



# 半导体器件可靠性物理

高光勃 李学信 编著

科学出版社

1987

## 内 容 简 介

本书重点阐述了发生在半导体器件内部的，导致器件失效的各种物理及化学效应，亦即失效机理。全书共八章，前二章简要地叙述了半导体器件的工艺结构、参数及温度特性；后六章分别论述了热与热电反馈效应、界面效应、薄膜的高电流密度效应（电徙动）、静电效应、辐射效应以及化学和电化学效应（湿度效应）。对于各种器件（包括双极型器件、砷化镓场效应器件、CMOS、LSI及VLSI）的失效机理，也分别在有关章节中予以阐述。

本书可供从事半导体器件及集成电路设计、制造与应用的科研人员与工程技术人员阅读，也可作为大专院校有关专业高年级学生和研究生的教学参考书。

## 半导体器件可靠性物理

高光渤 李学信 编著

责任编辑 魏 玲

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1987 年 11 月 第 一 版 开本：787 × 1092 1/32

1987 年 11 月 第 一 次 印 刷 印张：19 1/4 插页：1

印数：0001—2,600 字数：438,000

统一书号：5031.879

本社书号：4858.15-7

定价：4.65 元

## 序 言

半导体器件可靠性物理学(以下简称器件可靠性物理学)是六十年代后期崛起的一门新兴的边缘学科,目前尚处在不断发展和完善过程中。它是在半导体器件物理学、器件工艺学、材料学、化学、冶金学、电子学、环境工程学和系统工程学等多种学科基础上发展起来的。这门学科的任务在于研究器件的失效模式、探求器件的失效机理,并依据这些失效机理进行可靠性筛选、可靠性寿命试验、可靠性评价、生产中的质量控制、新产品的可靠性设计以及器件的正确使用。简言之,器件可靠性物理学主要是从发生在器件内部的各种物理效应的角度,从原子、分子运动的角度来研究如何提高半导体器件可靠性的一门学科。

那么,器件可靠性物理学与器件物理学的区别是什么呢?笔者认为,凡是外界对器件施加影响后(这些影响统称为应力,例如电应力、包括电压、电流、频率等;环境应力,包括温度、射线强度、湿度、冲击等),在器件内部产生的效应是可复原的,那么,这些问题就属于器件物理学研究的范畴。而在器件内部产生的效应是不能复原的,或者说,外部影响去除后,在器件内部留下了“痕迹”(宏观的或微观的),这些痕迹可能导致器件特性的退化,也可能在器件内部引入了潜在的缺陷,与这种不可复原效应有关的问题就属于器件可靠性物理学研究的范畴。

作一个比喻,若器件物理学相当于材料科学中的弹性力学,那么器件可靠性物理学就相当于塑性力学或断裂力学。

器件物理学仅仅研究  $t=0$  时刻器件的特性，而器件可靠性物理学要研究整个器件寿命期内器件的特性。

从研究范围来讲，器件物理学主要研究器件的心脏：芯片内部发生的物理效应。而器件可靠性物理学，不仅研究芯片，而且研究器件的内外引线和封装，总之，是研究器件的整体。

那么，这门边缘学科是如何产生的呢？它的产生同其他边缘性学科（例如，环境工程学，系统工程学，生物工程学）一样，是科学技术发展的必然。随着电子系统的发展，其复杂性和可靠性成了尖锐的矛盾。系统越复杂，所用元器件越多，失效的概率就越大，即可靠性越不易保证。往往价值百万、千万乃至上亿美元的电子系统，因价值几美元的器件失效而全部化为灰烬，造成无法挽回的政治和经济损失。据报道，1957年美国先锋号卫星因一个价值仅两美元的器件失效，造成价值220万美元的卫星原地坠毁。1980年美国克罗拉多州北美防空司令部的预警系统的信息处理计算机，因一块集成电路失效而发出假核警报，引起一片慌乱。世界各国在导弹和航天发展史上，这样的例子屡见不鲜。真可谓“千里长堤，溃于蚁穴”。

由于上述矛盾，又导致了一个国家军事预算中购置新电子装备的开支与旧有电子装备的维修费之间的矛盾，四十年代末期，美国通过五年调查得出结论，设备的维修费大概是设备购买费的十倍。在美国1974年的军事开支中，电子装备的维修费达50亿美元，占总维修费的75%以上。

为了解决上述诸矛盾，在美国以罗姆（ROME）航空发展中心为代表，首先着手现场失效器件的失效分析，并于1962年发起召开了第一届国际电子学失效物理讨论会。1967年从第六届开始，由IEEE（电子电气工程师学会）参与并

共同举办会议，易名为“可靠性物理年会”。这样，一门边缘学科——“可靠性物理学”便应运而生了。

可以说，器件可靠性物理学是可靠性工程学的基础，是微电子学发展的保证，是新器件、新工艺诞生的助产婆。

本书是根据作者1978年度所编写的研究生教材扩展补充和修改而成，重点在于深入阐述发生在器件内部的、导致器件失效的各种物理和化学效应，亦即失效机理。其中包括热与热电反馈效应、界面效应、薄膜的高电流密度效应（电徙动）、静电效应、辐射效应以及化学和电化效应（湿度效应）。对于各种器件（包括双极型器件、砷化镓场效应器件、CMOS、LSI及VLSI）的失效机理，也分别在有关章节予以阐述。

本书是在假定读者已具有半导体器件物理专业大学本科水平的基础上写成的，所以不涉及半导体器件的基本理论。书中对问题的论述力求简捷，有针对性，突出物理概念，避免繁琐的数学推导。

考虑到许多从事器件研制和生产的工程技术人员需要，本书第一、二两章简要地叙述了器件的工艺结构、参数及温度特性，作为后面章节的基础。

鉴于失效分析技术、可靠性试验技术以及质量控制等方面的问题已有不少专著，所以本书不再重复。至于器件可靠性设计，虽有一些研究和报道，但多属于专利范畴，同时，目前还很不成熟，本书不作专门论述。但其有关内容也部分地包含在有关章节中。

本书第一、三、四、五、六章由高光渤执笔，二、七、八章由李学信执笔。本书的编写过程中，曾得到清华大学李志坚教授，电子工业部可靠性与环境试验研究所吕钟瑜高级工程师，航天工业部708所何国伟高级工程师、北京工业大

学张德有教授、航天工业部 771 所邓永孝副研究员的支持和鼓励。清华大学微电子学研究所南德恒教授在百忙中审阅了全部书稿，提出了许多中肯、有价值的修改意见。在本书的编写过程中，还得到了李维六、曹予和、董缙、钱襄等同志的帮助，桂翔同志也协助作了许多工作，在此一并表示感谢。

本书在编写过程中，由于没能找到一本从体系上可以借鉴的参考书，加之本学科涉及面广、问题复杂，以及作者水平有限，所以在体系安排、内容取舍和理论深度等方面，虽经反复斟酌、多次修改，但作为系统地论述半导体器件可靠性物理学的初次尝试，难免有不妥甚至谬误之处，敬请读者批评指正。

作者

1985 年 7 月

# 目 录

第一章 半导体器件的结构、制造工艺及可靠性	1
1.1 硅平面工艺及其缺陷	1
1.1.1 外延	2
1.1.2 热氧化	6
1.1.3 光刻	10
1.1.4 扩散	12
1.1.5 金属化	18
1.1.6 离子注入	20
1.1.7 后道工序	23
1.2 半导体器件的结构	27
参考文献	38
第二章 半导体器件参数及其温度效应	39
2.1 半导体参数	39
2.1.1 禁带宽度 $E_g$	39
2.1.2 本征载流子浓度 $n_i$	40
2.1.3 漂移迁移率 $\mu$	41
2.1.4 载流子的扩散系数 $D$	46
2.1.5 热导率 $\kappa$	48
2.1.6 少数载流子寿命 $\tau$	49
2.2 半导体的重掺杂效应	52
2.2.1 重掺杂引起禁带宽度变窄	52
2.2.2 掺杂浓度对费米能级的影响	56
2.2.3 重掺杂半导体中的本征载流子浓度	57
2.2.4 重掺杂半导体中的少数载流子寿命 $\tau$	58
2.3 双极型器件参数	59



2.3.1	pn结反向电流 $I_R$ .....	59
2.3.2	pn结正向电流和电压.....	62
2.3.3	晶体管发射极电流.....	64
2.3.4	晶体管的集电极电流.....	65
2.3.5	晶体管的基极电流.....	65
2.3.6	电流增益.....	67
2.3.7	pn结的击穿电压.....	77
2.3.8	晶体管的击穿电压.....	80
2.3.9	晶体管的饱和压降 $V_{CES}$ .....	82
2.3.10	晶体管的交流参数.....	83
2.4	MOS场效应器件.....	90
2.4.1	有效迁移率 $\mu_{eff}$ .....	90
2.4.2	阈值电压 $V_T$ .....	93
2.4.3	跨导 $g_m$ .....	95
2.4.4	最高工作频率 $f_m$ .....	96
2.5	肖特基势垒二极管.....	97
2.6	半导体器件的热噪声.....	100
	参考文献.....	102
第三章	热与热电反馈效应.....	106
3.1	热量的传递.....	106
3.2	芯片温度场.....	108
3.2.1	热传导方程.....	109
3.2.2	稳态温度场.....	114
3.2.3	热传导方程的数值求解.....	122
3.3	热阻.....	126
3.3.1	热阻的定义.....	126
3.3.2	热阻的计算.....	131
3.3.3	热阻的测试.....	139
3.3.4	瞬态热阻.....	144
3.3.5	热阻的温度关系.....	150

3.3.6	接触热阻	151
3.4	热电反馈效应	153
3.4.1	E-B折回特性	153
3.4.2	热稳定因子	157
3.4.3	稳定热斑	161
3.4.4	热稳定因子的修正	166
3.4.5	双单元功率晶体管的热不稳定性	167
3.5	二次击穿	170
3.5.1	概述	170
3.5.2	双极型器件产生二次击穿的机理	172
3.5.3	雪崩注入理论的定性描述	175
3.5.4	发射极电流夹紧时电流沿发射结的非均匀分布	177
3.5.5	在感性负载下晶体管中二维非等温载流子流	181
3.5.6	MOS器件的二次击穿	189
3.5.7	CMOS集成电路的寄生可控硅效应	197
3.6	安全工作区	203
3.6.1	正偏直流安全工作区的定义	204
3.6.2	关于安全工作区的几点讨论	208
3.6.3	功率MOS场效应晶体管的安全工作区	212
	参考文献	215
第四章	界面效应	219
4.1	硅-二氧化硅界面	219
4.1.1	氧化层电荷	220
4.1.2	可动离子电荷对器件可靠性的影响	225
4.1.3	界面陷阱电荷 $Q_{it}$ 对器件可靠性的影响	228
4.1.4	热载流子注入效应	230
4.1.5	钝化	245

4.2	铝-二氧化硅界面	264
4.2.1	二氧化硅薄膜的击穿机理	265
4.2.2	与时间相关的介质击穿	270
4.2.3	热生长薄二氧化硅膜可靠性的改进	282
4.2.4	铝与二氧化硅的化学反应	285
4.2.5	铝金属化表面的再结构	286
4.3	铝-硅界面	291
4.3.1	硅向铝中的固态溶解	291
4.3.2	硅在铝中的电迁徙	295
4.3.3	铝在硅中的热电迁徙	295
4.3.4	防止铝-硅界面退化的措施	301
4.3.5	铝-多晶硅界面	303
4.3.6	铝-硅或铝-多晶硅界面引起的器件失效模式	306
4.4	金属间界面	314
4.4.1	金的多层金属化系统	314
4.4.2	金属硅化物	317
4.4.3	金-铝界面	322
4.5	芯片焊接界面	326
4.5.1	天然氧化物的影响	327
4.5.2	合金局部穿透	329
4.5.3	焊接层的热疲劳	329
	参考文献	336
<b>第五章 电徙动</b>		<b>340</b>
5.1	引言	340
5.2	电徙动物理	341
5.2.1	金属薄膜的缺陷和扩散	341
5.2.2	电徙动的离子流密度	346
5.2.3	离子流散度	349
5.2.4	电徙动平均失效时间MTF	354

5.3	金属薄膜的热效应 .....	358
5.3.1	完整金属薄膜稳态下的温度分布 .....	359
5.3.2	金属薄膜裂痕的影响 .....	362
5.4	晶粒尺寸和几何形状效应 .....	369
5.5	介质覆盖效应 .....	375
5.5.1	介质覆盖的试验结果述评 .....	376
5.5.2	介质覆盖的表面抑制与压强效应 .....	379
5.5.3	介质覆盖的热沉效应 .....	380
5.6	合金效应 .....	388
5.6.1	铝-铜合金 .....	388
5.6.2	铝-硅合金 .....	393
5.6.3	铝-铜-硅合金 .....	397
5.7	脉冲电流下的电徙动 .....	401
5.8	超大规模集成电路金属化的电徙动 .....	404
5.8.1	超大规模集成电路的尺度效果 .....	404
5.8.2	超大规模集成电路中金属薄膜电徙动的 特点 .....	407
5.8.3	超大规模集成电路中铝合金膜的 电徙动 .....	409
5.9	微波功率晶体管的电徙动 .....	414
5.9.1	与试验金属薄膜的差异 .....	415
5.9.2	电徙动的试验研究 .....	417
5.9.3	金铝之争 .....	421
5.10	多晶硅薄膜与镍铬薄膜的电徙动 .....	424
5.10.1	多晶硅薄膜的电徙动 .....	424
5.10.2	镍铬电阻膜的电徙动 .....	426
5.11	小结 .....	428
	参考文献 .....	431
第六章	静电效应 .....	436
6.1	静电的产生和放电 .....	436
6.1.1	静电的产生 .....	436

6.1.2	静电源	438
6.1.3	静电放电	439
6.2	静电损伤模型	441
6.2.1	荷电人体的静电放电模型	442
6.2.2	荷电器件的静电放电模型	453
6.2.3	场感应静电放电模型	457
6.3	静电损伤的失效模式	458
6.3.1	突发性完全失效	459
6.3.2	潜在性失效	464
6.4	静电敏感性	466
6.5	静电保护	472
6.5.1	MOS 器件的栅保护	472
6.5.2	双极型器件的静电防护	482
6.5.3	其他的防静电措施	483
	参考文献	485
<b>第七章</b>	<b>辐射效应</b>	<b>487</b>
7.1	辐射环境和材料的辐射效应	487
7.1.1	辐射环境	487
7.1.2	电离辐射效应	490
7.1.3	位移辐射效应	491
7.1.4	电磁脉冲	493
7.1.5	热辐射及其他效应	493
7.2	双极型半导体器件的辐射效应	494
7.2.1	二极管的辐射效应	494
7.2.2	晶体管的辐射效应	497
7.2.3	可控硅整流器的辐射效应	506
7.2.4	太阳能电池	507
7.3	双极型集成电路的辐射效应	509
7.3.1	电离辐射效应	509
7.3.2	中子损伤效应	511
7.3.3	双极型器件的电磁脉冲效应	513

7.4	双极型器件的核加固 .....	514
7.4.1	双极型晶体管的核加固 .....	515
7.4.2	双极型集成电路的核加固 .....	516
7.5	场效应器件的辐射效应 .....	520
7.5.1	结型场效应晶体管的辐射效应 .....	521
7.5.2	MOS 场效应晶体管的辐射效应 .....	522
7.5.3	MOS 集成电路的辐射效应 .....	531
7.6	大规模集成电路和超大规模集成电路的软误差 (SER) 效应——封装材料 $\alpha$ 射线的影响 .....	535
7.6.1	$\alpha$ 射线造成的软误差机理 .....	536
7.6.2	影响软误差率的因素 .....	540
7.6.3	降低软误差率的措施 .....	545
7.7	MOS 器件的核加固 .....	547
	参考文献 .....	554
<b>第八章 湿度效应</b> .....		<b>558</b>
8.1	电化学腐蚀 .....	558
8.1.1	电化学概念 .....	559
8.1.2	半导体器件中的腐蚀电池 .....	563
8.1.3	柯伐封装引线的电化学腐蚀 .....	567
8.1.4	铝金属化的腐蚀 .....	570
8.2	塑料封装的可靠性 .....	575
8.2.1	封装树脂中的杂质 .....	576
8.2.2	封装树脂的吸潮性 .....	579
8.2.3	封装树脂对器件特性的影响 .....	583
8.2.4	温度、湿度、偏压加速寿命试验 .....	585
	参考文献 .....	590
<b>主要符号表</b> .....		<b>592</b>

# 第一章 半导体器件的结构、制造工艺及可靠性

本章将半导体器件作为一个系统，论述了它的结构、制造工艺及过程缺陷对其可靠性的影响。

## 1.1 硅平面工艺及其缺陷<sup>[1-3]</sup>

目前，多数硅器件，无论是双极型器件，还是场效应器件，都是采用平面工艺制造的。其所以被称为平面工艺，是因为整个器件有源区都是在硅片上表面平面内制成的。这一表面距表面仅有几微米或更短的距离，而硅片大部分厚度（100—250 $\mu\text{m}$ ）仅起机械支承作用。

平面工艺起源于1960年，它包括外延、氧化、光刻、扩散、金属化、烧结、键合及封装等工艺，依据这些工艺的排列组合，采用不同的光刻掩膜，便可以制出性能各异的多种半导体器件。

器件制造过程中，必须进行各种加工。其中包括机械加工（硅片的切、磨、抛，引线的焊接等）、化学加工（硅的外延生长、 $\text{SiO}_2$ 的生长与腐蚀、引线的电镀等）、物理加工（杂质的热扩散、离子注入、溅射、蒸发等）。在这些加工过程中，不可避免地要引入一些缺陷。所谓缺陷，就是指那些与理想结构发生偏差的区域。

在硅平面器件中，除了一般晶体结构的点、线和面缺陷外，尚有硅平面器件所特有的工艺缺陷。在器件可靠性物理

学中，习惯于将这种缺陷分为质量缺陷 (quality defect) 与潜在缺陷 (latent defect) 两类。凡是用一般质量控制的手段，而不是用对器件施加应力的试验程序就可以检查出来的缺陷，都称为质量缺陷。而用一般质量控制程序检查不出来的，需要对器件施加应力<sup>1)</sup>使缺陷激活，导致器件失效，在失效蔓延的情况下才能检查出来的缺陷则称为潜在缺陷。简言之，只有靠应力激活的缺陷才叫潜在缺陷。正是这些潜在缺陷的相互作用，在不同应力下的不同激活才导致了半导体器件多种复杂的失效模式，也构成了半导体器件可靠性物理学的主要研究内容。

本章首先简要地叙述硅平面工艺的原理，并在此基础上讲述工艺缺陷及其对器件可靠性的影响。

### 1.1.1 外延

所谓外延，就是使原子有规则地排列在单晶衬底上，其所形成的薄膜晶格结构恰是衬底晶格结构的延续。在外延过程中可以掺杂，可在重掺杂衬底上形成轻掺杂区或反之，也可以在外延层与衬底间形成pn结。

目前有四种外延方法：气相外延 (VPE)、液相外延 (LPE)、金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 及分子束外延 (MBE)。硅平面工艺主要采用气相外延，而砷化镓异质结往往采用液相外延、分子束外延和金属有机物化学气相沉积外延。分子束外延是一种高真空半导体外延生长法，由贝尔实验室开创，此法优点是，可获得任意掺杂的极薄的

---

1) 所谓应力是指某一瞬时对器件施加的全部或部分的影响。这些应力有：温度 ( $T$ )、电压 ( $V$ )、电流 ( $I$ )、湿度 ( $H$ )、温度差 ( $\Delta T$ )、冲击力、离心力等。从广义上讲，时间 ( $t$ ) 也是一种应力。其中每个应力可视为一个应力矢量，诸应力矢量组成一个应力空间。



( $\sim 10 \text{ \AA}$ ) 优质单晶膜, 金属有机物化学汽相淀积外延法是一种常压、低温 ( $500^\circ\text{C}$  左右) 的外延生长法, 可控制  $50 \text{ \AA}$  外延层内的杂质浓度. 与分子束外延一样, 均可进行调制掺杂. 这两种方法主要用于 III-V 族化合物外延. 图 1.1 给出了硅气相外延的系统图.

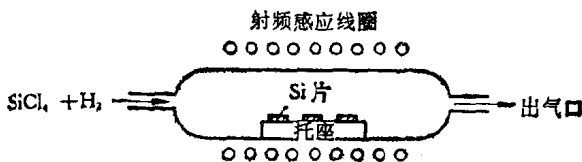
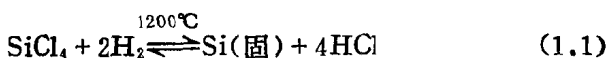


图 1.1 硅外延反应器

纯硅外延生长的基本化学反应是四氯化硅的氢还原:



注意, 这个反应是可逆的, 正向为硅的薄膜生长, 反向为硅的腐蚀.

为了获得一定杂质类型和浓度的外延层, 可在外延生长过程中把适当比例的 III 族或 V 族杂质加到气流中去. 通常有两种掺杂方法, 即溶液掺杂和气体掺杂, 掺杂剂则有  $\text{PCl}_3$ 、 $\text{POCl}_3$ 、 $\text{PH}_3$  及  $\text{AsH}_3$  (对 N 型掺杂) 和  $\text{B}_2\text{H}_6$  (对 P 型掺杂) 等. 在高温下这些掺杂剂分解, 磷原子或硼原子进入正在生长的硅晶格点阵之中.

影响外延薄膜生长速率的主要因素是温度. 例如, 采用四氯化硅氢还原法, 在  $1100^\circ\text{C}$  下, 生长速率小于  $0.1 \mu\text{m}/\text{min}$ , 而在  $1270^\circ\text{C}$  时, 便能以  $5 \mu\text{m}/\text{min}$  的速率生长出良好的晶体. 另外, 反应气体中  $\text{SiCl}_4$  的含量也影响薄膜的生长速率. 随着  $\text{SiCl}_4$  浓度的增加, 存在一个最大的生长速率, 过大的  $\text{SiCl}_4$  浓度反而会使生长速率降低, 甚至导致硅表面的腐蚀.