

现代半导体器件 可靠性理论与技术

黄桂生 王化周 编译
张德胜 顾 瑛 审校



電子工業出版社

现代半导体器件的可靠性 理论与技术

黄桂生 王化周 编译
张德胜 顾 瑛 审校

电子工业出版社

内 容 提 要

半导体器件的可靠性技术一直是半导体器件研究与生产领域中极为重要的技术。本书较为系统、全面地叙述了半导体器件可靠性的基础知识、可靠性的评价方法、失效机理与失效分析、半导体分立器件及集成电路的可靠性,以及半导体器件的抗辐射加固等课题。本书理论与实践相结合,对我国半导体器件的可靠性工作很有参考价值。

本书可供从事半导体器件研制与生产的技术人员、从事半导体器件可靠性工作的工程技术人员;可靠性管理人员,以及高等学校半导体器件可靠性专业师生参考。

现代半导体器件的可靠性理论与技术

黄桂生 王化周 编译

张德胜 顾 瑛 审校

责任编辑 郭延龄

电子工业出版社出版发行(北京市万寿路)

西北工业大学印刷厂印装

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 10.69 字数: 277 千字

1991年2月第1版 1991年2月第1次印刷

印数: 1500 册 定价: 6.9 元

ISBN7-5053-1370-3/TN·408

前 言

电子工业是工业现代化的重要标志之一。半导体工业是电子工业的基础，因此各国都非常重视半导体工业的发展。半导体工业中人们非常关心的一个问题就是半导体器件的可靠性，因为它直接关系到器件的成本、器件的质量、所用设备的可靠性以至企业的信誉。特别是高技术设备，如航空航天设备，其中的半导体器件是所应用设备的核心，半导体器件一旦失效，整个设备将不能工作，显然其损失是很沉重的。

我国的电子工业，特别是半导体工业的发展很快。集成电路的集成度越来越高，器件在微细化过程中，可靠性问题也变得日益突出。因此，现在，可靠性理论与技术作为一种学科，一门实用技术，已成为广大从事半导体科技人员的重要研究项目之一。决策与管理部门也日益重视半导体器件可靠性工作。为此，我们在机械电子部军工司有关部门的支持下编译了《现代半导体器件的可靠性理论与技术》一书。本书以日文版《半导体器件的可靠性技术》为基础，综合编译了现在人们比较关心的半导体器件可靠性理论与技术有关资料，本书内容较新，阐述简明、系统，可供从事半导体器件生产、使用及教学等领域的科技人员参考，也可作大专院校有关专业学生的参考书。

本书第1章至第4章、第6章由黄桂生编译，第5章及附录由王化周编译、第2章第6节由张德胜编写。全书由张德胜、顾瑛审校。在编译出版过程中，西安电子科技大学庄明夫、赖金福给予了大力帮助。

由于编译者水平有限，错误及不当之处肯定不少，恳请读者指正。

编译者

目 录

第 1 章	半导体器件的性质与质量保证	(1)
1.1	半导体器件的性质	(1)
1.2	质量保证	(7)
第 2 章	可靠性评价	(20)
2.1	可靠性试验	(20)
2.2	加速试验	(30)
2.3	可靠性和失效分布	(40)
2.4	威布尔概率纸的用法	(59)
2.5	可靠度预测	(72)
2.6	可靠性评价的新课题	(75)
第 3 章	可靠性因素及失效分析	(84)
3.1	可靠性因素及失效机理、失效模型	(84)
3.2	筛选	(96)
3.3	失效分析程序与装置	(105)
第 4 章	半导体分立器件的可靠性	(134)
4.1	短路失效	(134)
4.2	开路失效	(143)
4.3	热阻	(150)
4.4	二次击穿(SB)和安全工作区(ASO)	(156)
4.5	热疲劳	(164)
4.6	银的迁移	(171)
4.7	外引线断裂	(178)
4.8	DLD(暗线缺陷)	(179)
第 5 章	集成电路器件的可靠性	(185)

5.1	热载流子	(186)
5.2	氧化膜的时效击穿	(196)
5.3	慢俘获	(202)
5.4	电迁移	(209)
5.5	应力迁移	(227)
5.6	树脂密封封装的耐潮性	(234)
5.7	由热应力决定的可靠性	(267)
5.8	静电击穿	(294)
5.9	门锁现象	(306)
5.10	软错误	(317)
第 6 章	半导体器件的抗辐射加固	(323)
6.1	辐射引起的器件损伤的种类	(323)
6.2	稳定的电离辐射引起的损伤及加固方法	(324)
6.3	单个高能粒子引起的损伤及加固方法	(331)
附 录	质量保证标准和质量认证	(334)

第 1 章 半导体器件的性质 与质量保证

1.1 半导体器件的性质

半导体器件已成为现代电子设备中不可缺少的器件，其应用领域非常广阔。因此，提高并保持它的性能、质量和可靠性，已成为现代工业的重要问题。

半导体器件主要是指以超纯无缺陷单晶硅为主要材料的晶体管、二极管分立半导体器件和集成电路。早期的半导体器件是以锗单晶为主要材料的分立半导体器件。但由于性能、可靠性和成本方面的原因后来转向了硅器件。而现在，砷化镓等化合物半导体具有优异的独特性能，已形成新的半导体器件领域。

以硅等为主要材料的半导体是一种导电率处于良导体（大部分金属的电阻率 $< 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ）和绝缘体（陶瓷、树脂等，电阻率 $> 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ ）中间的物质，从十九世纪后半期开始成为研究的热点，但当时这类物质所呈现的物理性质被认为是不可理解的。

氧化铜（ Cu_2O ）、硒是半导体物质，从二十世纪初到电子管成熟期前后，作整流器使用，在电子管发明之前，无线通信早期使用的检波器，是称为矿石检波器的不纯晶体。随着三极管的发明，电子技术才得到有放大作用（有源）的器件。和电子管技术的发展相呼应，无线电频率的应用也进一步扩展到高频区，因而要求改善超短波中的检波性能，固体检波器又重新活跃起来。这种器件就是采用结晶性能好的半导体材料制成的晶体二极管。

使半导体器件迅速发展的是锗点触型三极管的发明（1947年）。在利用探针测量晶体二极管电极附近电位的基础实验过程

中诞生了晶体管，接着提出了成为现在的双极晶体管基础的结型晶体管理论，基于这种理论发明了合金结型晶体管。这种合金结型晶体管是以锗为主要材料的实用器件，直到出现硅平面晶体管之前，它生产和使用了很长一段时间。

1.1.1 半导体内部结构及导电特性

半导体的特征在于电荷的移动。包括半导体在内，固体中的电荷可分为能移动的电荷与不能移动的电荷。金属中搬运电荷的是电子。电子在按规律整齐排列的金属离子中间自由运动。

硅原子有 4 个价电子，分别和周围的 4 个硅原子的价电子形成共价键，由于光或热的作用，这个共价键被破坏，电子挣脱出去，就象金属中的自由电子那样在晶体中运动。另一方面，这个电子脱离共价键后就产生了缺少电子的键。该处留下带有正电荷的空位，这个空位称为空穴。可是，这个键的空穴立即会由相邻键的电子填补。于是相邻键还要产生空穴。这样，空穴就会在晶体中运动。

脱离共价键在空间自由运动的电子，和从键到键自由运动下去的空穴（电子挣脱后的空位）成对产生，两者都参与导电。

自由电子如果进入有空穴的键中，两者就成对消失。电子和空穴对的产生和消失如果达到平衡，则电子空穴对的数目保持一定值，纯硅在室温下为 10^{10}cm^{-3} 左右 ($1.5 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$)。它与硅原子的数目相比，只是极少一部分参与导电。

将硅原子的一部分由其它元素的原子替换就可以调节电子数和空穴数。

在纯硅中可掺入硼、硼等三价原子。当掺入这种极微量的杂质原子后，因为它与周围的硅晶体原子结成共价键，就缺少一个价电子。它必定从别的硅原子那里夺取价电子结成共价键。被夺走价电子的硅原子还要从其它硅原子补充价电子。缺少电子的键（空穴）就会在晶体中运动。在本征硅中才产生少量空穴，每个掺入的杂质原子可产生一个空穴。这称为 P 型半导体。掺入

的硼等原子称为受主，是接受电子的意思。受主原子和硅原子结成共价键的位置，使用一个多余电子结成共价键，并被束缚于晶格中成为固定的负离子。在这种 P 型半导体中，与掺杂原子数目相同的空穴成为自由运动的正电荷载流子。

N 型半导体则相反，是把电子作为载流子，掺入的是微量的五价元素磷、砷、锑。这些原子称为施主（供给电子）。施主原子用四个价电子和硅原子结成共价键。因为施主失去一个电子，自然，磷就作为正离子固定下来，多余的一个电子在晶体中自由运动而参与导电。

在本征半导体中，电子和空穴的数目相同，但在 P 型半导体或 N 型半导体中，通过掺杂使一种载流子增加，另一种载流子如何呢？达到平衡时“空穴” \times “电子”=一个常量。在 P 型半导体中空穴是占多数的载流子，但也存在少数电子。称这种情况下的空穴为多数载流子，称电子为少数载流子。

利用半导体中的两种载流子，研制出了完成放大作用或整流作用的多种多样的半导体器件。

1.1.2 PN 结

在单晶中使 P 型半导体和 N 型半导体结合起来的 PN 结，可以利用电子和空穴两种载流子。P 区空穴的数量多，电子少。N 区则电子多空穴少。在平衡状态电子和空穴之积不变，但向平衡过渡的时间内少数载流子会过剩。两个区域的载流子互相向对方区域扩散，产生过剩的少数载流子。给 PN 结加正向偏置，可对结面的少数载流子进行控制。从对方注入的少数载流子与随机运动着的多数载流子复合而消失，因此，少数载流子密度随着距结距离的增加而减少，由于密度的梯度产生扩散电流。可是，如果结晶不完美，则在晶体内自由运动的载流子，在结晶缺陷处被俘获，容易长时间滞留，这样，复合消失的机会增加。因此，结的特性受晶体的完美性影响，所以在半导体器件中要经常重视作为主要材料的半导体单晶的晶体缺陷问题。

此外，要求超高纯度（十个九：99.99...%，即小数点后10个9）的无缺陷单晶，这对精确控制施主与受主的浓度是不可缺少的，一旦制造出纯硅单晶之后，就可以提高设计指标。这是因为，少量的晶体缺陷或晶体中的重金属杂质都将影响载流子寿命、扩散长度等参数。晶体材料以及在工序中使用的材料造成的污染，或是工序中热处理产生的缺陷，这些也是重要的因素。

1.1.3 表面稳定化

PNP 或 NPN 结构结型晶体管，要按如下规则进行设计。

(1) 夹在二个 PN 构造中间的基区要作得很薄。该区的宽度比少数载流子的扩散长度要短即应当很薄。

(2) PN 结发射极侧，掺杂应当很浓。

(3) 集电结应有足够高的击穿电压。

给发射极-基极的 PN 结加正向偏置，就可以由发射极控制注入到基区的少数载流子，在基区主要由于扩散，产生与少数载流子浓度成比例的电流，使少数载流子集中于集电极。由于基区宽度比载流子的扩散长度要短，所以使基区载流子消失的比例减小，因此，从外部供给基极的电流减少。从外部控制微小的基极电流便可得到放大作用。下面以这种构造为例，研究一下半导体器件的表面敏感性。

晶体管的基极电流大致由载流子从基极向发射极反注入形成的电流，和在基区的复合电流组成。通过适当设计掺杂浓度比可减少反注入电流。另一方面，复合电流大致分为基区内部、表面、空间电荷层中的复合电流。可是，硅表面附近是内部排列整齐的原子序列急剧结束之处，是硅原子和氧，以及和污染原子结合而出现异常状态的区域，载流子的复合很显著。因此，注入的载流子，到达表面由于复合而消失，产生多余的基极电流。表面的复合受表面异种分子的附着或表面粗糙度的影响，因此易受外部影响，这也是容易引起特性劣化的原因。为此，要适当设计表面处理办法，或采用洁净的氧化膜覆盖来保护。面结型晶体管发

明初期的制造工艺中，表面保护并不充分，表面保护膜技术是到后来硅平面技术完成才实现的。成为今天集成电路工艺基础的硅平面结构，是在晶体上扩散基区然后扩散发射区形成的。工艺需要的氧化膜同时覆盖结和表面，起到表面稳定的作用。尺寸精度、厚度精度（基区宽度）也在飞速提高。尺寸微细化发展的结果，高频性能也大为提高。

现在一种重要的器件是 MOS 型器件。基本型的 MOS 场效应晶体管是通过绝缘膜来控制半导体表面的电导率。绝缘膜采用氧化硅。控制电极起初用金属铝，现在用多晶硅，用栅极电压控制氧化硅和硅界面上感应的电荷。

这种器件需要在硅衬底上制作和硅界面有良好的界面状态的氧化膜。这种构造的设想早已有，但在实现硅平面技术后才进入实用化，它是利用其氧化膜生长技术实现的，现在人们仍很重视表面的稳定性。

1.1.4 对半导体器件可靠性的要求

上一代的有源器件电子管，为了控制向真空发射热电子要具有高温阴极，因此，由电子蒸发会引起灯丝断线，因活性物质劣化引起损耗等，所以电子管的寿命是有限的，因此人们寄希望于无蒸发的固体晶体管。例如 PN 结是在比使用温度高得多的温度下用扩散和外延法制造的，这样，在使用温度下，器件尺寸不会改变，可以说是永久不变的。这是一种简单化的看法。即使说半导体器件具有永久寿命基本上不错，但是后来表明半导体器件除了基本的因素之外，还存在下述的劣化因素。这些因素都影响着半导体器件的寿命。

例如：

(1) 由于半导体衬底材料的原因，微小的晶体缺陷会导致特性变化，引起漏电流增加，耐压降低，噪声增加，存储器的保持时间变化等。

(2) 在高温处理过程中产生新的缺陷。

硅的热氧化工艺或杂质扩散工艺等都要重复进行 1000°C 左右的高温工艺，因此，有时内部应力增大或增加微小缺陷。它是工艺设计的重要因素。

(3) 由于外部的污染引起特性的长期性变化。

例如，遇到钠离子污染时，器件在工作中特性就要变化，以至失效。

(4) 绝缘击穿。

静电击穿也是其中一例。此外也有随着时间漏电流增大的模式。

(5) 由于追求微细化和高性能化，内部电场应力变大，会产生绝缘层中电荷的变化。

在 MOS LSI 的 FET 的沟道中产生的热载流子注入到栅绝缘膜并被俘获，引起 V_T 的变动就是其中的一例。

(6) 外部水分引起的劣化。

(7) 连接布线的不同种类的金属互相扩散引起的空隙，例如铝和金之间的化合物生成。

(8) 由封装半导体芯片的管壳应力引起的劣化。

(9) 集成电路设计不周引起的劣化。

在这些各种实际的失效劣化中还包括耗损失效。可是，通过设计技术和评价技术的开展，这些失效的发生已处于实用寿命界限之外，当初的永久寿命的概念仍然是有效的。

半导体器件自从它诞生之日起，人们就期待着它的可靠性。为了不辜负这种期待，已开展了这方面的应用研究。可靠性之所以能够实现，是因为随着制造技术的改革，半导体器件制作材料的质量日益提高取得的。

现在的半导体器件的主流是硅器件，下一代有希望的是化合物半导体器件，在这方面正迅速开展材料、制造技术和器件的研制。

在技术发展中，为了保证半导体器件的质量和可靠性，器件

的基础研究和失效物理的研究变得日益重要。

1.2 质量保 证

可靠性很早以来就是质量管理范围内讨论的问题。可靠性可以分为：以固有技术为主的可靠性问题，和器件使用后经过一段时间产生失效的可靠性问题，或象废品率那样只用数字来了解产品缺陷内容的方法，或推断与时间对应的定量的概率等方法。

如果按照产品的制造过程分一下类，就会描述出更清晰的概念，本章将把这种处理方法和定义作一介绍。

生产物质产品的过程大致分为两类，一是设计时赋予的设计质量，再是制造过程中的制造质量。前者与设计的基本内容有关，因此设计时必须假定构造该产品的材料或完成后的状态，并进行设定负荷或应力的设计。由此，就相当于在设计时增添了高可靠性质量。尤其对巨额商品或产量少的产品这是很必要的。同时，在设计时根据其类型不同，不仅需要余量而且还需要加进冗余度。

如果这样考虑，质量的高低需要两个方面衡量，即产品具有的功能质量要高（这是当然的），而且使用也要合适。将质量分为下面两类，就容易明白了。

(1) 设计质量 (design quality)

电路设计(功能)

产品设计(结构质量)

可靠性设计(时间因素)

(2) 制造质量(production quality)

偏差(初期质量)

批次间变化(初期质量)

虽然产品性能取决于制造质量，也有时会随时间的变化而可靠性变差，但如果究其原因，最后往往是设计时评价不足。理想的是设计时的评价完整程度要从制造质量去掉时间上的因素，这样说并不过分。设计者本身也深感需要有这种自信心和自觉性。

不论制造飞机还是制造宇宙火箭，其成功率都应是 100%，即使是微小的差错也不能放过。由此可见，设计质量的重要程度因对象的不同而不一样。特别象器件这样大量生产的产品，利用管理技术保证产品质量是很重要的。例如现在微细化的半导体器件，就有设计质量和制造质量两个方面的要求。

下面着重介绍成为可靠性基础的实际的质量保证。

1.2.1 质量保证和可靠性

1. 质量保证

在讨论质量保证活动时需要考虑两个方面的活动，即提高适合用户需要的产品性能，也就是提高初期质量的活动，还有更长久地保持产品质量水平（可靠性）的活动。

(1) 初期质量

是产品从制造者到用户手里时的质量。

(2) 可靠性

在产品使用寿命内的初期性能的维持。

为了保证半导体器件的质量需要了解失效物理和统计方法两个方面的问题。

在几百到几千小时的短时间内评价几十年的耐用寿命，主要是靠失效物理分析，也就是用加速寿命试验、临界试验等有意造成失效，以便查明其失效模式的失效机理。进一步还需要积累这些可靠性试验数据、应用数据，从统计上保证质量。

与可靠性有关的代表性因素有下面三点：

- ① 耐久性………失效率，平均寿命
- ② 可维修性………预防性维护，故障后维修，修复时间
- ③ 安全性………安全装置，检修

对于半导体器件来说，特别引人注目的是耐久性。可是，近年来，在半导体器件复杂化，系统构成因素增多的情况下，软错误的质量保证已作为一个重要课题而在仔细研究。

2. 初期质量与可靠性

对于半导体器件来说，扩散、装配、封装、精加工及许多制造工序都以串连模式联系着，因此，不论那个工序发生故障，该半导体器件会因不能修复而成为废品。为了保证这些工序中器件的初期质量，如何用管理技术控制各工序中的制造偏差，对初期质量影响很大。此外，还要考虑到，由于半导体器件的多功能化、高集成化带来的扩散工艺的微细化，以及封装小型化、薄型化等，正在接近材料的极限。因此，这就必须充分理解材料的物理、化学及电气的临界状态的更深的固有技术。进一步说，关键是设计阶段的可靠性，在这个阶段要预料到在严格条件下制造的半导体器件能否保证使用期限。表 2.1 给出了初期质量和可靠性的差别。

3、可靠性的产生与发展

众所周知的质量管理是 1927 年左右由贝尔实验室的休哈脱，从统计质量管理 (SQC: statistical quality control) 开始的，1960 年进一步开展质量管理，并发展到也对经营进行全面质量管理 (TQC: total quality control)，从而得到广泛应用。另一方面，可靠性问题，是以四十年代的二次世界大战沉痛的教训为转机，以美国编制的军用标准 (MIL: Military Standard)

表 1.1 初期质量和可靠性比较

项 目	初 期 质 量	可 靠 性
工 艺	制 造 工 艺	材 料、设 计
技 术	管 理 技 术	固 有 技 术
典 型 分 布	正 态 分 布	指 数 分 布
模数(平均值)的估计	$\hat{\mu} = \sum_{i=1}^n x_i / n$	$M\hat{TTF} = \sum_{i=1}^r t_i / r$
废品或失效尺度	废品率 = p	失效率 = λ

为主体发展起来的。

最近，以欧洲为中心的国际电工委员会标准 (IEC: Inter-

national Electrotechnical Commission) 正在成为世界的可靠性及质量标准的主流。以圆满进行国际贸易为目的, 从 1982 年开始了 IEC 电子部件质量认证制度 (IECQ 制度), 发展到电子部件的互相认证。此外, 以 1965 年的 IEC 东京大会为转机得到了发展, 现在使用日本电子机械工业协会标准(EIAJ:Standards of Electronic Industries Association of Japan)作为先行标准。一般开始使用可靠性的概念, 是因为 1959 年美国提出保证汽车行驶里程, 从此发展起来, 之后包括耐用消费品在内, 而得到广泛应用。

从半导体器件的历史就会知道, 基于 1947 年发明的点接触晶体管, 半导体器件技术得到发展, 一直到六十年代出现的 MOS (metal oxide semiconductor) 晶体管、进而八十年代出现的 64KDRAM 为代表的 VLSI 的时代, 都是和可靠性的历史相联系的形式发展起来的。表 1.2 是可靠性、质量管理, 半导体器件的发展经过。

表 1.2 可靠性、质量管理、半导体器件的发展情况

项目	年 代							
	二十年代	三十年代	四十年代	五十年代	六十年代	七十年代	八十年代	九十年代
质量管理	美国 SQC 开始期 (1927)	美国 SQC 成长期	美国 SQC 成熟期	日本 SQC 开始期	日本 TQC 成长期	日本 TQC 成熟期		
可靠性			第二次世界大战电子管	AGRE E(1952-1957) 汽车里程保证 (1959)	阿波罗计划 (1961~1969)		IECQ (1982~)	
半导体器件			点接触晶体管 (1947) 结型晶体管 (1948)	双极集成电路	MOS 晶体管 (1960)	MOS LSI	VLSI	

4. 可靠性的定义

可靠性可按表 1.3 来定义，表中所列的“产品”是指系统、装置或部件。此外，给定的条件是指环境应力（温度、湿度、负荷等）的保证使用范围。若更详细论述，则需要考虑标准条件和最坏条件等。“规定时间”一般指保证使用时间，也有的指次数、循环数、距离等。“所要求的功能”，由于产品或部件不同而有各种不同功能，明确判定功能失效的标准是很重要的。

表 1.3 可靠性定义

可靠性	产品在给定的条件下，规定的期间内完成所要求的功能的能力。
可靠度	产品在给定的条件下，规定的期间内，完成所要求功能的概率。

5. 可靠性的必要性

由于系统的高性能化、复杂化、大规模化引起失效的机会也在增多，一旦发生失效，对社会经济、人的生命，以及我们的日常生活都会造成很大影响。特别是半导体器件，已到了一个芯片内有几十万到几百万个晶体管这样高集成化的 VLSI 的时代，半导体器件本身就当看作为一个系统。例如，大型计算机中使用的 256KDRAM 就是将 60 万个晶体管集成在一个芯片上制成的一个器件，其中一个晶体管的不合格率，不在 2ppm 以下，就不是合格品。进一步说，一个系统中要使用几百个这种器件，因此，必须保证有长期的可靠性。现在，上述的半导体器件，在苛刻的环境条件下（飞机、汽车等）应用的情况增多。其中，从产品成本方面关心用户要求的可靠性是很重要的，这与企业的信誉是联系在一起的。为了满足顾客的要求，就必须满足许多条件，如功能、质量、价格（价格适当）、数量、交货期、售后服务，最近又包括通用性等。

6. 半导体器件的质量水平

半导体器件的质量水平虽然在朝着电路的复杂化、高集成化、工艺微细化、封装小型化、薄型化，为了降低成本改变材料及使用环境的扩大等极为严酷的方向发展，但在这 10 年里，改