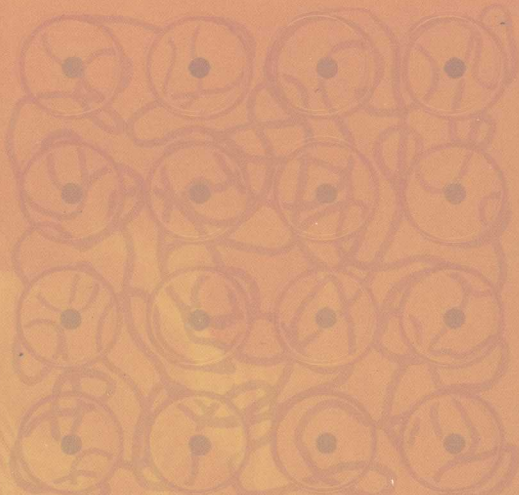




[法]P.希弗特 编著 屠海令 等译
[德]E.克瑞梅尔

硅技术的发展 和未来



冶金工业出版社

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

硅技术的发展和未来

[法] P. 希弗特
[德] E. 克瑞梅尔 编著

屠海令 等译

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2009

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2009-0710 号

Translation from the English language edition:

Silicon edited by P. Siffert and E. F. Krimmel,

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004

Springer is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

硅技术的发展和未来/(法)希弗特(Siffert, P.),
(德)克瑞梅尔(Krimmel, E.)编著;屠海令等译. —北京:
冶金工业出版社, 2009. 2

书名原文: Silicon—Evolution and Future of a Technology

ISBN 978-7-5024-4536-2

I. 硅… II. ①希… ②克… ③屠… III. 硅—研究
IV. TQ127. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 007962 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 李培禄 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 刘 倩 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4536-2

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2009 年 2 月第 1 版, 2009 年 2 月第 1 次印刷

155mm×235mm; 31.25 印张; 539 千字; 480 页

50.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

序

2006 年，欧洲材料研究学会年会在法国召开，受 Paul Siffert 教授的邀请，我参与主持了其中的半导体硅材料分会。与会期间，Paul Siffert 教授很高兴将他和 Eberhard F. Krimmel 教授共同编著的《硅技术的发展和未来》（Silicon: Evolution and Future of a Technology）一书赠予我。由于书中所述内容新颖，国内此类专著尚不多见，在征得作者和出版机构 Springer-Verlag GmbH 的同意后，本人（前言、第 1、3、5、22 章）同朱悟新（第 9、13、15 章）、邓志杰（第 6、7、20、21 章）、米绪军（第 18、19、24、25 章）、黄倬（第 12、16、17、23 章）、肖清华（第 8、14 章）、马通达（第 2、4、10、11 章）等一起将该书译成中文，以飨读者。

半导体工业是人类历史发展过程中的一个奇迹，它推动着全球科技进步，并不断将更新换代的信息商品以广大消费者可以接受的价格送到千家万户，而支撑这一切的基础即是半导体硅材料。撰写硅材料方面的书籍是一件十分具有挑战性的工作，本书作者 Paul Siffert 教授和 Eberhard F. Krimmel 教授是世界知名的半导体材料专家，Paul Siffert 教授曾任欧洲材料研究学会（EMRS）主席，现仍任 EMRS 秘书长；Eberhard F. Krimmel 教授曾任职于西门子公司领导半导体和激光技术的研发，是 EMRS 的创始人之一。必须指出的是，由于半导体硅技术的发展非常迅速，书中部分章节的某些数据略显陈旧，尽管如此，

本书依然不失为一本非常优秀的著作。

全书涵盖了半导体硅及硅基材料、多晶硅和光伏技术、硅外延和薄膜、硅掺杂、器件、化合物半导体、晶格缺陷、杂质影响等多方面的内容，并涉及量子计算机、碳纳米管在微电子中的应用、情境智能系统、大脑半导体等诸多新概念。它系统总结了世界半导体硅材料的发展历史、研究现状，并指出了今后的发展方向；其内容广泛，数据详实，可作为高等院校、科研院所和相关单位中从事半导体材料学习、科研和开发人员的参考用书。

在翻译出版本书的过程中，得到 Springer-Verlag GmbH 出版社和冶金工业出版社的大力合作，北京有色金属研究总院张世荣同志参加了部分组织工作，在此一并表示衷心感谢！

由于时间仓促，译审之中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。



2008 年秋于北京

前 言

人类社会的进化和发展一般以石器时代、青铜器时代和铁器时代这样一些关键词来描述，即以材料为标志。半导体特别是硅的发现和应用使我们的生存条件，社会及生活发生了革命性的变化，甚至超过以前所有材料时代所发生变化的总和。或许某天我们的后代会称之为硅时代。然而，更准确一点讲，现阶段的特点是众多新材料的发现、开发与应用。这些材料有新的合金、陶瓷、塑料、有机化学合成物、复合材料、生物材料以及微电子学、纳米技术和空间科学用的各种材料。微电子材料包括硅和其他元素半导体材料以及化合物半导体和有机半导体材料。硅作为电子学的基础材料之一在上述材料的互相依存和应用方面扮演着核心角色。我们生活在硅时代仅仅半个世纪，现在是否已经跃入合成有机电子学材料的新时代呢？目前我们尚无答案。

首次关于硅的重要工作始于 50 多年以前。工业界在德国巴伐利亚州东北部 Pretzfeld 几个世纪前的一个古老乡村城堡里设立了欧洲的半导体实验室。那时尚没有今天所定义的超净条件。但就是这支人数不多但非常优秀的科学家和工程师组成的队伍热情地在那座城堡里进行技术开发并研制出当时最优质的硅材料。这座位于欧洲中心的实验室后来成为单晶硅的重点实验室之一。作为一名年轻的科学工作者，Krimmel 在 25 年以后访问了曾在 Pretzfeld 城堡最初研究硅的开创者之一的老科学家 Spenke，

并通过他了解到有关过去的工作岁月。那不只是反复试验，而且是失败交织着成功的喜悦。其更体现了精神而不是金钱。这也是撰写这本书的宗旨和呈献这份描述硅的最初应用到在最新领域进展的报告的初衷。它意味着不但要学习过去而且要以开放的概念看待未来，而这一点不仅限于硅。

我们在世界范围寻求那些曾在或正在相关技术领域进行研发工作的同行作为作者或合作者参与了本书写作。而题目的选取不得不有所限制，以便查询。我们理解或许其他的编者会有不同的选题。生活本该如此！

最后，我们向所有对本书做出贡献的作者，对他们在编写本书过程中给予的帮助、理解与合作表示衷心感谢。我们还要感谢 W. Freiesleben 在联系作者方面所做的工作。

Paul Siffert

Eberhard F. Krimmel

慕尼黑斯特拉斯堡

2003 年 10 月

目 录

1 导论：各种形式的硅	1
1.1 引言	1
1.2 从 20 世纪 60 年代到 70 年代初：能带	2
1.3 20 世纪 70 年代：应用于硅的表面理论	6
1.4 20 世纪 80 年代：硅的结构能	8
1.5 20 世纪 90 年代：硅团簇与量子点的结构和电子性质	12
1.6 未来展望	15
参考文献	16

第一部分 半导体体硅晶体

2 硅：半导体材料	21
2.1 引言	21
2.2 早期历史	22
2.3 硅研究中的竞争与合作	24
2.4 最初的器件应用	29
2.5 MOS 技术和集成	30
2.6 结论	33
参考文献	36
3 硅：一个工业奇迹	37
3.1 引言	37
3.2 主要制程	37
3.3 硅材料生产工艺	38
参考文献	39

第二部分 多晶硅

4 电子器件用多晶硅薄膜	43
4.1 引言	43

4.2 多晶硅薄膜分类	44
4.3 多晶硅生长和微晶结构	45
4.3.1 CVD 多晶硅	46
4.3.2 非晶硅晶化的多晶硅	52
4.3.3 CVD 多晶硅晶界化学	54
4.3.4 多晶硅的掺杂	55
4.4 多晶硅的电性能	56
4.5 结论	59
参考文献	60
5 光伏用硅	64
5.1 引言	64
5.2 光伏用硅材料	65
5.2.1 不同生产工艺的历史与现状	66
5.2.2 薄膜沉积工艺	68
5.3 光伏硅的输运特性	71
5.3.1 缺陷及杂质对硅输运性质的影响	71
5.3.2 吸除改善材料性能	72
5.4 硅太阳电池	74
5.4.1 硅太阳电池技术与其他技术的比较	74
5.4.2 多晶硅太阳电池技术	75
5.5 结论	76
参考文献	77

第三部分 外延、薄膜和多孔层

6 分子束外延薄膜	83
6.1 设备原理和生长机理	83
6.2 历史概述	86
6.3 应变异质结构的稳定性	86
6.3.1 应变层的临界厚度	87
6.3.2 亚稳态薄膜生长	88
6.3.3 器件结构的加工和退火	89
6.4 硅 MBE 生长膜中掺杂剂的分布	89
6.4.1 掺杂问题	89

6.4.2 突变和 δ 型掺杂分布	91
6.5 半导体器件研究	92
6.5.1 异质结双极晶体管 (HBT)	93
6.5.2 SiGe MOSFET 和 MODFET	94
6.5.3 垂直 MOSFET 结构	95
6.6 若干研究重点介绍	97
6.6.1 级联激光器	97
6.6.2 表面结构	99
6.6.3 自组织和有序化	100
6.7 结论	104
参考文献	105
7 氢化非晶硅 (a-Si:H)	108
7.1 引言	108
7.2 a-Si 的制备和结构性质	109
7.3 a-Si:H 的电学性质	111
7.4 光致发光和光电导	114
7.5 亚稳态	116
7.6 a-Si 太阳能电池	116
参考文献	119
8 绝缘体上硅和多孔硅	121
8.1 绝缘体上硅	121
8.1.1 SOI MOS 晶体管的一般性质	121
8.1.2 SOI 应用	122
8.2 SOI 材料	123
8.2.1 早期的 SOI 材料	123
8.2.2 蓝宝石上硅 (silicon-on-sapphire, SOS)	123
8.2.3 SIMOX	125
8.2.4 晶片键合和背面腐蚀	129
8.2.5 智能剥离 (Smart-Cut [®])	133
8.2.6 Eltran [®]	137
8.3 结论	139
参考文献	140

第四部分 晶格缺陷

9 缺陷能谱学	149
9.1 引言	149
9.2 表征缺陷特性的基本参数	150
9.3 结空间电荷技术	152
9.3.1 电容技术	153
9.3.2 热测量技术	153
9.3.3 光学测量技术	157
9.4 其他光学测量方法	159
9.4.1 光热电离谱	159
9.4.2 傅里叶光电导纳谱	163
参考文献	164
10 硅及其在扫描探针显微术进展中的重大作用	166
10.1 引言	166
10.2 作为扫描探针显微镜基准的硅	166
10.3 作为 AFM 悬臂材料的硅	172
10.4 作为 STM 和 AFM 尖端的 Si(111)(7×7)表面	173
参考文献	176

第五部分 硅掺杂

11 缺陷、扩散、离子注入、再结晶和电介质	181
11.1 引言	181
11.2 高温扩散掺杂	182
11.3 缺陷与扩散机制	183
11.4 晶格缺陷、扩散与吸杂	184
11.5 离子注入	184
11.6 硅、氮、碳及电介质	187
11.7 注入分布	188
11.8 溅射和分布	190
11.9 辐照缺陷与态、表面态以及界面态	190
11.10 离子注入样品的热处理	192

11.10.1 炉退火	192
11.10.2 电子束、激光束与快速热处理	193
11.11 结论	197
参考文献	198
12 硅的中子嬗变掺杂 (NTD)	201
12.1 引言	201
12.2 传统的磷掺杂法	201
12.3 中子辐照磷掺杂	203
12.3.1 发展历史	203
12.3.2 掺杂反应	203
12.3.3 副反应	204
12.3.4 辐照硅的放射性	205
12.3.5 晶体缺陷的退火	205
12.3.6 硅掺杂的技术实现	207
12.4 展望	208
参考文献	209
 第六部分 某些杂质的作用	
13 硅中的过渡金属杂质	213
13.1 引言	213
13.2 扩散和固溶度	214
13.3 电活性	218
13.4 杂质工程	221
13.4.1 吸杂	221
13.4.2 痕量检测	222
13.4.3 其他工程问题	223
13.5 结论	223
参考文献	224
14 氢	227
14.1 引言	227
14.2 氢原子和分子	228

14.3 受主钝化	233
14.4 施主钝化	237
14.5 过渡金属-氢复合物	241
14.6 结论	244
参考文献	245

第七部分 器 件

15 半导体功率器件	257
15.1 引言	257
15.1.1 历史	257
15.1.2 半导体功率器件的要求	259
15.2 二极管	262
15.2.1 截止电压（反向或阻断态）	262
15.2.2 导通态（正向）	265
15.2.3 动态性能	268
15.2.4 发展趋势	270
15.3 晶闸管	271
15.3.1 基本特性	271
15.3.2 截止电压	273
15.3.3 导通态	274
15.3.4 动态性能	275
15.3.5 发展趋势	277
15.4 GTO（门极关断晶闸管）	277
15.4.1 基本特性	277
15.4.2 动态性能	278
15.4.3 发展趋势	279
15.5 双极晶体管	279
15.5.1 基本特性	279
15.5.2 导通态	280
15.5.3 截止电压	281
15.5.4 动态性能	281
15.5.5 发展趋势	282
15.6 MOS 晶体管（金属-氧化物-硅晶体管）	283
15.6.1 基本特性	283

15.6.2	导通态	284
15.6.3	动态性能	286
15.6.4	发展趋势	289
15.7	IGBT（绝缘栅双极晶体管）	290
15.7.1	基本特性	290
15.7.2	导通态	292
15.7.3	截止电压	294
15.7.4	动态性能	294
15.7.5	发展趋势	296
15.8	结论	297
	参考文献	298
16	补偿器件突破硅的极限	300
16.1	引言	300
16.2	当今的高压器件概念和实现补偿原理的方法	301
16.3	制备技术与挑战	305
16.4	补偿器件特征	308
16.5	对典型功率 MOSFET 应用的影响	315
16.6	结论和展望	317
	参考文献	318
17	集成电路	320
17.1	引言	320
17.2	历史回顾	320
17.3	集成电路在全球经济中的重要性	321
17.4	市场约束	322
17.5	产品“功能”（Enablers）	324
17.6	集成能力	325
17.7	设计瓶颈	326
17.8	应用范围和产品系列	328
17.8.1	应用范围	328
17.8.2	产品系列变化	329
17.9	结论	330
	参考文献	331

18 硅纳电子学：下一个 20 年	332
18.1 引言	332
18.2 CMOS 规模扩展	332
18.3 50nm 以下的新型 MOSFET	334
18.3.1 应变 SiGe	334
18.3.2 应变硅	337
18.3.3 纵向晶体管	338
18.3.4 部分耗尽和全耗尽 SOI	339
18.3.5 双栅晶体管	341
18.4 FinFET 存储单元	344
18.5 Si MOSFET 的极限	346
18.6 新器件	348
18.6.1 单电子晶体管	348
18.6.2 分子器件	350
18.6.3 碳纳米管	350
18.7 展望	351
参考文献	352
19 硅纳米光刻技术	355
19.1 引言	355
19.2 光学光刻	356
19.3 下一代光刻技术	358
19.4 电子束光刻	361
19.5 纳米压印光刻技术	364
19.6 接近式探针光刻技术	366
19.7 结论	367
参考文献	368
20 硅传感器	370
20.1 引言	370
20.2 “化学”传感器	370
20.3 生物传感器	372
20.4 “物理”传感器	373
20.5 新思路和发展趋势	373

参考文献	374
------------	-----

第八部分 对硅的补充：化合物半导体

21 化合物半导体	379
21.1 引言	379
21.2 走向成功的艰难历程	379
21.3 III ~ V 族化合物的性质	382
21.4 III ~ V 族基器件、器件工艺及对衬底的要求	384
21.5 GaAs：从材料合成到晶片加工	387
21.5.1 基本考虑	387
21.5.2 GaAs 合成	393
21.5.3 晶体生长	395
21.5.4 热处理	399
21.5.5 晶体评价	400
21.5.6 晶片加工	405
21.6 GaAs 和 III ~ V 族化合物的发展前景	407
参考文献	408

第九部分 新的研究领域

22 SiGe 异质结电子自旋量子计算机	417
22.1 引言	417
22.2 QC 的器件物理问题和预期性能	418
22.3 采用 SiGe 电子自旋运行的 QC	419
22.4 其他方案	423
22.4.1 纯硅量子点	423
22.4.2 GaAs 和 CdTe 量子点	425
22.5 结论	425
参考文献	426
23 碳纳米管在微电子学中的应用	428
23.1 引言	428
23.2 纳米管的制备	430

23.3	碳纳米管的互联	430
23.4	碳纳米管晶体管和电路	432
23.5	CNTFET 模拟和垂直 CNTFET 概念	433
23.6	结论	436
	参考文献	436
24	制造情境智能系统	438
24.1	引言	438
24.2	硅的作用	440
24.2.1	模块计算平台	440
24.2.2	微机电系统	441
24.2.3	新型硅形状因子	442
24.3	情境智能: 开发方法	442
24.4	新的计算方案和系统	443
24.4.1	“消失的计算机”	444
24.4.2	“外联件”	444
24.5	新颖先进的集成技术	445
24.5.1	智能种子计划	445
24.5.2	三维封装技术	447
24.5.3	智能种子的三维封装	448
24.6	传感器和驱动器用新形式的硅材料	450
24.6.1	纤维计算技术	450
24.6.2	硅纤维的机械设计	451
24.6.3	纤维的制备	451
24.6.4	机电测试	453
24.6.5	有源器件电路设计	454
24.6.6	有源器件电路的制造	455
24.6.7	硅纤维电路的测试	456
24.6.8	未来硅纤维的发展目标	456
24.7	结论	457
	参考文献	458
25	大脑半导体	461
25.1	引言	461
25.2	离子-电子界面	461