。外延硅/重掺杂硅波导是采用常规的外延工艺在重掺杂低阻的硅衬底上外延生长一层轻掺杂的硅单晶层而形成。掺入不同浓度的浅能级杂质会引起轻掺杂硅外延层折射率的变化。掺入杂质时，在室温下杂质电离形成载流子。根据色散理论，载流子引起吸收系数和折射率的变化。由于衬底和外延层掺杂浓度不同，二者的折射率也不同，这样就在外延层和衬底硅之间产生了折射率差，形成光波导结构。外延层的折射率比衬底高，因而外延层为波导层，衬底为限制层。Soref 等首先研制了掺杂硅多模平板波导外延硅的厚度为 $7 \sim 43 \mu\text{m}$ ，掺杂浓度为 10^{14} cm^{-3} ，衬底硅的掺杂浓度为 $10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ，实验测得的多模波导的传输损耗为 $5 \sim 13 \text{ dB/cm}$ ，脊形结构单模波导的损耗为 $15 \sim 20 \text{ dB/cm}$ 。A.Splett 等研制了脊形结构 n/n^+ 硅单模光波导，通过结构优化，在 $1.3 \mu\text{m}$ 时波导的损耗为 1.2 dB/cm ，在 $1.55 \mu\text{m}$ 时损耗为 1.5 dB/cm 。尽管增加衬底的掺杂浓度可以增大外延硅和衬底硅之间的折射率差，波导的损耗将会进一步降低，但靠掺杂形成的折射率差不可能很大。该波导结构的波导层和下覆盖层的折射率相差约为 10^{-3} ，对光场的限制有限。同时，重掺杂硅衬底中高浓度的载流子对光具有较大的吸收作用，将使得渗透到衬底部分的光场有较大的衰减，因此，硅外延型光波导的传输损耗过大而无实用价值，难以满足光集成的实际要求。

现在常见的硅基 IV 族光波导材料主要有 SiO₂、掺杂硅 GeSi/Si、SOI 等。表 1-1 列出了三种常见硅基光波导的性能比较。

表 1-1 三种硅基光波导性能比较

波导结构	SiO ₂ 光波导	SiGe/Si 光波导	SOI 光波导
材料制备	SiO ₂ 中掺杂	晶格不匹配	成熟
折射率差	0.1%~0.75%	小	大
与 CMOS 工艺的兼容性	不兼容	兼容	兼容
几何尺寸	大	厚度受限制	大
制作容差	小	小	大
损耗	小，与光纤的损耗一致	较小	较小
与光纤的耦合效率	高	低	较高
缺点	与 Si 的热膨胀不一致，不能长得太厚	材料制备难度较大	—

1. SiO₂ 光波导

SiO₂ 是最早用来制造光波导器件的材料，有很多非常突出的优点。首先，SiO₂ 是制造通信用光纤的主要材料，利用 SiO₂ 制成的光波导器件与单模光纤的耦合损耗很低；SiO₂ 光波导的包层和芯层都是 SiO₂，由于掺杂不同而形成光波导。通常所掺杂质为 TiO₂、GeO₂ 和 P₂O₃。使用这种材料制成的光波导器件因材料本身的吸收引起的损耗比较低，光波导损耗很小，如波长为 1.55 μm 的光信号在 SiO₂ 材料的 Corning SM-28 光纤中的损耗为 0.2 dB/km，传输损耗非常小，在折射率差为 0.75% 的掺 GeO₂ 的 SiO₂ 的单模波导损耗甚至可以低到 0.04 dB/cm。SiO₂ 是弱限制波导，波导折射率差仅为 0.1%~0.75%，这就要求覆盖层很厚。一般地，SiO₂ 波导厚度为 50 μm。SiO₂ 材料具有一定的热光系数，能够制成利用热光效应来实现功能的器件，如热光开关、热光衰减器、热相位补偿的阵列波导光栅。SiO₂ 材料可以直接生长在单晶 Si 上，因而能够实现光电集成。另外，SiO₂ 材料具有很高的环境稳定性，不受温度、酸碱度以及湿度等条件的影响。SiO₂ 波导的工艺很成熟，而且是光子回路很好的平台。但它与电子集成回路（IC）的工艺不兼容，而且较厚的介质层会产生应力，影响器件性能。另外，波导对光的弱的限制作用使得集成波导器件不可能做得很紧凑。同时，利用 SiO₂ 材料来制作光波导器件也面临一些挑战，其中最主要的困难就是材料的均匀性问题。目前，用各种方法生长的 SiO₂ 材料的均匀性都不是很好，对于一些尺寸较小、对材料均匀性要求不高的器件，如可变光学衰减器、光开关，采用 SiO₂ 材料并不会对器件性能造成重要影响，但是对于像阵列波导光栅（AWG）这类对材料均匀性要求非常高的器件，采用均匀性差的 SiO₂ 材料就会导致器件性能的急剧下降。用 SiO₂ 材料制作的器件，波导芯层常常较厚，而 SiO₂ 材料很硬，给刻蚀带来一定的困难。另外，在 Si 衬底上生长 SiO₂ 材料，由于 SiO₂ 与 Si 的热膨胀系数

不同而在 SiO₂ 层中引入应力，从而对器件的偏振特性造成严重影响，在器件设计时常常需要做特殊的处理，因而增加了器件设计上的难度。

2. SiGe/Si 光波导

SiGe/Si 光波导具有与高速电子或者光电子器件集成的特点。在 Si 上进行 GeSi 异质外延或者 Ge 的内向扩散时，调节 SiGe 合金中 Ge 的含量可以改变 SiGe 合金的折射率。根据弗迦定律，无应力的 SiGe 合金的折射率为

$$n_{\text{SiGe}} = (1-x)n_{\text{Si}} + xn_{\text{Ge}} = 3.5 + 0.8x \quad (1-1)$$

由实验得到的应力 Si_{1-x}Ge_x 合金折射率的经验公式为

$$n_{\text{SiGe}} = n_{\text{Si}} + 0.3x + 0.32x^2 \quad (1-2)$$

根据以上原则，可以制成不同折射率差的 SiGe/Si 光波导。

SiGe 合金光波导有两种制作方法：Si 上 SiGe 异质外延生长和 Ge 扩散。SiGe 合金的异质外延有 MBE 和 CVD 等方法。由于 Si_{1-x}Ge_x 同 Si 之间存在晶格失配，在外延层中将会存在应力。当外延层厚度达到一定的厚度时，将会在外延层中产生位错。因此，为了保证应变层没有失配位错，外延层必须小于某一临界厚度，临界厚度又与 Ge 组份含量所占比例有关，因此要得到无位错大尺寸 SiGe/Si 光波导，Ge 组份含量应受到限制。A.Splett 等用 MBE 生长 3.45 μm 厚的应力 Si_{0.99}Ge_{0.01} 光波导，制成脊形单模波导，波长为 1.3 μm 时损耗为 35 dB/cm^[3]。R.A.Soref 等用 CVD 外延生长了无应力 Ge 组份含量为 1%和 18%的 10 μm 厚的 SiGe 外延层，并在上面附加一层 Si 层，制成脊形波导结构，对 TE 模损耗为 3.2 dB/cm，TM 模的损耗为 1.9 dB/cm^[4,5]。与外延 SiGe 波导相比，Ge 扩散波导的制作更简单，而且波导损耗更小。利用扩散区折射率的不同形成光波导。J.Schiniditch 等采用 Ge 内向扩散制作了 SiGe 光波导，波导损耗可低于 0.3 dB/cm^[6]。

SiGe/Si 光波导具有与 CMOS 电路工艺兼容的特点，可制作高速 CMOS 器件，因而可以制作光电集成芯片。然而，对 SiGe/Si 光波导，由于在材料生长中 SiGe 和 Si 的晶格不匹配，波导层 SiGe 的应变层厚度受到临界厚度的限制。当超过临界厚度时会产生大量的失配位错，破坏材料的物理特性。因此，SiGe/Si 光波导在几何尺寸上与光纤存在很大的不匹配，与光纤耦合损耗大，限制了其在集成光学中的应用。采用开放型大截面脊形波导可以解决上述问题。脊形光波导在水平方向上有较小的限制效应，等效折射率差很小，可以实现大截面尺寸 SOI 波导的单模传输，截面尺寸可与单模光纤的芯径相匹配，大大提高了波导与光纤的耦合效率。

3. SOI 光波导

绝缘衬底上的薄膜硅材料（SOI）是一种新型的 Si 材料，作为绝缘体的材料通常为

SiO₂，也有采用 SiON 或蓝宝石的。其中，采用 Si/SiO₂/Si 结构的 SOI 光波导研究得最多。SOI 材料最初是为了满足微电子学技术的发展而出现的，SOI 上可以制作各种高性能及抗辐射电子电路。SOI 材料用于导波光电子器件的研究还是在 20 世纪 80 年代后期，当时主要认为它可以用来制作介质光波导。进入 20 世纪 90 年代以后，才开始研究 SOI 光波导、SOI 无源导波器件以及 SOI 有源导波器件。SOI 脊形波导是硅基集成光电子器件的基础。由于 Si 的折射率 ($n=3.5$) 比 SiO₂ ($n=1.5$) 和空气 ($n=1$) 的大得多，要使封闭结构的 SOI 平板波导结构只支持基模传输形成单模波导，波导的横向尺寸要小于 0.2 μm 。而标准的单模光纤的芯区直径大于 8 μm 。由于波导基模场和单模光纤的模场非常不匹配，光纤和波导的耦合效率极低，不利于减小器件的插入损耗。与 SiGe/Si 光波导类似，可以采用开放型大截面脊形波导解决了上述问题，提高波导与光纤的耦合效率。此外，R.soref 等已证明 SOI 大截面脊形波导的单模传输当 SOI 波导的厚度 $H>\lambda$ 时，波导的损耗与厚度 H 满足 $1/H^3$ 的关系。采用大截面脊形波导可降低波导的损耗。随着 SOI 材料和波导制作工艺的不断完善，SOI 波导的传输损耗不断降低，从最初的十几 dB/cm 到低于 1 dB/cm。U.Fisher 等制作的大截面尺寸脊形 SOI 单模波导传输损耗小于 0.1 dB/cm 与单模光纤的耦合损耗低达 0.17 dB/cm。因为上述原因，SOI 脊形光波导成为了 Si 基集成光学中一种重要结构，是其他有源和无源器件的基础。

与 SiO₂、SiGe 光波导相比，SOI 光波导制备工艺更加成熟，也更容易实现光电集成。SOI 材料的最大优点是采用的工艺实际上就是普通的 Si 工艺，因而不会增加额外的工艺难度；使用 SOI 材料制成的光波导器件很容易与其他 Si 基器件实现单片集成，因而具有很好的集成性和可扩展性；SOI 材料的稳定性能好，不受外界环境温度、酸碱度、湿度等条件的影响；SOI 材料虽然没有一次电光效应和二次电光效应，但是 Si 中有很强的等离子体色散效应（就是指材料的折射率随载流子浓度的变化而改变的现象），因而可以利用等离子体色散效应来实现 SOI 材料折射率的调制；SOI 材料具有很大的热光系数 ($2\times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$)，其引起的折射率变化与等离子体色散效应具有相同的量级，因而也可以利用热光效应来实现 SOI 材料折射率的调制。SOI 材料在微电子和光电子方面的广泛应用蕴含了巨大的商业潜力，目前已经有一些公司提供商用化的 SOI 材料，因而选用 SOI 材料可以在较高的起点上进行光波导器件的研制工作，从而缩短了研究开发的周期。

虽然 SOI 材料具有很多优点，但作为光电子器件材料，也存在一些不足之处。表 1-2 详细列出了 SOI 作为光电子材料的优势和不足之处。

表 1-2 SOI 作为光电子材料的优势劣势

优 势	劣 势
1. 稳定、成熟的材料 2. 稳定的氧化层作包层/电绝缘层 3. 相对低成本的衬底 4. 对通信用 $1.3\ \mu\text{m}/1.5\ \mu\text{m}$ 波长的光透明 5. 工艺成熟 6. 材料的高折射率使器件能够小型化 7. 半导体材料提供光电子集成的潜力 8. 高热导率意味着器件低功耗，能够高密度封装 9. 载流子注入，实现光调制 10. 热光效应，提供另一种方式的光调制	1. 无 Pockels 效应 2. 非直接带隙材料，不能实现本征光源 3. 高折射率使器件很小，工艺上难实现（如光栅） 4. 调制机制相对较慢 5. 热效应对某些光学回路还是个问题

1.3 SOI 材料制作技术、性能比较及损耗特性

SOI 材料是微电子领域中的重要材料，同时它也逐渐成为硅基集成光电子的一种重要材料。随着最近几项 Si 材料及器件研究的重大突破，SOI 在较短时间内成为集成光电子领域内的主要材料。

随着 SOI 材料成为重要的电子和光电子材料，发展了许多 SOI 材料制备技术。目前，比较成熟和商品化的技术有隔离氧离子注入（SIMOX-SOI）、硅键合背面腐蚀（BE-SOI）和注氢智能剥离（Smart Cut）等。

1. 氧离子注入形成 SOI 结构（SIMOX）

SIMOX-SOI 的基本原理如图（1-1 所示）是，用高能 O^+ （ $150\sim 300\text{Kev}$ ）注入硅衬底中，经高温退火后形成 SOI 结构。所形成 SiO_2 的性能和厚度与 O^+ 注入剂量有关。当注入氧剂量很大时，由于 SiO_2 体积大于 Si，因此上层薄硅层将会膨胀；大剂量 O^+ 注入也会使表面 Si 溅射；大剂量 O^+ 注入还会导致射程范围内 Si 的非晶化。经 O^+ 注入后形成一层高度无序但依然是单晶的顶部硅层，其中含有 SiO_2 沉淀物，然后是一层非晶的氧化物埋层以及伸进硅衬底的重度损伤的硅层。为了形成顶部有序的单晶硅层，降低表面硅层缺陷，形成陡峭的 Si/SiO₂ 界面，必须对样品进行退火处理。目前，标准的退火工艺是用多晶硅或碳化硅管的退火炉，在 $1300\sim 1350^\circ\text{C}$ 温度范围内退火 6 h，退火后的样品再用 CVD 生长一定厚度的 Si 以达到需要的波导层厚度，即得到 SIMOX-SOI 材料。在利用 SIMOX-SOI 制作波导层在亚微米量级的器件时，必须考虑到 Si 和 SiO_2 界面的粗糙度。