

新技术革命中的可靠性物理学

高 光 渤

(可靠性物理研究室)

摘 要

本文在论述了可靠性物理学的某些新概念的基础上,重点结合我国微电子技术发展的实际和国际上可靠性物理研究的新成就,阐述在新技术革命中可靠性物理学的发展对策。

Reliability Physics in New Technological Revolution

Gao Guang-bo

Abstract

In this paper, some new concepts on reliability physics have been proposed. On these bases, the way to deal with developing reliability physics in the new technological revolution of our country has been expounded by considering the practical problems exhibited in our microelectronic technological development and international new achievements on reliability physics.

一、前 言

新技术革命的浪潮,席卷世界每个角落。如何认识它、迎接它、驾驭它、是当今世界一切有识之士所关注的问题。

现已公认:信息科学、生命科学和材料科学是当代自然科学的三大前沿科学,而信息科学是其基础。围绕信息科学,微电子技术、计算机技术、激光技术、光纤技术、遥感技术等一株新技术群在崛起,而微电子技术是领航技术。

关于信息科学的重要性已有许多论述,但是,关于信息的真伪性和可靠性论及很少,殊不知,信息若失去了可靠性,信息科学便成了伪科学,信息社会便一片混乱。

1957年美国先锋号卫星因价值2美元的一器件失效,控制卫星的信息中断,而使220万美元的卫星原地坠毁^[1]。美国向火星发射的“水手1号”火箭就是因为计算机程序脱落一个字符而失败^[2]。1980年6月3日北美防空中心预警系统的信息处理计算机因一块IC失效而发出了假核警报,导致美国军界一场虚惊^[3]。信息的不可靠性使世界的核大战危险几率在增加^[4]。

因此,信息的价值就在于可靠性。如果说信息科学是当今前沿科学的基础,是新技术革命的支柱,那么,可靠性工程将是信息科学的保证。而作为可靠性工程基础的可靠性物理学,在新技术革命中的作用便可想而知了。

本文在论述了可靠性物理学中的某些新概念的基础上,重点结合我国微电子技术发展的实际和国际上可靠性物理研究的新成就,阐述在新技术革命中可靠性物理学的发展对策。

二、可靠性物理学概念的新认识

半导体器件可靠性物理学(以下简称可靠性物理学)是近二十年来新崛起的、目前尚不很成熟的边缘性学科。它是在半导体器件物理学、工艺学、材料学、化学、电子学、环境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,探求失效机理,并依据这些失效机理进行加速寿命试验及筛选,生产质量控制以及可靠性设计和加固^[5]。下面分别论述可靠性物理与失效物理的关系、器件可靠性物理与器件物理的区别,以及可靠性物理学在微电子技术发展中的地位和作用。

1. 可靠性物理与失效物理

从60年代初期,失效物理(故障物理)一词诞生以来,许多学者认为,失效物理即可靠性物理。例如,日本可靠性专家盐见·弘在1976年出版的《故障物理》一书中写到:“所谓失效物理或可靠性物理,简单地说来,就是从原子和分子的角度出发,来解释元件、材料的失效现象,以便为元件、材料的改良、评价、分类、使用以及设备(系统)的可靠性设计、维护修理等提供依据,它是一种“物理加工程”的基础性技术”^[6]。在微电子技术发展到今天,可靠性物理研究范围远远超出了失效物理的内容。人们不仅要研究失效的机理,而且要研究可靠性设计、可靠性保证及可靠性预测的新技术。如同人类发展到今天,医学早已超过了医疗学的范围,出现了保健学或健康学一样。可靠性物理不是停留在对失效模式的追本溯源,而是要针对使用的应力、环境应力和可靠性指标进行可靠性设计或可靠性加固。尤其是80年代以来,10级超净生产线的投入使用,完美单晶技术的发展,离子注入、分子束外延等可控的掺杂与生长技术在生产中的应用,俄歇能谱仪、扫描电镜、离子探针及红外热象仪等精密的分析仪器在质量控制及失效分析中的使用,CAA(计算机辅助分析)技术、CAD(计算机辅助设计)技术、CAM(计算机辅助制造)技术、CAR(计算机辅助可靠性)技术以及FTA(失效树分析)技术的发展和运用,使微电子器件的可靠性加固、可靠性预测变成了现实。所以,可靠性物理学应包括失效物理学、可靠性加固技术以及可靠性预测和控制等三个方面。图1以研究树的形式详细给出了可靠物理学的研究体系。

2. 器件可靠性物理学与器件物理学

相当于塑性力学或断裂力学。

(2)时变性: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。

从器件物理学的观点,器件的物理参数(诸如迁移率、少子寿命、阈值电压等)、端参数(无论是直流的,还是交流的),以及结构参数(例如沟道长度、基区宽度等)都是与时间无关的,是永恒的。而从器件可靠性物理学的观点看,随着外界应力不断地作用,器件的结构、各种参数在变化着,是时变的。目前,在超大规模集成电路中,与时间相关介质击穿现象(TDDDB)、静电放电损伤(ESD)等,正是导致这种时变性的典型的失效机理。可以预言,从器件可靠性物理学的角度来研究器件模型,那么,如双极型晶体管的E-M模型,G-P模型,以及MOS晶体管的一些模型或器件网络,均变为“时变模型”或“时变网络”。当然,这种时变通常是以若干个千小时来度量的。可以想象:一旦这种“时变模型”诞生以后,会大大加速CAR(计算机辅助可靠性)技术的发展。

(3)整体性: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,将器件看成是由若干个PN结、欧姆结、内引线、键合点及封装组成的系统,它不仅研究芯片,而且研究这一系统的每一部分。总之,是研究器件的整体。

可见,器件可靠性物理学的研究范围远远超过了器件物理学的范围,不仅涉及了器件工作原理,也涉及了器件制造工艺过程、筛选方法和使用寿命。

3. 可靠性物理学是新器件、新工艺诞生的助产婆

从半导体器件发展史上看,新器件的诞生往往与器件失效机理的分析是分不开的,见表1。40年代末期,Bardeen等人^[7]在开始研究半导体放大器件时遭到了挫折,正是由于他们发现了锗表面的优劣是导致试验成败的原因,改善了锗表面的腐蚀技术,才发明了点接触三极管。50年代末期Atalla等人为改善晶体管特性稳定性,降低漏电流,发现了热生长的SiO₂钝化作用,揭开了以后硅平面工艺,也即硅集成电路蓬勃发展的序幕。

1964年,Kerr等人^[8]在研究了SiO₂中Na⁺沾污造成器件特性不稳定的失效机理后,才提出了PSG的纯化作用,正是这个工艺技术才使MOS晶体管以及MOS集成电路得以实用。

1968年Black^[10]研究指出,金属薄膜的电徙动,是影响半导体器件长期寿命的重要因素。正是对这种失效机理的深入研究后,人们才提出了用于今天VLSI的Al-(Cu)-(Si)的Al合金膜。

二次击穿是导致双极型功率器件致命失效的主要机理。自从1966年F. Bergmann等人^[11]开始研究这一失效机理并提出镇流电阻的概念后,人们相继提出了各种镇流技术。目前已诞生了可以与功率V_{m0}、晶体管安全工作区相比美的双极型功率晶体管。

沟道热电子注入效应是导致短沟道MOS器件阈值电压漂移的主要失效机理,但是利用这一效应制成了EPROM(可擦写的唯读存储器)。

目前,CMOS电路无论是数字电路还是模拟电路,将是今后VLSI主要的发展方向。但是,造成CMOS电路失效的主要机理是闭锁(Latch-up)效应^[12]。为消除这种闭锁

表 1 失效机理研究与新工艺、新器件的关系

年 代	研究 人	失 效 机 理	新 工 艺、 新 器 件 发 现
1947 年	Bardeen 等人	鍍表面处理技术对漏电流影的影响	发明鍍点接触三极管
1958	Atalla 等人	研究硅表面处理对漏电流的影响	发现了热生长二氧化硅的钝化作用，为硅平面工艺奠定基础。
1964	Kerr 等人	研究钠离子沾污导致 MOS 器件失效	发明了磷硅玻璃钝化工艺，使 MOS 器件得以实用。
1966 年至今	Bergmann 等人	研究功率晶体管热不稳定性	发现新的鎮流技术，制造出安全工作区可与功率 MOS 晶体管相比的双极型功率晶体管
1968 年至今	Black	铝薄膜电徙动研究	适用于超大规模集成电路的铝—铜—硅合金薄膜
1973 年至今	Greyory	发现CMOS电路锁定效应	发现了一系列抗锁工艺，以及新器件诞生，例如三维 CMOS 电路的出现
1978 年至今	May 和 Woods	发现封装材料残存放射性元素铀、钍，放射 α 粒子引起存贮器软误差失效	研究出新的封装材料以及抗 α 粒子辐照的芯片钝化技术
1981 年至今	Anolick 等人	对与时间相关的介质击穿现象的研究	提出了采用阶梯应力筛选薄二氧化硅化硅层的技术，以及解释这种现象的物理模型

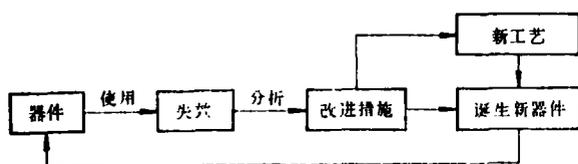


图 2. 新器件、新工艺发展的框图

诞生了新技术和新器件（见图 2）。所以，器件可靠性物理学是新工艺技术、新器件诞生的助产婆。

效应，近年来，人们创造了多种工艺技术。同时，也诞生了三维 CMOS 电路。总之，每当研制成一种新技术和新器件时，必定要同时研究由此伴随而来的新的缺陷，以及研究相应改进的措施，于是又

三、新技术革命中可靠性物理学的发展对策

七十年代初期就有人预言，八十年代是“硅时代”。的确，80 年代以来，随着 64K DRAM 256K DRAM 相继商品化，1 兆位 DRAM 的开发，微电子技术发展极为迅速。

美国 1984 年半导体总销售额达 121 亿美元。日本集成电路的销售额仅次于计算机和磁带录象机，成为日本第三种最大商品，其总销售额可同面包相比。有人预计，到 90 年代，微电子总产值可达 5×10^3 亿美元，2000 年可达 1×10^4 亿美元。这些成就，对我国微电子技术发展将有很大影响。

我国微电子技术欲赶上世界先进水平,不应简单从数量上,更不能从品种上,主要是要从质量上。对于产品,与时间有关的质量指标便是可靠性。所以,只有可靠性水平上的提高,才是真正的提高。目前,我国16K DRAM正在研制之中,4K DRAM可以小批量高成本本地生产,真正投入使用并可以批量生产,且有一定可靠性指标的是中规模集成电路。其额定失效率 λ_b 为 10^{-6} /小时,现场减额使用可达 10^{-7} /小时,甚致更低的水平。而中小功率管,国内最高水平 $\lambda_b=10^{-6}$ /小时,有些厂家的产品,有些功率器件根本谈不上可靠性指标。而目前美国64K DRAM的基本失效率 $\lambda_b \leq 10^{-4}$ /小时^[13],日本相应产品的 λ_b 将低2倍。至于4K RAM,在1978年就达到了 10^{-7} /小时100菲特以下^[14]。

提高我国半导体产品的可靠性,关键是可靠性物理的研究工作要迅速开展。结合国际上可靠性物理学研究的新成就,有哪些工作需要急需开展的呢?我认为,有如下八个课题应立即着手进行:

1. 半导体器件生产过程中沾污(contamination)源的控制和检测。

半导体技术发展的历史,就是与沾污斗争的历史,器件可靠性提高的历史,也是与沾污斗争的历史。来源于人体、水、气、化学试剂、工艺设备、工艺过程及硅片本身的沾污,在器件的内部引入许多质量缺陷或潜在缺陷,后者往往更为有害。在 $t=0$ 时刻,它对器件不产生影响,但是,在工作应力、环境应力的激活下,便导致器件参数退化,甚致引起致命失效。世界各国均认为,如何控制、检测微量的沾污源(一般在ppm以下,甚致到ppb水平)是发展微电子技术的关键。目前,采用微机控制的美国Airco公司生产的检测系统,检测精度可达0.05—0.1 ppm、颗粒精度达 $0.1 \mu\text{m}$ 。控制尘埃颗粒度已由0.5微米发展到0.3微米、0.12微米。

现在VLSI生产车间,不是100级而是10级。在各种沾污源中,尤其 Na^+ 的沾污仍是器件生产中的大敌。分析表明,每克硼硅玻璃中含有 7×10^{20} 个 Na^+ ,每克 H_2O_2 中含有 $\frac{995}{10\text{亿}}$ 个 Na^+ , H_2SO_4 中含有 $\frac{220}{10\text{亿}}$ 个 Na^+ , HNO_3 中含 $\frac{87}{10\text{亿}}$ 个 Na^+ , HCl 中含 $\frac{15}{10\text{亿}}$ 个 Na^+ ^[15]。这些 Na^+ 足以导致MOS电路的不稳定。1978年,有人分析表明,HMOS失效机理分布中,67.0%是来源于 Na^+ 的沾污^[16]。 Na^+ 沾污不仅影响阈值电压 V_T 的漂移,而且导致一种所谓“与时间有关的薄 SiO_2 层的击穿”,即TDDB。TDDB将是对16K,64K乃至256K MOS电路很严重的失效威胁^[17]。

另一个沾污源是微粒。小至0.5微米的微粒足以导致栅氧化层上形成针孔,引起栅击穿,而栅穿仍是MOS电路的主要失效机理。现代VLSI栅长仅有2.5—3.0微米(64K),256K仅有1.5—2.0微米。显然,生产车间超净室内的除尘技术将面临革新。据最新报导,采用电晕放电技术净化半导体晶片效果很好。^[18]

在器件生产过程中,最大的,也是最难以解决的沾污源是人。人周身的毛孔是钠离子的微小发生器,人的皮肤和毛发是最大的微粒源。更为重要的是,人是随晶片而运动的,所以,晶片受沾污的机率更大。

1985年国际可靠性物理年会上,美国RADC(罗姆航空发展中心)R. W. Thomas博士^[19]揭示了1984年美国一次空间发射失败的原因,就是一块IC受人沾污所至。因此,

如何鉴别、检测、控制，消除 VLSI 生产中人的沾污问题，无疑是提高 VLSI 可靠性及成品率的关键。为此，下述课题的开展对于当今世界 VLSI 的发展是有益的。

(1) VLSI 生产中人的沾污的鉴别、检测、控制和消除。

(2) 适用于高可靠 IC 的及 VLSI 生产线的超净工作服的研制。

(3) 适用于高可靠 IC 生产线以及 VLSI 生产线的无沾污源的机器人的研制。一旦这种光、机、电、化（光学、机械、电子学、化学）一体化的机械人的研制成功，将为全密封式的无人的 VLSI 生产线的建成奠定基础。可以预见，这将给微电子技术以及今后的社会带来巨大的影响。

2. 防止半导体器件的静电放电损伤。

器件应按静电敏感性分级生产、测试、包装、运输及使用。静电放电损伤 (ESD)，已为人所共知。但是，器件的静电损伤模型直到 1981 年国际可靠性物理年会上才为 Unger 博士提出（该论文获最佳论文奖）。^[20]

器件遭受静电放电，可以导致突发性的完全失效 (Catastrophic failure)，也可以引起潜在性失效 (Latent failure)。大量统计表明，ESD 可导致 MOS 器件输入保护网络烧毁或栅穿。这种失效约占总失效分布的 20—50%，对双极型电路占 10%。

防止 ESD 损伤的关键是提高器件抗静电放电的能力，即采取抗静电的加固设计，其中包括输入保护网络的设计，器件几何图形的设计。其次是生产中的静电防护。

不仅是 MOS 器件，就是双极型器件也是静电敏感的。人体所带的静电，足以使 3 DG6 这种晶体管 EB 结烧穿。所以，应建立器件静电敏感性手册，以便分级生产、检测、包装、运输及使用。

3. 集中力量介决塑封器件可靠性问题。

为了降低器件成本，必须采用塑封，而塑封器件的可靠性问题主要是：

(1) 由于树脂固有吸湿性，使树脂绝缘性下降；

(2) 树脂上残存离子引起器件金属化腐蚀；

(3) 树脂内应力，导致芯片破裂；

(4) 树脂、框架、芯片、热胀系数不匹配，引起热疲劳失效；

(5) 树脂中存在微量放射性铀和钍引起 DRAM 的软误差失效 (Soft error failure)。

目前，前 4 种失效机理介决得比较好，尤其是日本，塑封器件 λ_0 可达 10^{-6} /小时，可用于军工和航天工程。

而第五种失效机理，自从 1978 年国际可靠性物理年会上 T. C. May 和 M. H. Woods 提出以来，一直是个很引起人们高度重视的失效机理^[21]，尤其是高集成度的 64K，256K 出现后，对 α 粒子放射敏感性更强。

微电子器件的抗潮湿问题一直是电子工程可靠性的关键问题。从可靠性物理的角度，要研究什么问题呢？我认为，从理论上和实践上要进行微电池理论（或称微电化学理论）的研究。微电池腐蚀理论是不同于通常的电化学腐蚀。这是因为，随着 VLSI 的发展，芯片上的图形日益缩小，各种金属薄膜、介质膜，其厚度、宽度以及间距，均成微米级或亚微米级。况且芯片各点的电位、温度不等，缺陷密度的分布也不均匀。所以，一个小小的芯片上，在

器件工作时,在一定条件下,有可能有多种微电池同时存在,既有珈伐尼电池,也有单一的阳极电池,也有氧浓差电池。对于IC的内外引线,不仅有电化学腐蚀问题,还有应力腐蚀问题。此外,研究防潮湿的对策,既包括寻求高稳定度的、致密的介质膜,也包括新型的管芯、结构、封装的设计。所以,从理论上揭示这种失效的本质,从实践上研究其防护的对策,对提高器件的可靠性,延长其使用寿命,将具有重要的意义。从经济效益来讲,这种课题的开发,不仅具有直接的、微观的经济效益,而且具有间接的、宏观的经济效益。

4. 加强器件筛选理论、筛选程序的研究

如何针对器件的可靠性要求及器件生产水平进行筛选,如何制定最佳筛选程序,目前在我国尤为重要。

5. 加强半导体器件抗过电应力失效的研究。

整机(系统)的电磁兼容性一直是我国电子装备的可靠性主要问题。器件本身必须进行抗过电应力失效的加固技术,其中包括器件的几何尺寸、金属化种类、IC的布线、热设计等,均要给予考虑。这种加固技术,在机-电一体化,机械电子学发展的今天尤为重要,器件的抗电磁脉冲的干扰能力直接关系到整机(系统)生产中所谓“柔性”系统的可靠性。

6. 半导体器件核加固技术

器件的核加固技术,美、苏、日、法均大力发展,这种技术不可能引进,我们必须自力更生。

7. 敏感器件可靠性的研究

当前,敏感器件、敏感IC在国际上飞速发展,在我国也有一股“敏感器件热”。做为人工智能系统的“五官”的敏感器件,其可靠性尤为重要。其主要问题是特性的稳定性、重复性、抗干扰性。

8. 国家投资成立由高等院校、研究所、工厂三结合的可靠性物理研究中心

可靠性物理学是一门物理加工程技术的边缘学科。从事该学科研究的人材,必须拥有广博的理论基础、实验技能和数据处理能力,研究所要拥有先进的分析仪器和设备。根据国外经验,这种人才的培养,这种实验室的建设,必须国家投资,三结合进行。大家知道,美国RAC(Reliability Analysis Center)在世界上是享有盛名的,出版许多失效分析报告。该中心就是由罗姆航空发展中心(RADC)和伊利诺理工学院研究院(IITRI)联合筹办的,对微电子产品的可靠性问题提供广泛的咨询业务,例如FMEA/FMECA业务。(Failure Moder and Effect Analysis/Criticality Analysis)

1984年3月,由美国国家科学基金会(NRF)和13家半导体公司资助,在美国亚利桑那(Arizona)大学成立微沾污控制中心(Microcontamination Control Center)。该中心配置了先进的分析仪器及设备和一大批高级技术人员^[22]。

为此,建议我们国家也应该由国家投资,集中财力,校、所、厂三结合,办起可靠性物理研究中心。

本文曾与张德有老师、陈安同志进行过有益的讨论,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 陈昭宪、曾纪科：《可靠性技术入门》，广东科技出版社，1980年，p6.
- [2] (日) 盐见·弘著，彭乃学等译：《可靠性工程基础》，科学出版社，1983年，p2.
- [3] 引自美国“Life” No. 8, 1980年，或“世界之窗”总12期.
- [4] 李宝恒等译：《微电子学与社会》，生活，读书，新知三联书店，1984年，p265.
- [5] 高光渤：我国半导体器件可靠性物理学研究的现状和展望，《第一届学术年会论文选》中国电子学会，可靠性与质量管理专业学会编，p. 1.
- [6] (日) 盐见·弘著：杨家铨等译《失效物理基础》，科学出版社。
- [7] J. Bardeen and W. H. Brattain, The Transistor, A Semiconductor Triode, Phys. Rev. Vol. 74, 1948, p. 230.
- [8] M. M. Atalla, et al., Stabilization of Silicon Surfaces by Thermally Grown Oxides, Bell Syst. Tech. J., Vol. 38, May, p. 749—783 1959.
- [9] D. R. Kerr and D. R. Young, U. S. Patent 3303059.
- [10] J. R. Black, Metallization Failures in IC, Report NO. RADC-TR-68-243, New York, October 1968.
- [11] F. Bergmann and D. Gerstner, Some new aspects of thermal instability of the current distribution in power transistors, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-13, p. 630(1966).
- [12] B. L. Gregory, B. D. Shafer, Latch-up in CMOS IC, IEEE Trans. Nuclear Science, Vol. NS-20, 1973, p. 293.
- [13] 《电子简报》，电子部一所，16期，1984，6. 20.
- [14] H. A. Batdorf, et al., Reliability Evaluation Program and Results for a 4k Dynamic RAM, Proc. of Int. Rel. Phy. Sym., 1978, P. 14
- [15] W. R. Knolle, et al., Monitoring Sodium Contamination in Silicon Devices and Processing Materials by Flame Emission Spectrometry J. of The Electrochemical Society No. 8 1973, p. 1106.
- [16] S. Rosenberg, et al., HMOS Reliability, Proc of Int. Rel. Phy. Sym., 1978, p. 19.
- [17] S. P. Li, et al., Model for Mos field time dependent breakdown, proc. of Int. Rel. Phy. Sym., 1978, p. 132.
E. S. Anolick, Application of step stress to time dependent breakdown, Proc. of Int. Rel. Phy. Sym., 1981, p. 23.
- [18] 电子简报，电子部一所，34期，1984，12. 10.
- [19] R. W. Thomas, et al., The identification and elimination of human contamination in the manufacture of ICs Proc. of Int. Rel. Phy. Sym., 1985.

-
- [20] B.A.Unger, Electrostatic Discharge Failures of Semiconductor Devices, Proc. of Int. Rel. Phy. Sym., 1981, P.193-199
- [21] T.C.May and M.H.Woods, A New Physiscal Mechanism for Soft Error in Dynamic Memories, Proc. of Int. Rel. Phy. Sym., 1978, P.33
- [22] Industry News Update, Microcontamination Control Center, Solid Stat^e Tech. vol.27, No.6, 1984 P.26