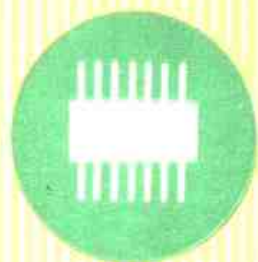


562242



半导体器件

可靠性技术

周南生 王绍菊 王万兴 译 张文敏 校



「日」安食恒雄 主编 松下电子工业株式会社 编 西安电子科技大学出版社

半导体器件可靠性技术

[日] 安食恒雄 主编
松下电子工业株式会社 编

周南生 王绍莉 王万兴 译
张文敏 校

西安电子科技大学出版社

1991

半導体デバイスの信頼性技術

監修 安食恒雄

日科技連出版社，1988

“陕新登字 010 号”

半导体器件可靠性技术

[日] 安食恒雄 主编

松下电子工业株式会社 编

周南生 王绍菊 王万兴 译

张文敏 校

责任编辑 梁家新

西安电子科技大学出版社出版发行

西安电子科技大学印刷厂印刷

各地新华书店经销

开本 850×1168 1/32 印张 11 16/32 字数 276 千字

1991 年 12 月第 1 版 1991 年 12 月第 1 次印刷 印数 1—1 500

ISBN 7-5606-0166-9/TM·0004 定价：7.15 元

译者的话

半导体器件具有体积小、耗电省、使用寿命长等优点，被广泛应用于各种电子系统中。随着超大规模集成电路技术的发展，已可将一个系统集成在一块半导体芯片上，装配密度增大，系统的组成日益复杂，其使用环境更加严酷。这样，复杂性与可靠性形成了尖锐的矛盾。系统越复杂，所用元器件越多，发生故障的概率就越大。往往价值百万、千万甚至上亿元的电子系统，因价值几元的器件失效而全部报废，造成无法挽回的政治影响和经济损失。因此半导体器件的可靠性问题已是关系到科学技术发展、国防建设的重要问题。

为了开展半导体器件可靠性方面的研究，将我国可靠性工作提高到一个新水平，西安电子科技大学微电子研究所曾两次主持召开中日国际电子产品可靠性研讨会。1988年9月以京都大学名誉教授三根久先生为团长的日本关西电子工业振兴中心访华团来西安参加了第二届研讨会。此后不久，访华团的越川清重先生即给我们寄来了刚出版的《半导体器件可靠性技术》一书。本书系统地论述了影响半导体分立器件和集成电路可靠性问题的各种因素及其解决办法，并对当前正在研究探讨的一些课题也作了介绍。为便于读者阅读，在前4章中增加了一些基础性的内容。第5章为分立器件的可靠性问题，第6章为集成电路器件的可靠性问题，这两章是全书的重点部分。我们认为，本书反映了当前国际上半导体器件可靠性技术的研究课题和最新的研究成果。为使我国从事半导体器件可靠性技术方面的研究人员能较快地了解这些最新

技术，促进我国半导体事业的发展，特将本书译成中文。

本书主要供半导体器件专业的高年级学生及研究生作教材，也可供有关的研究人员、工程技术人员和用户参考。

本书由周南牛教授翻译第 1、5 章，王绍菊讲师翻译第 2、6、7 章，王万兴副教授翻译第 3、4 章，由周南生统阅全稿。

张文敏副教授仔细地校订了全部译稿，并提出许多宝贵意见，在此表示感谢。

译者水平有限，错误和不当之处，欢迎读者批评指正。

译 者

1990 年 10 月

前 言

在日本，半导体产业从诞生到今天，已经经过了三十多年。最初，用于便携式收音机的锗晶体管、二极管，因其体积小、耗电省，所以在设备小型化上取得了成功，发生了划时代的改革。

半导体器件在原理上是无耗损器件，因而其寿命曾经被宣传为是半永久性的，但实际上除了寿命被认为是永久性的原材料和原理而外，由于其制造工艺上的很多原因，要制造寿命非常高的产品是极其困难的。原材料锗，因其表面的不稳定性和工作温度范围的限制等原因，已经被硅所取代。

不久晶体管发展为集成电路，以前所用的密封金属管壳和陶瓷管壳也向树脂封装发展。1987年，日本所生产的半导体器件中，树脂封装产品约占95%。

另一方面从制造工艺上看，最初生产半导体器件时以手工操作为主，而现在多半是自动化生产。在从事引线键合的年轻女性大量使用的时代，产品质量往往主要取决于操作者和工艺误差，因此把重点放在管理技术上的质量管理(QC)活动就活跃起来了。不久随着微处理机的出现，引线键合工艺也自动化了，年轻女工开始急剧减少。

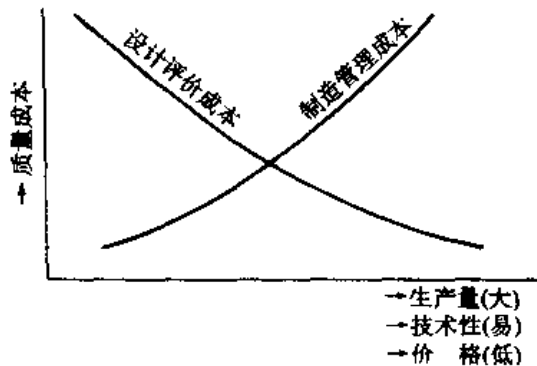
为了降低占价格大半的晶片的成本和提高集成的元件数，新出现的集成电路向小型化方向发展，这种小型化又与微细化联系在一起。按照小型化的规则，铝电极的宽度和MOS结构的沟道宽度每年都在变小。在尺寸为几 μm 时，稍微缩小一点对决定设计质量的可靠性没有多大影响，但是到了 $1\mu\text{m}$ (10^{-3}mm)左右，就可

以看到意想不到的故障模式和异常现象。如果工作电压不低于 5 V 标准工作电压，则电极间的电场与小型化程度成反比例急剧增大。如果电极面积变小，则在其上流过的电流密度与电极面积成反比例增大。电场、电流密度等各方面都在向容许量的极限接近。如果接近极限，则必须在物理性质上对其可能性进行研究。研究可能性是第一个课题，其误差便成为第二个课题。

质量管理，归根结底是误差状态管理。在微细化之前，必须向物理、结构的可能性进行挑战。如广义的全面质量管理 (TQC) 与全面经营管理有关一样，质量管理中的可靠性问题也不仅仅是只考虑时间的质量连续性问题，还必须深入研究材料、元器件等的物理、化学结构的可能性。

设计制造一种新产品是为了满足顾客的需要，因此制造者应考虑的第一点就是该产品的质量和功能是否达到了设计要求。

从半导体器件来看，以功能为主的质量评价 (qualification approval) 和能将器件制造出来的工艺能力 (process approval) 是最重要的工作。这些工作，特别是证实实现后者途径的工作，正是本书的主题——可靠性技术工作。



设计评价成本与制造管理成本

将设计时的评价成本与生产时的管理成本进行比较，结果如右上图所示。虽然是定性表示，但在此要强调的一点是，商品不同，质量成本的构成也是不同的。但是，现在半导体器件的难度又进一步增加，如同在低价格、高技术的 DRAM 见到的那样，对

评价费用和管理费用应该有同样的要求。

在本书中，首先讨论的基本问题是设计质量与制造质量，并对作为质量保证基础的分布、可靠性因素进行说明，在固有技术方面，对设计上尚存在的问题和今后采取的对策进行说明。因此，除设计技术工作者外，本书如果能对质量保证工作者或用户技术工作者有用的话，真是喜出望外了。

本书是在为可靠性技术工作者的教育而编写的教科书基础上修订面成，得到了松下电器产业（株）教育训练中心以及松下电子工业（株）半导体事业本部有关人士和质量技术部全体同仁的大力协助，对此表示衷心感谢。

最后，在本书的编辑过程中承蒙日科技连出版社编辑部山口忠夫、千田敬一及本公司质量技术部的熊田进、白川博幸等尽力帮助，在此一并表示感谢。

1988年2月

松下电子工业株式会社

半导体事业本部质量技术部长

安食恒雄

主编、执笔者一览

主编

安食恒雄(松下电子株式会社半导体事业本部质量技术部 部长)

执笔者(按五十音顺序)

安食恒雄(半导体事业本部质量技术部 部长)

熊田 进(半导体事业本部质量技术部质量技术科 科长)

白川博幸(半导体事业本部质量技术部质量技术科 组长)

杉本真生(半导体事业本部质量技术部可靠性技术Ⅰ科 科长)

辰马贤一郎(半导体事业本部质量技术部可靠性技术Ⅰ科 组长)

户谷明敬(半导体事业本部质量技术部质量技术科 主任)

通口 弘(半导体事业本部质量技术部可靠性技术Ⅱ科 科长)

水颐 智(半导体事业本部质量技术部可靠性技术Ⅱ科 组长)

宫城秀雄(半导体事业本部分立器件事业部质量管理科 科长)

若菜 晃(半导体事业本部分立器件事业部质量管理成员 参事)

和田哲明(半导体事业本部质量技术部可靠性技术Ⅰ科 组长)

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 半导体器件的性质 | 1 |
| 1.1 发展历史 | 1 |
| 1.2 两种载流子 | 2 |
| 1.3 高纯度的晶体——pn 结 | 4 |
| 1.4 表面的稳定化 | 4 |
| 1.5 对可靠性的期望 | 6 |
| 第 2 章 实际的质量保证 | 8 |
| 2.1 质量保证和可靠性 | 9 |
| 2.1.1 质量保证 | 9 |
| 2.1.2 初期质量与可靠性 | 10 |
| 2.1.3 可靠性的来源 | 11 |
| 2.1.4 可靠性的定义 | 13 |
| 2.1.5 可靠性的必要性 | 13 |
| 2.1.6 半导体的质量水平 | 14 |
| 2.2 质量保证程序 | 15 |
| 2.2.1 质量保证体系 | 15 |
| 2.2.2 新产品开发时的质量保证体制 | 15 |
| 2.2.3 批量制造工艺的质量保证体制 | 19 |
| 2.2.4 材料、部件的质量保证体制 | 19 |
| 2.2.5 成品的质量保证体制 | 20 |
| 第 3 章 可靠性评价的基础 | 22 |
| 3.1 可靠性试验 | 22 |
| 3.1.1 什么是可靠性试验 | 22 |

| | | |
|-------|-----------------------|----|
| 3.1.2 | 可靠性试验方法标准的种类 | 23 |
| 3.1.3 | 可靠性试验分类 | 24 |
| 3.1.4 | 可靠性试验的目的和内容 | 24 |
| 3.1.5 | 可靠性试验的计划和实施 | 25 |
| 3.1.6 | 可靠性试验的注意事项 | 27 |
| 3.1.7 | 可靠性的抽样检查 | 28 |
| 3.2 | 加速试验 | 32 |
| 3.2.1 | 什么是加速试验 | 32 |
| 3.2.2 | 加速试验的必要性 | 33 |
| 3.2.3 | 加速试验的基本思想 | 34 |
| 3.2.4 | 加速试验的种类 | 34 |
| 3.2.5 | 加速试验和故障机理的应用 | 35 |
| 3.2.6 | 由加速试验结果预测置信度 | 40 |
| 3.3 | 可靠性与分布 | 43 |
| 3.3.1 | 可靠性的概念 | 43 |
| 3.3.2 | 表示可靠性的尺度 | 43 |
| 3.3.3 | 半导体器件故障的产生 | 45 |
| 3.3.4 | 可靠性分析所需要的分布 | 48 |
| 3.3.5 | 故障的分布 | 55 |
| 3.3.6 | 置信极限的估计 | 57 |
| 3.4 | 威布尔概率纸的使用方法 | 61 |
| 3.4.1 | 威布尔概率纸的性质 | 62 |
| 3.4.2 | 威布尔概率纸的结构 | 62 |
| 3.4.3 | 威布尔概率纸的使用方法 | 63 |
| 3.4.4 | 由威布尔分析得到的改善 | 71 |
| 3.5 | 置信度预测 | 74 |
| 3.5.1 | 置信度预测的基本思想 | 74 |
| 3.5.2 | 国际数据交换制度(EXACT) | 75 |
| 3.5.3 | MIL-HDBK-217D | 76 |
| 第4章 | 可靠性因素与故障分析 | 78 |
| 4.1 | 可靠性因素和故障 | 78 |

| | | |
|------------|-----------------------------------|------------|
| 4.1.1 | 可靠性因素 | 78 |
| 4.1.2 | 故障机理和故障模型 | 82 |
| 4.1.3 | 筛选的意义和效果 | 91 |
| 4.2 | 故障分析 | 100 |
| 4.2.1 | 故障分析的必要性 | 100 |
| 4.2.2 | 用于故障分析的装置 | 100 |
| 4.2.3 | 故障分析程序 | 100 |
| 第5章 | 分立器件的可靠性问题 | 130 |
| 5.1 | 短路问题 | 130 |
| 5.1.1 | 热击穿 | 130 |
| 5.1.2 | 浪涌击穿 | 134 |
| 5.1.3 | 芯片裂纹 | 136 |
| 5.1.4 | 碰线 | 138 |
| 5.2 | 断线问题 | 139 |
| 5.2.1 | 紫斑 | 139 |
| 5.2.2 | 铝合阶断裂 | 141 |
| 5.2.3 | 散热用润滑油引起的断线 | 142 |
| 5.2.4 | 清洗引起的断线 | 144 |
| 5.2.5 | 引线腐蚀引起的断线 | 145 |
| 5.3 | 热阻 | 146 |
| 5.3.1 | 结温与热阻 | 147 |
| 5.3.2 | 热阻 $R_{th(j-c)}$ 与芯片表面温度的测量 | 147 |
| 5.3.3 | 焊接空洞 | 151 |
| 5.4 | 二次击穿(SB)与安全工作区(ASO) | 153 |
| 5.4.1 | 二次击穿(SB)特性 | 154 |
| 5.4.2 | 安全工作区(ASO) | 155 |
| 5.4.3 | 反向偏置安全工作区(R-ASO) | 157 |
| 5.5 | 热疲劳 | 161 |
| 5.5.1 | 热疲劳测量举例 | 162 |
| 5.5.2 | 热疲劳的改善 | 162 |

| | | |
|------------|---------------------------|------------|
| 5.6 | 银的电迁移 | 167 |
| 5.6.1 | 什么是电迁移 | 167 |
| 5.6.2 | 电迁移的加速条件 | 170 |
| 5.6.3 | 实验数据 | 171 |
| 5.6.4 | 电迁移举例 | 172 |
| 5.7 | DLD(暗线缺陷) | 174 |
| 5.7.1 | 发光机构 | 176 |
| 5.7.2 | 退化机构 | 177 |
| 5.7.3 | DLD 举例 | 178 |
| 第6章 | 集成电路器件的可靠性问题 | 182 |
| 6.1 | 热载流子 | 183 |
| 6.1.1 | 由热载流子引起的劣化 | 183 |
| 6.1.2 | 与热载流子劣化有关的因素 | 187 |
| 6.1.3 | 产品劣化举例 | 190 |
| 6.1.4 | 热载流子及其对策 | 192 |
| 6.2 | 氧化膜的经时击穿 | 194 |
| 6.2.1 | 氧化膜的经时击穿 | 195 |
| 6.2.2 | 老化筛选 | 196 |
| 6.2.3 | 氧化膜击穿的耐压分布 | 197 |
| 6.2.4 | 氧化膜的击穿电荷量 | 198 |
| 6.3 | 慢陷阱 | 199 |
| 6.3.1 | 慢陷阱的观测例子 | 199 |
| 6.3.2 | 慢陷阱的 C-V 特性分析 | 204 |
| 6.4 | 电迁移 | 206 |
| 6.4.1 | 半导体集成电路用的布线 | 206 |
| 6.4.2 | 电迁移现象 | 207 |
| 6.4.3 | 影响电迁移的因素 | 210 |
| 6.4.4 | 伴随微细化发展的电迁移课题 | 224 |
| 6.5 | 应力迁移 | 225 |
| 6.5.1 | 应力迁移现象 | 225 |

| | | |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 6.5.2 | 影响应力迁移的因素 | 229 |
| 6.5.3 | 故障机理 | 231 |
| 6.6 | 树脂封装管壳的耐湿性 | 233 |
| 6.6.1 | 水分浸入的路径 | 233 |
| 6.6.2 | 不同温湿度环境吸湿性的比较 | 236 |
| 6.6.3 | 耐湿性问题要点 | 238 |
| 6.6.4 | 由吸湿引起的 Al 布线腐蚀 | 239 |
| 6.6.5 | 由吸湿引起的电特性劣化 | 243 |
| 6.6.6 | 耐湿性的对策 | 246 |
| 6.6.7 | 耐湿性的评价方法 | 251 |
| 6.6.8 | 由湿度引起的故障加速性 | 253 |
| 6.6.9 | 不饱和和压力蒸煮试验 | 258 |
| 6.7 | 由热应力引起的可靠性问题 | 267 |
| 6.7.1 | 材料特性及特征 | 268 |
| 6.7.2 | 内热应力(初期应力) | 269 |
| 6.7.3 | 热应力的试验方法及其内容 | 271 |
| 6.7.4 | 由外部热应力(环境热应力)引起 的故障模式和机理 | 272 |
| 6.7.5 | 焊接组装热应力引起的故障模式与机理 | 285 |
| 6.7.6 | 发热疲劳与故障模式 | 292 |
| 6.8 | 静电破坏 | 295 |
| 6.8.1 | 什么是静电 | 295 |
| 6.8.2 | 静电破坏的模式和机理 | 296 |
| 6.8.3 | 静电破坏的试验方法 | 301 |
| 6.8.4 | 静电破坏的对策 | 302 |
| 6.9 | 闭锁效应 | 308 |
| 6.9.1 | 什么是闭锁 | 308 |
| 6.9.2 | 闭锁现象的机理 | 309 |
| 6.9.3 | 闭锁的发生模式 | 311 |
| 6.9.4 | 微细化与闭锁现象 | 312 |

| | | |
|------------|-------------------------------|------------|
| 6.9.5 | 闭锁现象的解决办法 | 312 |
| 6.9.6 | 闭锁的评估方法 | 314 |
| 6.10 | 软误差 | 318 |
| 6.10.1 | DRAM 中的软误差 | 319 |
| 6.10.2 | 软误差的测试方法 | 322 |
| 第7章 | 质量保证标准及认证制度 | 326 |
| 7.1 | 标准的意义 | 326 |
| 7.2 | 有关质量保证的国内外标准 | 327 |
| 7.2.1 | JIS 标准 | 327 |
| 7.2.2 | EIAJ 标准 | 330 |
| 7.2.3 | IEC 标准 | 331 |
| 7.2.4 | MIL 标准 | 333 |
| 7.2.5 | 其它标准 | 336 |
| 7.3 | IEC 电子部件质量认证制度(IECQ 制度) | 337 |
| | 参考文献 | 342 |

第 1 章 半导体器件的性质

1.1 发展历史

在现代电子设备中，不能设想没有半导体器件。半导体器件被称为“工业的食粮”，广泛应用于各个领域，因此提高半导体器件的性能、质量和可靠性，就成为工业的社会使命。

研究半导体器件的性质时，主要是研究分立器件晶体管、二极管和集成电路，其材料主要为超高纯无缺陷的硅单晶。最早生产的半导体器件是以锗单晶材料为主的分立半导体器件，但由于性能、可靠性和成本等原因，后来逐渐转移到以硅单晶材料为主的半导体器件上，现在砷化镓、磷化镓等化合物半导体正在形成独特的新领域。

以硅为主等半导体材料，是电导率介于良导体（大部分金属电阻率 $<10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ ）和绝缘体（陶瓷、树脂等电阻率 $>10^9\Omega\cdot\text{cm}$ ）之间的物质。虽然从 19 世纪后半期开始，已经对半导体进行了广泛的研究，但这些材料所呈现出的复杂性质，当时被认为是不可理解的。

氧化亚铜（ Cu_2O ）、硒作为半导体物质，从 20 世纪初到电子管盛行前后，一直用来做整流器。电子管发明以前，无线电通信初期使用的检波器叫做矿石检波器，采用不完整的晶体，现在叫做点接触二极管。后来，在检波器领域中使用真空二极管。三极管发明之后，具有放大作用的有源器件应用到电子技术中。随着

电子管技术的发展，无线电频率的应用扩大到高频范围，为了改善超短波范围的检波性能，固体检波器再次盛行起来。这就是采用良好的半导体单晶材料制成的晶体二极管。在1930~1940年间，进行了晶体二极管模拟真空二极管和相当于三极管的固体放大器件的各种试验。

1947年点接触锗晶体管的发明，促进了半导体器件的迅速发展。一般认为，晶体管是在用探针测量晶体二极管电极附近电位的实验过程中诞生的。接着，提出了结型晶体管理论，它成为双极型晶体管理论的基础，并且发明了由该理论所预见的合金结晶体管。这种晶体管是以锗材料为主的实用型器件，直到硅平面型晶体管出现以前，被长期生产和应用着。

1.2 两种载流子

半导体的特征，取决于电荷移动的性质。包括半导体在内，固体中的电荷可分为可动电荷和固定电荷两种。在金属中，运载电荷的是电子，在规则排列的金属离子中，电子自由运动。

每个硅原子具有4个价电子，与周围的4个硅原子共有价电子而互相结合。由于光和热的作用，价键被破坏，电子跑出来，它像金属中的自由电子一样，在晶体中运动。电子跑出之后，形成缺少1个电子的价键，该处成为带正电荷的空位，称之为空穴。这个键的空穴立即被相邻价键的电子所填充，而在相邻的价键上又产生了空穴，也就是说空穴能在晶体中运动。

离开价键在空间自由运动的电子与价键间自由运动的空穴成对产生，两者都参加导电。

如果自由电子进入有空穴的价键，则两者成对消失。若电子空穴对的产生与消失达到平衡，则电子空穴对密度为一确定值。室温下本征硅的电子空穴对密度为 10^{10}cm^{-3} 数量级(1.5