

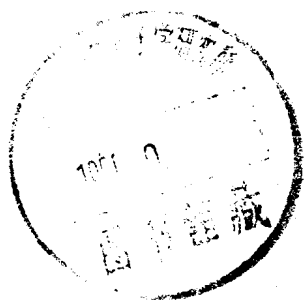
半导体器件失效分析

邓永孝著



半导体器件失效分析

邓永孝 著



宇航出版社

3110182

内 容 简 介

本书系统地介绍了半导体器件失效机理、失效分析技术和程序、使用可靠性、失效分析实例等。全书共计12章。

本书可供半导体器件失效分析工作者、可靠性工作者、器件设计者、生产者和使用者以及高等院校半导体器件专业的师生作参考书，也可供学习班作教材。

21015

半导体器件失效分析

邓永孝 著

责任编辑：李之聪 曹 英

宇航出版社出版

北京和平里滨河路1号 邮政编码 100013

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京顺义县印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：10.25 字数：276千字

1991年4月第1版第1次印刷 印数：1-2400册

ISBN 7-80034-363-4/TN·029 定价：8.10元

序 言

“失效分析” (failure analysis) 系指产品失效后, 通过对产品及其结构、使用和技术文件的系统研究, 从而鉴别失效模式、确定失效原因、机理和失效演变的过程。这一门技术就是失效分析 (GJB451-89)。

可靠性工作大体上可分为两类: 一类是通过分析总结过去的管理、技术、设计、生产和试验的经验, 从而形成标准、规范、手册和条例并在研制到使用的各个阶段中执行这些规定 (即很好地运用前人的经验)。另一类是对工作中发生的故障 (失效) 通过分析、试验和研究, 找出故障 (失效) 的根源, 认识它的规律, 采取针对性的改进措施, 真正地予以解决, 并将认识到的规律及改进措施总结成今后要遵循的法规。对于故障 (失效), 它是一个“实践—认识—再实践”的过程。在这种情况下, 产品的可靠性随着故障 (失效) 的被认识及消除而增长。对于一个比较复杂的电子产品 (如系统) 而言, 一般说来, 它的初样不可避免地会存在早期设计阶段不易预见到的可靠性、维修性缺陷。因此, 必须事先制定出研制试验计划, 让产品在初样阶段就经历各种试验, 使它存在的薄弱环节能够得到充分暴露, 然后按照上述“实践—认识—再实践”的程序进行循环, 使产品的可靠性得到不断提高, 这就是产品的可靠性增长 (reliability growth)。

产品的某些故障 (失效) 可能要到现场使用阶段才能暴露出来。对于这类故障 (失效) 和信息 (包括故障件) 更需要及时进行分析 and 反馈, 因为它更能真实地反映出可靠性问题。按照 GJB450《可靠性大纲》的要求, 各企业应建立一个“故障报告、分析和纠正系统” (FRACAS), 其目的是及时而有目的地利

用故障（失效）及维修信息，对产品的可靠性和维修性增长提供有效的管理与控制。对研制、生产及使用中出现的故障（失效）应及时进行分析研究，并制定和运用有效的纠正措施，以防止或尽量减少故障（失效）的再发生，从而减少设备的维修工作量。

根据上述要求，可见“失效分析”是可靠性工程中的重要分支。随着电子元器件特别是IC的迅速发展，及时分析它们的失效机理，从设计、工艺、使用等方面采取改进措施来提高元器件的可靠性已成为愈来愈重要的工作。因而，元器件失效分析（特别是IC的失效分析）在提高产品质量的工作中显得尤为重要。

航空航天部771所的可靠性研究室是我国开展元器件失效分析工作最早的单位，我国不少单位的失效分析人员都是在他们的帮助和培养下成长起来的。该室于1987年已成为航空航天部“半导体器件失效分析中心”，他们已为我部所属部门以及地方企业进行了大量失效分析工作，为提高电子产品的可靠性作出了较大贡献，同时也给委托分析单位带来了较大经济效益，取得了用户的信任与好评，是我部公认的权威性半导体器件失效分析中心。

本书作者邓永孝研究员是该分析中心的骨干，也是最老的分析人员，他在长期从事失效分析工作中所积累起来的丰富经验是我部及国内失效分析界的宝贵财富。他们把这些宝贵经验系统地整理出版，对失效分析工作的开展将会起到促进作用。我部和兄弟单位也可从本书所述的分析结论及改进建议中吸取经验教训，从而减少军用电子设备发生故障所带来的重大损失。随着失效分析技术的不断发展和深入，期望他们数年之后还有续著问世。

将我部老专家多年积累起来的宝贵经验整理出版，使它成为大家的共同财富，是我部质量司为提高管理、技术和生产人员的素质而采取的一项重要措施。今后，我司将更多地组织这一工作，希望得到大家的支持与帮助。

航空航天部质量司总工程师 何国伟
1989年10月于北京

前 言

失效分析是通过对现场使用失效器件和可靠性试验、筛选、验收失效器件的解剖分析，找出失效根源，提出改进措施，从而迅速提高器件可靠性并可获得很好经济效益的技术。

失效分析不仅为器件设计者、生产者提供改进质量的科学依据，而且也为器件用户和可靠性工作者提供重要依据。近几年，我国的失效分析工作发展很快并且日益受到广大器件设计者、生产者和使用者的高度重视，它已成为可靠性研究中的重要领域。

本书从失效分析工作和可靠性工程的需要出发，系统地介绍了半导体器件失效分析的内容，除重点介绍失效机理和失效分析方法外，还增加了内容较为丰富、实用性较强的使用可靠性内容和失效分析实例，从而弥补了同类著作的不足。

本书是作者在“可靠性与失效分析”学习班上讲授失效分析的讲义基础上，结合长期从事失效分析工作的经验编著而成的。书中强调理论联系实际，着重于各种失效现象的分析和具体分析方法的介绍，尽量避免繁琐的理论阐述、内容安排和文字叙述上力求深入浅出、简明扼要，使本书既是失效分析的基本教材又在某种程度上起到工具书的作用。

本书是航空航天部质量司组织编写的可靠性资料之一。航空航天部质量司总师何国伟研究员在百忙之中抽暇审阅并撰写了序言。在出版过程中得到了航空航天部质量司严中伟，《微电子学与计算机》杂志社林达全，航空航天部半导体器件失效分析中心郑鹏珊等同志的大力支持，在此谨致谢意。

由于作者水平有限，书中难免有许多错误和不妥之处，敬请
读者批评指正。

邓永孝

1989年11月1日

目 录

第一章 半导体器件失效分析概论	(1)
§ 1 失效分析的产生与发展.....	(1)
§ 2 失效分析的目的和意义.....	(3)
§ 3 失效分析的基本内容.....	(6)
§ 4 主要失效模式和失效机理.....	(7)
§ 5 失效分析程序.....	(9)
§ 6 其它.....	(10)
第二章 表面失效机理	(14)
§ 1 半导体器件常见的失效模式和机理.....	(14)
§ 2 SiO_2 -Si系统中的电荷.....	(14)
§ 3 钠离子对器件可靠性的危害.....	(19)
§ 4 界面陷阱电荷对器件性能的影响.....	(24)
§ 5 表面电荷对MOS器件的影响.....	(26)
§ 6 SiO_2 缺陷对器件性能的危害.....	(28)
§ 7 N 沟MOS器件中的热电子效应.....	(31)
第三章 体内失效机理	(34)
§ 1 二次击穿.....	(34)
§ 2 CMOS集成电路的门锁效应.....	(45)
§ 3 温度对半导体器件性能的影响.....	(62)
第四章 核辐射失效及抗核加固	(67)
§ 1 核辐射环境.....	(67)
§ 2 核辐照效应及其机理.....	(68)
§ 3 核辐照对半导体器件的影响.....	(73)
§ 4 核电磁脉冲损伤.....	(79)
§ 5 半导体器件的抗核加固.....	(82)

第五章 电极系统的失效机理	(90)
§ 1 金属化系统的失效机理.....	(90)
§ 2 键合系统失效机理.....	(106)
§ 3 芯片焊接的失效机理.....	(111)
第六章 封装系统的失效机理	(116)
§ 1 封装方法简介.....	(116)
§ 2 塑料封装的可靠性.....	(118)
§ 3 金属封装的失效机理.....	(122)
§ 4 管腿锈蚀、断裂引起的失效.....	(123)
§ 5 底座镀金层质量问题.....	(125)
第七章 厚、薄膜集成电路的失效机理	(127)
§ 1 薄膜集成电路的失效模式和机理.....	(127)
§ 2 厚膜集成电路的失效模式和机理.....	(133)
第八章 失效分析程序	(138)
§ 1 失效分析程序 (一)	(139)
§ 2 失效分析程序 (二)	(140)
§ 3 失效分析程序 (三)	(143)
§ 4 失效分析程序 (四)	(144)
§ 5 失效分析程序 (五)	(145)
§ 6 失效分析程序 (六)	(146)
§ 7 失效分析程序 (七)	
§ 8 失效分析程序 (八)	
第九章 失效分析技术	(147)
§ 1 基本分析技术.....	(147)
§ 2 解剖技术.....	(167)
§ 3 先进分析技术 (仪器分析)	(172)
第十章 半导体器件的静电损伤及防护	(186)
§ 1 静电的产生.....	(186)
§ 2 静电放电 (ESD) 的损伤模型.....	(189)
§ 3 静电放电敏感度.....	(191)
§ 4 静电损伤的失效模式.....	(195)
§ 5 静电损伤的失效机理.....	(196)

§ 6 静电损伤的防护措施.....	(203)
第十一章 半导体器件的使用可靠性.....	(210)
§ 1 半导体器件使用中的可靠性问题.....	(210)
§ 2 CMOS电路的故障分析.....	(224)
第十二章 失效分析实例.....	(241)
§ 1 集成电路版图设计缺陷分析.....	(241)
§ 2 MOS电路 V_T 漂移的失效分析.....	(252)
§ 3 MOS电路栅穿失效分析实例.....	(260)
§ 4 键合点脱落失效机理的分析.....	(266)
§ 5 集成电路的非功能测试与分析.....	(275)
§ 6 电浪涌损伤的分析.....	(280)
§ 7 “重测合格”原因的分析.....	(287)
参考文献.....	(295)

第一章 半导体器件失效分析概论

§1 失效分析的产生与发展

随着微电子学的飞速发展,半导体器件已广泛应用于宇航、军事、工业和民用产品中。所以对半导体器件的可靠性研究也更加重要。

半导体器件可靠性的研究内容主要包括两方面:一是评价可靠性水平(如可靠性数学、可靠性试验、可靠性评估等);二是如何提高可靠性(如失效分析、失效物理、工艺监控、可靠性设计等)。虽然器件可靠性研究首先是从评价可靠性水平开始的,但研究重点逐渐在转向如何提高可靠性方面。因为可靠性研究不仅是为了评价器件可靠性,更重要的是为了提高可靠性,所以失效分析和失效物理研究越来越受到广大可靠性工作者的重视。失效分析和失效物理研究的迅速发展并不单是为了学术研究的需要,更重要的是为了满足可靠性工程迅速发展的需要。特别是60年代以后,随着可靠性研究的发展和高可靠半导体器件及大规模集成电路的出现,可靠性研究遇到了以下问题:第一,在试验时间、试验样品和人力物力方面遇到了难以克服的困难(例如失效率 10^{-7} 意味着用10000个器件作1000小时试验之后才能得出这一结果)。第二,半导体器件和集成电路的品种及工艺更新速度很快,使得过去取得的可靠性数据常常变得不适用。第三,当代电子设备和系统日益复杂化、综合化,并对器件提出了高可靠的要求。为了解决以上问题,迫切需要一种既省时间,又省费用的可靠性研究方法。失效分析和失效物理研究就是为了达到这一目的。

而迅速发展起来的，发展情况如表1-1所示。

表1-1 失效分析的发展

时 间	50年代	60年代	70年代及以后
主要研究对象	阻容元件 电子管	晶体管 集成电路	集成电路和大规模、 超大规模集成电路
发展阶段	统计失效阶段 (开始阶段)	控制失效阶段 (大发展阶段)	消除失效阶段 (巩固提高阶段)
研究方法	失效率法	失效分析法	可靠性保证法
理论基础	可靠性数学	失效物理	可靠性物理
研究重点	失效规律	失效机理	工艺控制、可靠性 设计、可靠性标准
研究目的	计算失效率	提高可靠性	保证可靠性

失效分析发展最快的时期是60年代和70年代。60年代后期出现的平面工艺和集成电路两项发明，开辟了利用集成电路的新时期，使集成电路的可靠性得到很大提高，并成功地用于“民兵”洲际弹道导弹，成为美国宇航局在阿波罗计划中广泛使用集成电路的典范。集成电路用于“民兵”导弹在可靠性方面的意义可定量说明如下：在1958年，要求微型电路的平均失效率为 7×10^{-8} 。然而，那时候晶体管的失效率大约是 1×10^{-6} 。“民兵”计划的改进措施（主要是以失效分析为中心的元器件质量保证计划）致使集成电路的失效率降低到 3×10^{-9} 。其中失效分析对半导体器件可靠性的提高发挥了很大的推动作用。

半导体器件可靠性在60年代之所以发生全局性变化，是由于出现了重要的技术突破（即：平面工艺和集成电路的发明）。促成可靠性突破的三个因素是：

1. 高可靠性的要求。象“民兵”导弹迫切要求提高可靠性。
2. 研究出了能承受较高热应力和机械应力试验的器件结构。
3. 有了较好的材料、较好的工艺和较好的工艺控制。通过改进器件的设计，控制材料和生产过程就能够制造出相当可靠的器

件。

在失效分析发展过程中，美国罗姆航空研究中心作了大量研究工作，起了巨大推动作用。1962年9月，由罗姆航空研究中心和伊利诺斯工艺研究所共同发起，在芝加哥召开了第一届“国际电子学失效物理讨论会”。会议以半导体器件为中心议题，以后每年召开一次年会。随着失效分析的深入，从失效分析角度找到工艺缺陷，再从工艺物理角度进行研究，改进工艺，这样就导致了可靠性物理工作的开展。因此，1967年改名为“可靠性物理年会”。直至1988年，已召开了26次年会。每届年会的内容十分丰富，新的研究成果不断出现。现在的失效物理研究已从“幼年”时期进入了“壮年”时期。但我国开展此项工作较迟，失效物理学术讨论会共召开三次，高水平的研究论文还不多。在国内，规模较大、分析设备较全的失效分析实验室还很少，专业技术人员数量也比较少。因此，大力发展失效分析和失效物理研究是可靠性研究工作的当务之急。而培养失效分析专业人员，配置分析设备和建立分析实验室更是当前的迫切任务。

§2 失效分析的目的和意义

失效分析是通过对现场使用失效样品、可靠性试验失效样品和筛选失效样品的解剖分析，得出失效模式（形式）和失效机理并准确判断失效原因，为迅速提高产品的可靠性提供科学依据。

失效分析和失效物理研究立足于微观世界，对半导体器件不单纯看成是具有某种功能的“黑盒子”，而是从物理、化学的微观结构上对它进行仔细观察和分析研究，从本质上探究半导体器件的不可靠因素，从根本上探索其工作条件、环境应力和时间等因素对器件发生失效所产生的影响。因此，失效分析在可靠性设计、材料选择、工艺制造和使用维护等方面都能为有关人员提供各种有用的科学依据。例如：

1. 为用户合理选择和选购元器件, 进行可靠性预测分配、整机可靠性设计、失效模式致命性分析和正确使用与维护等提供依据;

2. 为器件设计者提出危害产品可靠性的根源, 并提出明确而具体的改进措施, 为控制和消除失效提供重要依据;

3. 在工艺控制、筛选试验、加速应力试验和评估认证等方面, 为器件制造者和质量监督部门制定合理的最佳试验方法和规范而提供可靠依据;

4. 失效分析所得出的失效模式分析图是最重要的可靠性数据, 也是评价可靠性水平的依据。

失效分析和失效物理可以说是可靠性工程技术的支柱和基础, 也是可靠性研究的重要领域。只要及时进行失效分析和质量反馈, 就可以缩短反馈周期、增加反馈次数, 从而达到迅速提高可靠性的目的。反馈渠道如图1-1所示。

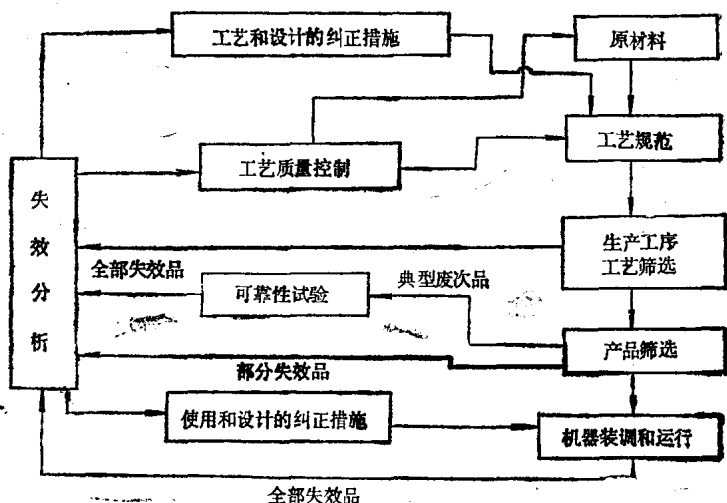


图1-1 失效分析在可靠性闭环反馈中的作用

失效分析工作不仅在提高可靠性方面有很好的效果, 而且有很高的经济效益。虽然失效分析工作不出产品, 但是失效分析和

反馈纠正措施可以显著提高器件的成品率和可靠性，减少系统试验和现场使用期间的失效器件。系统试验和现场使用期间发生故障的经济损失巨大，排除故障的维修费用颇高，并且这种费用随着可靠性等级的提高而指数地上升。对于航天产品，排除失效器件的费用达到了惊人的数字。情况如表1-2所示：

表1-2 排除失效半导体器件的价格比较（价格/只）

失效价格 (美元)	期间	购进器件	设备安装	系统调试	现场使用
	用途	期 间	期 间	期 间	期 间
	民 用	2	5	5	50
	工业应用	4	25	45	215
	军事应用	7	50	120	1000
	航天应用	15	75	300	2×10^5

表1-3 “民兵 I”集成电路可靠性研究及其成本的降低（美元/只）

年 度	1963	1964	1965	1966
失效率%千小时	—	0.070	0.075	0.0008
制造成本（包括筛选）	52.66	33.65	23.32	12.40
“可靠性反馈-发现、分析、纠正”成本	0.96	0.96	0.96	0.96
“元件质量保证计划”成本	0.25	0.25	0.25	0.25
“制造监督”成本	0.26	0.26	0.26	0.26
“失效物理”成本	0.16	0.16	0.16	0.16
“可靠性鼓励”成本	0.07	0.07	0.07	0.07
“防止失效重现计划”成本	0.29	0.29	0.29	0.29
工厂更换坏元件成本	—	8.02	8.51	0.02
现场更换元件成本	—	231.24	24.72	5.99
总 成 本（美元）		274.90	50.54	20.40

又如美国“民兵Ⅱ”弹道制导计算机用集成电路，通过失效分析等项可靠性研究，1964~1966年的两年中就使现场更换集成电路的成本降低了20倍，情况如表1-3所示。开始阶段的现场更换成本很高（231.24美元），占总成本的84.1%，可靠性研究使总成本从274.9美元/只降低到20.4美元/只，可见经济效益是非常显著的。

§3 失效分析的基本内容

失效分析的基本内容包括：失效情况调查、失效模式鉴别、失效特征描述、假设失效机理、证实失效机理、提出纠正措施和新失效因素的考虑等，分析着重于查明失效模式、追查失效机理以及探讨改进方法，有时辅以有关的高应力试验。

一、失效情况的调查

1. 制造厂、型号名称、外壳类型、生产日期、批号。
2. 用户、使用设备名称，台号、失效部位、累计运行时间。
3. 发生失效的环境（调试、运行、高温、低温、振动、冲击、验收、现场使用等）、失效时间、失效判断人。
4. 失效现象：无功能、参数变坏、开路、短路等。

二、鉴别失效模式

1. 电特性测试：判断失效现象是否与原始数据相符，分析失效现象可能与哪一部份有关。

2. 用立体显微镜检查外观：机械损伤、腐蚀、标记完整性等。

三、失效特征描述

利用高倍显微镜和扫描电子显微镜等设备观察失效部位的形状、大小、位置、颜色、机械和物理结构、物理特性等，科学地表征和阐明与上述失效模式有关的各种失效现象。

四、失效机理假设

以半导体器件失效机理的有关理论为根据，对上述失效模式

和现象进行理论推理并结合材料性质、有关设计和工艺的理论及经验，提出导致该失效模式产生的内在原因或具体物理化学过程。如有可能，更应以分子、原子学观点加以阐明或解释。

五、失效机理证实

选用有关的分析，试验和观测设备对失效样品进行仔细分析，验证失效机理的假设是否属实。有时需要拿合格的同种器件进行类似的破坏性试验，观察是否产生相似的失效现象。这种“试验分析”方法往往有利于验证失效假设。如果一次证实不了，则重复上述二、三、四、五等步骤，直到证实为止。

六、提出纠正措施

根据失效分析结果，提出防止产生失效的设想和建议。它包括工艺、设计、结构、线路、材料、筛选方法和条件、使用方法和条件、质量控制和管理等方面。

七、新失效因素的考虑

经过设计和工艺改进，使器件原有的问题得到解决，一些老的失效模式或机理得以消除或受到控制，但同时也会带来一些新的失效因素。对这些新因素要重新分析研究，并采取新的措施加以控制和消除。如此周而复始，不断发现问题，分析解决问题，使器件的可靠性不断得到提高。

失效分析是一门边缘科学，它跨越各种科学技术领域并把各自独立的技术综合在一起，它也可以说是一门综合性科学。所以进行失效分析时要经常与器件设计者、制造者、使用者三方共同分析讨论，从器件设计技术、制造技术、器件物理、器件使用、设备制造和设计以及可靠性管理等方面进行综合分析考虑。只有这样才能准确地找出失效的真正根源。

§ 4 主要失效模式和失效机理

一、常见的失效模式