

# 微电子工艺可靠性研究\*

杨虹

(重庆邮电学院,重庆 400065)

**摘要:**可靠性是产品质量的重要组成部分,微电子工艺可靠性是保证IC产品可靠性的关键一环。从IC生产环节考虑,详细讨论了微电子工艺可靠性及其保证措施,重点讨论了原材料控制、设备与工艺控制及洁净环境控制的重要性,这些因素是生产高可靠性IC产品的有力保证。

**关键词:**可靠性;微电子;集成电路

中图分类号:TN406 文献标识码:A

## Reliability Study of Microelectronics Process

YANG Hong

(College of Optoelectronics Engineering, CUPT, Chongqing 400065, P. R. China)

**Abstract:** Reliability is very important to product quality and the reliability of microelectronics process is one of the most important factors to high quality IC products. According to the production of IC, this paper discusses in detail the conception of microelectronics process reliability and measures taken to keep the quality. Especially, the study also deals with how to control the raw materials and processed materials, equipment, and technics control and clean environment. All these factors are necessary guarantee of manufacturing IC production with high reliability.

**Key words:** reliability; microelectronics; IC

随着微电子技术及其产业的发展和进步,半导体器件从分立走向集成,从SSI发展到ULSI,现在已可将近1亿个器件集成在一块芯片上。由于器件尺寸不断缩小,且电路功能日趋复杂,因此,可靠性问题也愈显重要。

IC(集成电路)的应用已渗入到国民经济各部门,其可靠性的提高就更为重要。

可靠性工作涉及的面很广,一方面,它包括产品的开发研究、设计、制造、包装、贮存、运输和使用维修等各个环节;另一方面,在电路结构、材料、设备、仪器、工具、加工制造、工艺控制、质量管理等方面,都与其有关系。

## 1 可靠性的定量描述

### 1.1 可靠度 $R(t)$

可靠性是指产品的寿命特点、使用维修情况、完成任务的能力大小,是产品质量的重要指标之一。可靠度是指产品在规定的条件下,在规定的时间内,完成规定功能的概率。表示为

$$R(t) = P\{\xi > t\}$$

也可近似表示为

$$R(t) \approx \frac{N - n(t)}{N} = \frac{N(t)}{N}$$

式中, $\xi$ 为随机变量(即产品寿命); $N$ 为进行试验的

\* 收稿日期:2001-10-15

作者简介:杨虹(1966-),男,四川蓬溪人,重庆邮电学院副教授,研究方向为电子学与通信。

产品总数;  $n(t)$  为试验到  $t$  时刻失效的总个数;  $N(t)$  为工作  $t$  时刻仍在正常工作的产品数,  $R(t)$  反映了产品在  $[0, t]$  时间内完好的概率。

### 1.2 失效概率 $F(t)$

失效概率是指产品在规定的条件下在时间  $t$  以前失效的概率, 也叫不可靠性(度), 表示为

$$F(t) = P\{\xi \leq t\} \approx \frac{n(t)}{N}$$

由概率论知:  $R(t) + F(t) = 1$

### 1.3 失效概率密度 $f(t)$

失效概率密度是指产品在  $t$  时刻的单位时间内发生失效的概率, 它反映了在  $0 \rightarrow +\infty$  的整个时间轴上的分布情况, 说明器件在各时刻失效的可能性, 是  $F(t)$  的微商, 若  $F(t)$  连续, 则

$$f(t) = F'(t)$$

即  $F(t) = \int_0^t f(x) dx$

$f(t)$  可近似表示为:

$$f(t) \approx \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta n(t)}{N \Delta t}$$

式中,  $\Delta n(t)$  表示  $(t, t + \Delta t)$  失效的器件数。

可见:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(x) dx = \int_t^{+\infty} f(x) dx$$

显然,  $R(0) = 1$ , 而  $R(\infty) = \lim_{t \rightarrow +\infty} R(t) = 0$ , 即产品开始处于完好状态, 而最终都要失效。

### 1.4 瞬时失效率 $\lambda(t)$

瞬时失效率是指在时刻  $t$  尚未失效的器件在单位时间内失效的概率, 它反映了在各个时刻仍在正常工作的器件失效的可能性。在时刻  $t$  完好的产品, 在  $(t, t + \Delta t)$  时间间隔内失效的概率为

$$P\{t < \xi \leq t + \Delta t | \xi > t\}$$

在单位时间内失效的概率为

$$\lambda(t, \Delta t) = \frac{P\{t < \xi \leq t + \Delta t | \xi > t\}}{\Delta t}$$

因为事件  $t < \xi$  被包含在事件  $t < \xi \leq t + \Delta t$  之中, 若事件  $t < \xi \leq t + \Delta t$  发生, 则必导致事件  $t < \xi$  发生, 故有:  $(t < \xi \leq t + \Delta t) = (t < \xi \leq t + \Delta t) \cap (t < \xi)$ 。

由概率乘法公式:

$$P\{t < \xi \leq t + \Delta t\} = \frac{P\{(t < \xi \leq t + \Delta t) \cap (t < \xi)\}}{P\{\xi > t\}} = \frac{P\{t < \xi \leq t + \Delta t\}}{P\{\xi > t\}}$$

则

$$\lambda(t, \Delta t) = \frac{P\{t < \xi \leq t + \Delta t\}}{\Delta t \cdot P\{\xi > t\}} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t \cdot P\{\xi > t\}}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow +\infty} \lambda(t, \Delta t) = \lim_{\Delta t \rightarrow +\infty} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

即

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{F'(t)}{1 - F(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)}$$

故得

$$\lambda(t) dt = -\frac{1}{R(t)} dR(t)$$

两边取积分, 有

$$\int_0^t -\frac{1}{R(t)} dR(t) = \int_0^t \lambda(t) dt$$

所以

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]$$

$\lambda(t)$  是一个比较常用的特征函数, 其单位用  $1/h$ , 或  $\%/ (1000 h)$ , 或  $10^{-9}/h$ , 后者称为菲特 (Fit), 即 100 万个器件工作 1000 h 后只出现一个失效, 为 1 Fit。

### 1.5 平均寿命 $t_{MTTF}$ (或 $\theta$ )

平均寿命表示器件失效前的平均时间, 根据随机变量的数学期望的定义, 有

$$E(\xi) = t_{MTTF} = \theta = \int_0^{+\infty} t f(t) dt = \int_0^{+\infty} t dF(t) = -\int_0^{+\infty} t dR(t) = \int_0^{+\infty} R(t) dt$$

## 2 微电子工艺可靠性

工艺可靠性是研究 IC 工艺加工阶段如何满足 IC 产品的可靠性要求, 通过分析 IC 可靠性与工艺过程的关系, 从可靠性角度确定对相应工艺条件和工艺参数的要求, 并在不断提高工艺水平和工序能力的基础上, 加强工艺参数的检测和工艺过程的统计控制, 以保证持续生产出高可靠的 IC 产品。研究工艺可靠性问题的基本出发点有以下 3 方面。

(1) 随着可靠性水平 ( $10^{-8}$ - $10^{-9}$ /元件小时) 要求的提高, 不能只依靠传统的筛选和试验来保证产品的可靠性, 而必须从设计和制造两方面解决可靠性问题。通过可靠性设计使 IC 具有较高的“潜在可

可靠性”,通过工艺可靠性,使 IC 产品具有较高的“固有可靠性”。因此,工艺可靠性是保证 IC 产品可靠性的关键一环。

(2) IC 可靠性与 IC 质量,特别是与 IC 成品率有着很密切的关系。因此,从可靠性要求出发,对工艺的要求与提高成品率要求基本一致。

(3) 从 IC 特性参数考虑,IC 可靠性对工艺的要求有时与 IC 特性参数对工艺的要求是矛盾的,此时,确定工艺参数要求的原则应该是在优先保证可靠性的前提下兼顾特性参数的要求,综合考虑。

### 3 微电子工艺可靠性的保证

从 IC 生产涉及的主要环节考虑,需从原材料、设备、工艺控制和环境等几方面同时采取相应的技术措施。

#### (1) 原材料控制

原材料质量水平的高低和一致性程度的好坏是保证 IC 产品可靠性的首要环节。目前,国际上 IC 原材料(硅片)质量已发展到相当高的水平,以至于在采用传统的“批接收检验”方法检验时,结果的批接收率一般都接近 100%。这样就无法区分出原材料中客观存在的微小质量问题,也区分不出不同原材料供货方之间的质量差别,此时,对原材料质量的控制和管理则要采用 PPM (Part Per Million) 和 SPC (Statistical Process Control) 技术。

PPM 技术:用百万分之几的方式表示不合格品率,它不仅仅表示质量水平在数量上的变化,而且具有“质变”的含义。

SPC 技术:对原材料,不但要求其质量水平高,而且要求每批原材料之间的质量一致性好。为此,IC 生产厂家均对原材料供货方实施 SPC 控制,不但要求供货方提供满足规范要求的原材料,而且还要求提供生产过程的 SPC 数据,以保证每批原材料的高质量并不是靠筛选、测试实现的,而是在统计受控的环境下生产出来的,从而保证高质量水平的一致性和稳定性。

#### (2) 设备与工艺控制

设备是 IC 生产的硬件基础,工艺控制相当于软件技术。要保证工艺可靠性,应尽量采用先进的设备和工艺技术,在已有软、硬件的基础上,将其有机地

结合在一起,生产出高质量的 IC 产品。

① 可靠性与工艺参数相关性分析:从设备和工艺控制角度考虑,首先是结合具体工艺过程,采用可靠性试验、可靠性模拟等技术,根据 IC 可靠性指标,针对主要失效机理,确定与可靠性关系密切的工艺参数的控制规范,这样就将表征 IC 产品可靠性的失效率指标转化为对有关工艺参数的控制要求。

② 工艺条件的优化:针对具体工艺设备,采用正交试验、响应曲面等实验设计方法,优化确定应采用的工艺条件。其“优化”的核心是保证所确定的工艺条件具有较好的“鲁棒性”,即采用这组通过优化确定的工艺条件标称值,可以使工艺参数对工艺起伏不敏感,在较大的工艺条件起伏范围内,工艺参数仍能满足要求。

③ 工序能力分析:尽管采取了优化工艺,最后实际得到的工艺参数还是会呈现一定的分散性,有一部分工艺参数仍会超出工艺规范要求。为此,应利用各种工艺参数检测技术,采集足够量的工艺参数,进行工序能力分析,以确定实际工艺满足工艺参数规范要求的能力。目前,一些微电子公司提出了  $6\sigma$  设计要求,并利用微电子测试图技术,对工艺参数进行监测,使工艺具有很高的工序能力。

④ 工艺统计控制:为了保证能持续、稳定地生产出高可靠的 IC 产品,除了上述步骤外,还应采用统计过程控制 (SPC) 技术,保证生产线的统计受控状态。

#### (3) 环境洁净度控制

环境的洁净度对 IC 产品的可靠性有很大的影响。环境洁净度用单位体积空间所含  $0.5 \mu\text{m}$  尺寸的尘埃数表示。如,按国际标准规定,100 级洁净度表示每立方英尺空间中  $0.5 \mu\text{m}$  尺寸的尘埃数不大于 100 粒,即相当与每立方米空间中  $0.5 \mu\text{m}$  尺寸的尘埃数不大于 3500 粒。在国际标准中,对每一种洁净度等级的其他尺寸的尘埃数的数目也有相应的规定。不同等级洁净度中尘埃数与颗粒尺寸的关系,如图 1 所示,图 1 中黑点对应的颗粒尺寸和尘埃数在标准中有明确规定的的数据。

从图 1 中可见,对任一种洁净度等级,环境中小颗粒尘埃数比大颗粒尘埃数多得多,呈现指数增加的关系。因为较大颗粒尘埃可能直接导致 IC 金属互

连线开路、层间短路等,使 IC 失效,成品率降低;一部分颗粒较小的尘埃,虽然还没有使 IC 失效,也未导致 IC 特性不合要求,顺利通过检验,作为合格产

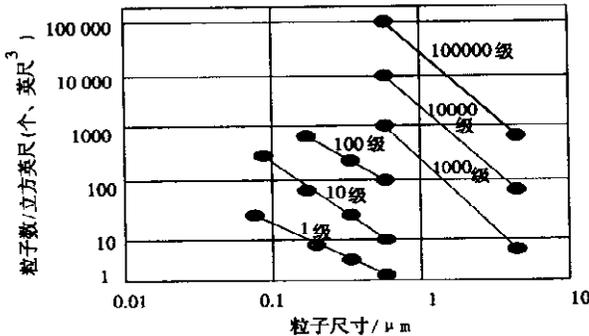


图 1 不同等级洁净中尘埃数与颗粒尺寸的关系  
Fig. 1 Relation of the number of dusts and the size of particals in different cleanness

品提供给用户,但在以后的使用中,由于小颗粒尘埃使互连线局部变窄、介质层质量变差等潜在缺陷,从而使 IC 比其他正常 IC 提前失效,引起可靠性问题。特别是随着集成度的提高,IC 线条的不断变细,同一等级洁净度的环境,呈指数增加的小颗粒尘埃将使成品率的降低程度和现场使用失效率的增加程度也呈指数增加。因此,生产环境洁净度的控制已成为保证工艺可靠性的关键因素。

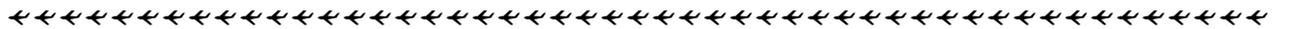
### 4 结束语

可靠性是产品质量的重要组成部分。微电子工

艺应建立系统的完备的操作规程,包括可进行工艺运行的环境和工艺设备状态要求、工艺操作程序及出现不正常状态时的处理程序和方法。工艺操作规程中要具有工艺条件的控制参数和控制方法。此外,还应有工艺的质量控制规定,包括所控制的质量参数、质量参数的检测方法及使用的仪器、质量参数的控制范围、检测抽样方法和判据,只有这样才能生产出高可靠性的 IC 产品。

### 参 考 文 献

- [1] 陆廷孝. 可靠性设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [2] 邓永孝. 半导体器件可靠性[M]. 北京:国防工业出版社,1978.
- [3] GJB546A-96. 电子元器件质量保证大纲[S].
- [4] ISO 9000-94. 国际标准化组织质量管理体系[S].
- [5] CROOK D L. Evolution of VLSI reliability engineering[C]. Proc. IRPS,1990;2-11.
- [6] YANG Ping. Design for Reliability[J]. Proceedings of the IEEE,1993,81(5):13-17.
- [7] 史保华. 微电子器件可靠性[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999. (编辑:刘勇)



(上接 55 页)

- [5] RAGHAVENDRA C S, PRASANNA KUMAR V K, HARIRI S. Reliability analysis in distributed systems [J]. IEEE Trans on Computer, 1988, 37(3): 352-358.
- [6] TSUCHIYA T, KIKUNO T. Availability evaluation of quorum-based mutual exclusion schemes in general topology networks [J]. Computer, 1999, 42(7): 613-622.
- [7] ZHAO L C, XU J C. An efficient minimizing algorithm for sum of disjoint products [J]. Microelectron, 1995, 35(8): 1157-1162.
- [8] 章文捷,沈元隆. 一种最少不交和算法[J]. 南京邮电学院学报, 1999, 19(4): 20-25.
- [9] RAI S, VEERARAGHAVAN M, TRIVEDI K S. A survey of efficient reliability computation using disjoint products approach [J]. Networks, 1995, 25(2): 147-163.
- [10] CHERKASSKY V, CHEN C I H. Redundant task allocation in multicomputer system [J]. IEEE Trans on Reliability, 1992, 41(3): 336-342. (编辑:郭继笃)