



全国高技术重点图书

# 半导体硅基材料 及其光波导

赵策洲 高 勇 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

# 半导体硅基材料及其光波导

赵策洲 高 勇 编著

電子工業出版社  
Publishing House of Electronics Industry

## 内 容 简 介

本书以半导体硅基材料的最新形式—Silicon-On-Insulator(SOI)材料、GeSi/Si 材料、SiC/Si 材料和 GaAs/Si 材料为主,系统地介绍了 SOI 和 GeSi/Si 等材料、半导体中的各种光导波理论及其制造技术。全书分三篇共计十章。上篇介绍了各种 SOI 材料的研制技术,中篇介绍了各种硅基异质结材料的研制技术,下篇分析和阐述了半导体硅及硅基平板波导和条形波导的导波原理、制造和测量技术。叙述深入浅出,理论联系实际。大部分内容反映了半导体材料和硅导波光学 80 年代末以来的新进展。本书主要供从事半导体集成光学和半导体集成电路器件研究和研制工作、以及其它相关领域的科研人员及工程技术人员阅读,也可作为理工科大学有关专业的研究生和高年级本科生的教学参考书。

书 名:半导体硅基材料及其光波导

编 著 者:赵策洲 高勇

责任编辑:陈晓莉

特约编辑:仁 忠

排版制作:电子工业出版社计算机排版室排版

印 刷 者:北京科技大学印刷厂

出版发行:电子工业出版社出版、发行 URL:<http://www.phei.co.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036 发行部电话:68214070

经 销:各地新华书店经销

开 本:850×1168 1/32 印张:10.125 字数:280 千字

版 次:1997 年 8 月第 1 版 1997 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-5053-4121-9  
TN·1065

定 价:20.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换  
版权所有·翻印必究

# 序


受光纤通信与计算机技术发展的需求牵引,加以硅材料在微电子技术中的重要地位的影响,近年来集成光学与光电子集成领域对硅及硅锗材料的研究十分重视,本书从理论与实验两个方面研究了半导体硅基材料及其光导波。

赵策洲副教授和高勇副教授在我们这里做博士学位论文的三年多时间里,与电子部 24 所和上海复旦大学合作,做了大量的实际工作,并查阅了大量的文献资料。他们既要进行 SOI 和 GeSi/Si 材料的制备及特性分析,又要进行半导体光波导的理论分析、设计和试制。这些工作的顺利进行并取得比较令人满意的结果,说明作者在半导体工艺和半导体光电子学领域具备较宽广的基础理论和实践能力。该书从实验和理论两方面证实了 SOI 和 GeSi/Si 材料制备的可行性及其在导波光学中应用的可行性与潜在优势,对光集成和光电子集成技术的发展是一个很重要的贡献,具有较高的学术价值和潜在的实用价值。

大家知道,用光子作为信息的载体与电子相比在传输方面带来的优点已在光纤通信上充分显示。今后,毋庸置疑,电缆通信即使不是全部也将是绝大部分被光纤通信所取代。把光子用于信息处理方面的潜在作用在某种意义上说将比光子用于通信更为杰出。这是由于光子与电子的物理本质及特性所决定的。首先,光子不像电子那样带有电荷,这就造成光学的固有并行性,这特性对信息的并行处理和并行计算恰好配合,是电子学无法比拟的。其次,光子不具有静质量,传播过程中能量损耗极小。光具有很高频率,并且传输带宽不会有类似 RC 这种弛豫过程的限制。光学系

统的空间带宽和时间带宽积很大,能够容纳大量独立的信道完成所需的各种操作。第三,光互连具有非常高的带宽,可以利用很多独立的通信通道;光互连可以提供大量的连接数,并能实现动态互连,这些都是电子互连无法做到的。

因此,感谢电子工业出版社给予他们这样一个出版机会,相信该书的出版将推动半导体光电子集成技术的发展。

Handwritten signature in black ink, reading '刘世强' (Liu Shiqiang).

1996年8月

# 绪 论

光通信和光集成电路的迅速发展,促进了半导体材料和半导体光波导技术基本理论与应用技术的研究。

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( $\text{LiNbO}_3$ )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,就曾排除在硅上进行单片光集成的可能性<sup>[1]</sup>,当时的理由是硅不具备电光效应(实际上是指 Pockels 效应,作者注)和受激辐射的作用。

80年代后期的研究表明,硅的这两个固有缺陷也不是完全不可克服的。硅虽然没有 Pockels 效应(即线性电光效应),但有其它一些效应可资利用,如 Franz-Keldysh 效应、Kerr 效应和等离子体色散效应<sup>[2-3]</sup>(即 the 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。尽管硅的受激辐射作用(即制作掺铟硅激光器)的研究会不会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<sup>[4-5]</sup>,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<sup>[6-9]</sup>。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<sup>[10]</sup>和硅化铂肖特基二极管探测器也已成为可能<sup>[11]</sup>。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<sup>[12]</sup>。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,但是,无论如何,把光电子器件集成到硅单晶衬底上,制成光电子回路,是混合集成极有吸引力的选择<sup>[3,13-15]</sup>。这种混合集成,不但可以利用

MBE, MOCVD 等技术生长  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Si}$  光电探测器<sup>[16]</sup>, 而且利用这些技术还可以在硅衬底上制作硅基红外光激光器<sup>[17]</sup>,  $\text{AlGaAs}/\text{Si}$  双异质结激光二极管<sup>[18]</sup>, 以及  $\text{GaAs}/\text{Si}$  电光调制器等。因此, 对硅的光波导理论和工艺进行研究和总结就非常必要了。

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<sup>[19]</sup>, 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  $10^{15}\text{bit/s}$ 。这将是研究中的巨型计算机 CRAY-3 运算速度的一万 ( $10^4$ ) 倍<sup>[20]</sup>。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 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 中硅的 VLSI 都必须从硅入手, 因为目前只有硅才能 VLSI (超大规模集成)。因此, 从光纤通信和计算机这个角度来看, 由于硅光波导是实现集成光路光互连的最主要手段, 研究硅的光波导及其应用技术是避免不了的。

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, 加工线度已进入亚微米量级, 日益接近于硅片集成电路的物理极限<sup>[21]</sup>, 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, 如: (1) 芯片之间存在时钟歪曲现象<sup>[3]</sup>, 另外随着铝引线的减小, 电迁移趋近临界值, 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 GHz 量级带宽传输比较困难 (有  $10^{10}\text{Hz}$  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<sup>[13]</sup>。因此, 从

集成电路自身的角度而言,研究硅的导光机制也就迫在眉睫了。

综上所述,由于以上三方面的原因刺激了硅(含 SOI 和 GeSi)光波导的发展和研究。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。

在 SOI 材料上形成的电子器件比体硅材料上形成的器件具有诸多的优点<sup>[22-23]</sup>,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、无金属穿通结效应、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 器件和电路还有其它许多优于体硅器件的性质。另外,在集成光学和集成光路中,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。

SOI 光波导是硅光波导器件和未来硅激光器的基础,也是实现集成光路和集成电路光互连的重要手段,研究 SOI 光波导为在 SOI 光波导的基础上研究 SOI 波导耦合器,SOI 光波导电光调制器/开关等光波导器件具有重要意义。

硅只能制作小于  $1.1\mu\text{m}$  的光探测器,如能解决用硅制作  $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$  的光探测器,则硅在光电子领域中更有广范的应用前景。随着 SiGe/Si 应变层超晶格技术的发展,已经研制成功多种不同结构的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  应变层超晶格  $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$  光探测器<sup>[24-29]</sup>,又发展了硅上异质外延生长  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  层,在其中构成损耗较小的光波导<sup>[30-35]</sup>,用来制作导波光学器件。

本书是根据国内外有关文献及作者近两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硅基材料 90 年代以来的新进展。本书绪论、第一、四、五、八、九和十章由赵策洲博士编写,第二、三、六、七章及第九章中的 9.5.6 和 9.5.7 节由高勇博士编



写。

作者希望本书既能够满足从事半导体器件又能够满足从事光电子器件研究和研制的工作、以及其它相关领域的科研人员及工程技术人员的需要，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，在内容的安排上，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的过程中，在明确物理概念的前提下，力求做到简明扼要、深入浅出。

承蒙西安交通大学的刘恩科教授，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和电子部 24 所郭林高级工程师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。

本文的工作是国家“863”高技术项目，并获得国家自然科学基金和国家教委博士点基金的资助。

· 编著者

1996 年 7 月 于西安

# 目 录

## 上篇 SOI 材料制备

引言 .....	1
<b>第一章 氧离子注入 SOI 技术</b>	
1.1 氧的剂量 .....	3
1.2 注入温度 .....	4
1.3 退火参数 .....	6
1.4 硅膜和二氧化硅埋层厚度模型 .....	8
1.5 多重注入 .....	14
1.6 低能注入 .....	14
1.7 离子注入形成 SIMOX 结构的计算机模拟 .....	15
1.8 SIMOX 材料质量 .....	19
<b>第二章 外延横向过生长 SOI 技术</b>	
2.1 概述 .....	21
2.2 原理及技术 .....	21
2.3 改进技术 .....	26
<b>第三章 区熔再结晶 SOI 技术</b>	
3.1 概述 .....	29
3.2 区熔再结晶的机理 .....	30
3.2.1 溶解前沿 .....	30
3.2.2 凝固前沿 .....	32
3.3 形貌缺陷的产生与抑制 .....	36
3.3.1 形貌缺陷的产生 .....	36

3.3.2	质量转移效应 .....	37
3.3.3	覆盖层的抑制作用 .....	38
3.3.4	优化设计的抑制作用 .....	39
3.4	区熔再结晶膜中的杂质 .....	40
3.5	ZRM 新技术 .....	41
<b>第四章</b>	<b>硅片键合和反面腐蚀</b>	
4.1	机理概述 .....	42
4.2	非本征空洞 .....	45
4.2.1	硅片直接键合工艺对晶片平整度的要求 ..	45
4.2.2	沾污粒子的影响 .....	48
4.2.3	空洞的检测 .....	49
4.3	SDB 中硅片表面处理 .....	50
4.3.1	表面活化处理 .....	50
4.3.2	表面亲水处理 .....	54
4.4	低温 SDB 技术 .....	58
4.4.1	低温 SDB 实验 .....	59
4.4.2	低温 SDB 可能的机制 .....	61
4.5	BESOI 技术 .....	62
4.5.1	硅各向异性腐蚀中自动终止技术 .....	63
4.5.2	半导体/电解质的电极反应 .....	70
4.5.3	SDB SOI 的减薄技术 .....	79
<b>第五章</b>	<b>SOI 材料的硅膜性能及表征技术</b>	
5.1	SOI 材料的硅膜性能 .....	89
5.2	硅膜和 SiO <sub>2</sub> 膜厚度测量 .....	93
5.2.1	概述 .....	93
5.2.2	椭偏光谱测量法 .....	94
5.3	晶体质量 .....	97
5.3.1	晶向和晶化程度 .....	97
5.3.2	晶体缺陷 .....	99

5.4	硅膜的沾污 .....	101
5.5	载流子寿命和表面复合 .....	103
5.5.1	表面光电压测量 .....	103
5.5.2	漏泄电流测量 .....	105
5.5.3	横向双极晶体管测量 .....	107
5.6	硅/二氧化硅界面 .....	107
5.6.1	MISIS 结构的 $C-V$ 特性测量 .....	108
5.6.2	SIS 结构的 $C-V$ 特性测量 .....	110
5.6.3	电荷泵测量技术 .....	117

## 中篇 硅基异质结材料的研制

### 第六章 SiGe/Si 材料的性质与制备

6.1	SiGe/Si 材料与器件的发展简况 .....	120
6.2	SiGe/Si 材料的基本性质和结构的优异特性 .....	122
6.2.1	SiGe 异质结构材料基本性质 .....	122
6.2.2	SiGe/Si 应变异质结构的优异特性 .....	139
6.3	SiGe/Si 异质结构和超晶格材料的制备 .....	144
6.3.1	分子束外延(MBE)生长方法 .....	145
6.3.2	化学气相淀积(CVD)生长方法 .....	148
6.3.3	MBE 与 CVD 综合的生长方法(Si-CBE) .....	157

### 第七章 其它硅基异质结材料

7.1	硅基 GaAs 材料 .....	160
7.1.1	引言 .....	160
7.1.2	硅上生长 III-V 族半导体材料的基本问题 .....	162
7.1.3	生长工艺研究 .....	165
7.1.4	生长机理研究 .....	170
7.1.5	GaAs/Si 异质结材料的应用 .....	174
7.2	硅基 SiC 材料 .....	181
7.2.1	引言 .....	181

7.2.2	碳化硅的晶体结构 .....	182
7.2.3	碳化硅材料的特性 .....	183
7.2.4	碳化硅半导体材料的应用领域 .....	186
7.2.5	碳化硅体单晶制造技术 .....	187
7.2.6	碳化硅薄膜的制备技术 .....	188

## 下篇 半导体光波导

### 第八章 平面光波导

8.1	平板波导导波原理 .....	194
8.1.1	线光学分析 .....	194
8.1.2	电磁场分析 .....	198
8.1.3	平板对称波导( $n_2 = n_3$ )的偶次模 和奇次模 .....	200
8.1.4	多层平板波导 .....	201
8.2	渐变折射率分布的平面波导导波原理 .....	204
8.2.1	线光学方法 .....	205
8.2.2	变分法 .....	206
8.2.3	温策尔-克拉默-布里洛温近似(WKB)法 .....	207
8.2.4	微扰法 .....	207
8.3	SOI平面光波导 .....	208
8.3.1	SOI平面光波导结构 .....	208
8.3.2	SOI平板光波导导波特性 .....	211
8.4	SOI平板波导模吸收损耗 .....	214
8.4.1	硅导波层吸收损耗 .....	214
8.4.2	SOI平板波导导模吸收损耗 .....	217

### 第九章 三维波导理论及硅基条形波导

9.1	引言 .....	221
9.2	矩形波导电磁场模式的近似分析 .....	221
9.2.1	TE导模 $E_{mn}^y$ .....	222

9.2.2	TM 导模 $E_{mn}^z$ .....	224
9.3	矩形波导的有效折射率法 .....	225
9.4	矩形波导的其它近似方法 .....	227
9.4.1	微扰法 .....	228
9.4.2	变分法 .....	229
9.4.3	WRM 法 .....	230
9.5	脊形波导 .....	231
9.5.1	有效折射率法 I .....	232
9.5.2	有效折射率法 II .....	237
9.5.3	脊形波导的变分法分析 .....	238
9.5.4	脊形波导的其它近似方法 .....	240
9.5.5	大截面脊形波导理论 .....	240
9.5.6	SiGe/Si 异质结构脊形光波导 .....	247
9.5.7	SiGe 超晶格光波导 .....	256
9.5.8	多量子阱脊形波导的有效折射率法 .....	265
9.6	埋导层脊形波导 .....	267
9.7	凸条形波导和沟道波导 .....	269
9.8	条载波导 .....	272
9.9	埋沟波导 .....	272
<b>第十章 SOI 三维波导制作技术与测量</b>		
10.1	SOI 三维波导制作技术 .....	274
10.1.1	各向异性腐蚀法 .....	274
10.1.2	各向同性腐蚀法 .....	276
10.1.3	扩散法 .....	276
10.2	波导传输损耗与测量 .....	277
10.2.1	波导传输损耗 .....	277
10.2.2	波导的测量 .....	280
<b>参考文献</b> .....		288
<b>后记</b> .....		309

# 上篇 SOI 材料制备

## 引 言

尽管 SOI (Silicon-On-Insulator) 技术已出现十多年了,但取得突破性进展还是在 80 年代后期。现在人们已经充分地认识到薄硅膜 SOI MOSFET 技术优于体硅相应技术的三个突出优点,即无闩锁效应、源漏寄生电容小、易形成浅结,从而能有效地抑制 MOS 器件的小尺寸效应,成为深亚微米 VLSI 技术中明显的优势和潜力。SOI 器件和电路还有许多优于体硅器件的性质,如抗辐照、跨导、亚阈值斜率及三维集成等,所有这些性质为 SOI 微电子器件的高速发展奠定了实质性的基础。同样,在光电子器件方面,尤其是在集成光电子器件方面,由于 SOI 导波传输的极低损耗和横向器件载流子的高效率时间利用率等突出优点,使得 SOI 光波导,无源光波导器件,光波导调制开关和集成光电探测器等导波光学器件的发展,越来越受到重视。本篇首先介绍 SOI 材料的制备,然后介绍 SOI 中薄硅膜的本体性质。

为在绝缘体上得到单晶硅膜,发展了许多种技术,主要可分为五类,即同质外延生长技术,异质外延生长技术,再结晶技术,体硅隔离技术和键合技术。其中异质外延技术包括蓝宝石上外延硅(SOS)技术,立方晶系的二氧化锆上外延生长硅(SOZ)技术,尖晶石上外延生长硅(SOM)技术和硅上外延生长氟化钙再生长硅技术。这中间 SOS 技术最为成熟,它是能用于 LSI 和 VLSI 电路制造的一致的异质外延技术。1971 年就有商品化的 SOS 片,1987 年有了 64KCMOS 静态存贮器,1988 年有了薄膜 SOS 器件。同质外

延技术包括外延横向过生长(ELO)技术和横向固相外延生长(LSPE)技术,该类技术的发展主要是为了制造需用低温工艺的三维集成电路和集成光电子回路。目前这类技术正在研制中,还没有商品化的同质外延 SOI 材料。再结晶技术包括激光再结晶技术,电子束再结晶技术,区熔再结晶技术和自离子注入再结晶技术;其中电子束再结晶(E-beam)技术中扫描技术的线源束发展,实现了用于制造三维集成电路的多层 SOI 再结晶,并且国际上已经有 E-beam SOI 出售。而由于区熔再结晶(ZMR)技术与生产硅锭所用的浮区精炼工艺十分相似,因而已成功地用于制造介质隔离的高压 MOSFET 器件,并且国际上也已经有 ZMR SOI 出售。体硅隔离技术包括多孔硅全隔离技术,注氧隔离技术,注氮隔离技术和注氧、氮隔离技术。其中注氧隔离(SIMOX)技术最为成熟,1987 年 SIMOX SOI 片商品化,1990 年商业化的 64K 静态存储器问世。键合技术包括用于功率器件的硅片直接键合技术和硅片氧化后键合技术等多种技术。

近几年中,SOI 领域成果累累,发表了大量的有关材料、器件和电路的文章,遗憾的是本书的重点不是讨论 SOI 技术,不可能也不必要把所有这些文献都考虑进去,因此必须选择有代表性的文献<sup>[1.1-1.14]</sup>,以便能清晰而简明地给出目前国际国内上已经商品化和将要商品化的、最适用于光电器件的 SOI 材料最突出的研究成果,这些技术是 SIMOX (Separation by Implanted Oxygen:注氧隔离) SOI 技术, Bonding (Wafer bonding and etch-back:硅片键合)SOI 技术, ELO(Epitaxial Lateral Overgrowth:外延横向过生长)SOI 技术和 ZMR(Zone Melting Recrystallization:区熔再结晶) SOI 技术。对于这些技术国内科技工作者也做了大量的工作。下面分别对这些技术作详细介绍。



# 第一章 氧离子注入 SOI 技术

氧离子注入(SIMOX)形成 SOI 结构是目前制备 SOI 结构的方法中最先进的。SIMOX SOI 材料的形成原理也是非常简单的(图 1.1),具体步骤是用高能量  $O^+$  (150~300keV) 注入硅衬底中,离子流密度与注入能量有关,一般在 150keV 时为  $2.6 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ ,在 300keV 时为  $1.3 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ 。注入以后样品在 1150℃ 退火 2 小时,就形成了 SOI 结构。注入时衬底片需要加温,对每一个离子流密度有一个相应的临界温度,衬片温度只有高于临界温度,注入后才能保持结晶性,退火以后晶体质量才比较好。总之,氧离子注入到硅片表面下并形成  $\text{SiO}_2$  埋层,所有工艺条件应保证氧化物上面有一层单晶硅。

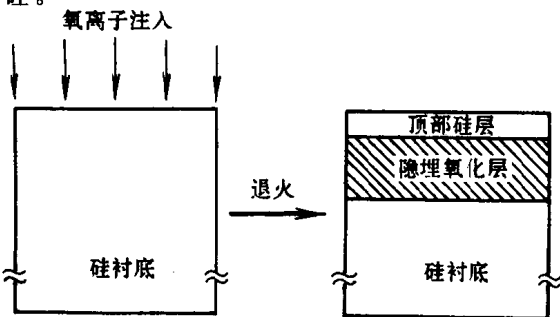


图 1.1 SIMOX 原理:硅中大剂量氧注入,然后退火,在薄的单晶硅表面层下面形成  $\text{SiO}_2$  埋层。

## 1.1 氧的剂量

高剂量的氧离子注入硅中后,将会引起一系列与注入剂量有关的现象。具有化学剂量比的  $\text{SiO}_2$  含有  $4.4 \times 10^{22}$  氧原子/ $\text{cm}^3$ ,因此,若注入  $4.4 \times 10^{17}$  原子/ $\text{cm}^2$  的氧离子应足以产生 100nm 厚的  $\text{SiO}_2$  埋层。然而,由于离子注入的统计性质,硅中氧分布形状不是矩形的,而是一个相当不对称的高斯分布,注入原子展宽大大超过