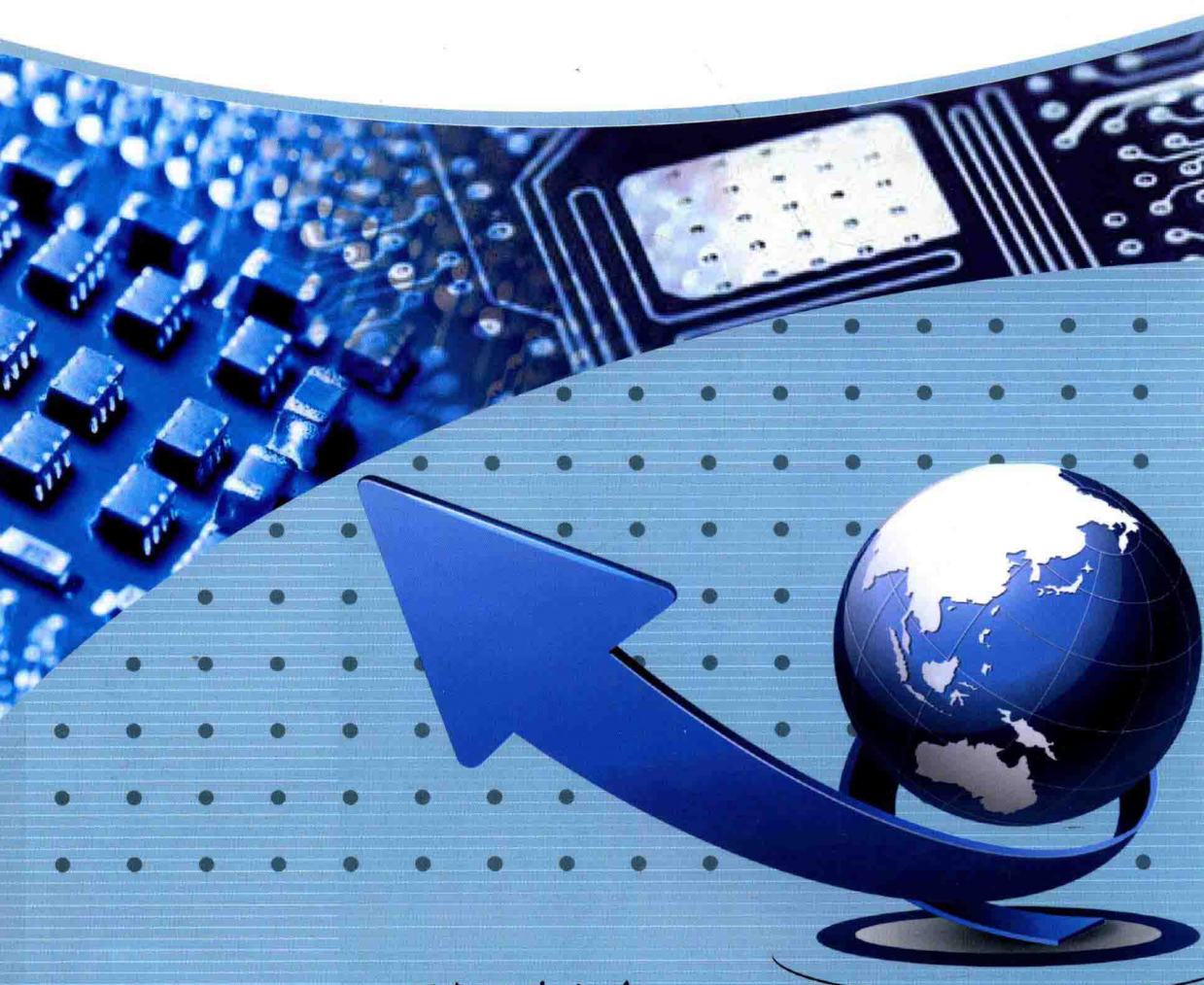


# 半导体制造工艺控制理论

王少熙 郑然 阴玥 游海龙 张淳◎著

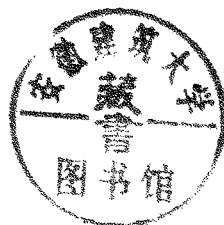


西北工业大学出版社

BANDAOTI ZHIZAO GONGYI KONGZHI LILUN

# 半导体制造工艺控制理论

王少熙 郑然 阴玥 游海龙 张淳 著



西北工业大学出版社

西安

**【内容简介】** 稳定受控的半导体制造工艺是实现芯片高可靠性水平的重要方法。本书从工序能力指数、统计过程控制和实验优化设计三个方面展开,详细讲述三种技术的常规理论和特殊应用方法和模型,并结合具体半导体制造工艺提出解决方案。本书共6章,第1章阐述半导体制造工艺控制理论概念和背景;第2章阐述单变量工序能力指数;第3章阐述多变量工序能力指数;第4章阐述常规过程控制技术;第5章阐述特殊过程控制技术;第6章给出实验设计及工艺表征的理论及应用。

本书可作为高等学校电子科学与技术、微电子学与固体电子学、管理科学与工程等相关专业的教材,也可供从事半导体质量控制的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

半导体制造工艺控制理论/王少熙等著. —西安:西北工业大学出版社,2018.4

ISBN 978-7-5612-5953-5

I. ①半… II. ①王… III. ①半导体工艺  
IV. ①TN305

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 074432 号

策划编辑:杨 军

责任编辑:孙 倩

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:陕西金德佳印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:11

字 数:265 千字

版 次:2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

定 价:49.00 元

# 前 言

随着我国集成电路产业的迅速发展,产品质量不断提高,传统可靠性增强方法遇到瓶颈,对可靠性设计和分析提出了新的要求。行业一致认为半导体制造工艺的高可靠稳定受控状态直接决定产品的内在可靠性水平。如何针对复杂先进半导体制造工艺稳定控制,实现产品的高可靠性水平成为关注重点。为尽可能全面、系统地介绍半导体制造工艺控制的基础理论体系和应用技术,编写了本书。

本书的主要内容为统计质量控制理论在半导体制造行业的应用,并针对半导体制造工艺特殊性提出新的模型算法和解决方案。要求读者具备微电子可靠性、半导体制造工艺以及数理统计等方面的基础知识。笔者从质量控制三大核心技术工序能力指数、统计过程控制和实验设计出发,阐述工序能力指数、统计过程控制和实验设计的基本理论,并针对现代化半导体制造工艺特点,详细阐述多变量工序能力指数、特殊过程控制技术以及工艺表征和实验设计内容,有助于读者在半导体制造工艺和质量控制技术之间建立起知识贯通的基本框架,为半导体制造质量控制复合型高端人才培养提供理论基础。

全书分6章,第1章阐述半导体制造工艺控制理论的概念和背景;第2章阐述单变量工序能力指数;第3章阐述多变量工序能力指数;第4章阐述常规过程控制技术;第5章阐述特殊过程控制技术;第6章给出实验设计及工艺表征理论和应用。

在本书撰写过程中,郑然参与了第2章、阴玥参与了第3章、张淳参与了第5章的编写工作,游海龙撰写了第6章,王少熙撰写其余章节并负责全书统稿。在本书的写作过程中,还查阅了国内外有关学者的著作和文章,参考了课题组多年的研究成果,包括顾凯、龚自立、万长兴、张同友、徐如清等研究生的毕业论文,在此一并表示衷心的感谢。

在此感谢樊星的大力支持,并把书送给王韬荣和王一樊两位小朋友。

由于水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

著 者

2018年1月于西安

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 半导体制造工艺可靠性	1
1.2 传统可靠性方法存在的问题	2
1.3 实现高可靠性的新思路	3
1.4 半导体制造工艺控制流程	5
参考文献	6
第 2 章 单变量工序能力指数	7
2.1 工序能力指数	7
2.2 工序能力指数与成品率关系	9
2.3 非正态工序能力指数	13
2.4 截尾样本的成品率分析	20
参考文献	29
第 3 章 多变量工序能力指数	31
3.1 空间定义多变量工序能力指数	31
3.2 成品率多变量工序能力指数	34
3.3 权重系数多变量工序能力指数	45
参考文献	46
第 4 章 过程控制技术	48
4.1 SPC 技术概述	48
4.2 SPC 基本概念	48
4.3 控制图理论	50
4.4 常规控制图技术	53
4.5 过程受控判断规则	64
4.6 多变量控制图模块	66

参考文献 .....	78
<b>第 5 章 特殊过程控制技术 .....</b>	<b>79</b>
5.1 多品种小批量生产环境的质量控制 .....	79
5.2 T-K 控制图性能分析 .....	97
参考文献 .....	110
<b>第 6 章 实验设计和工艺表征 .....</b>	<b>113</b>
6.1 概述 .....	113
6.2 统计表征与优化的技术框架 .....	115
6.3 热氧化工艺设备统计表征与优化 .....	124
6.4 等离子体刻蚀工艺设备的统计表征与优化 .....	150
参考文献 .....	169

# 第 1 章 绪 论

“质量是企业的生命”“质量就是效益”表达了人们对质量问题重要性的认识。美国著名质量管理专家朱兰(J. M. Juran)在第 48 届美国质量管理学会年会上指出,20 世纪以“生产率的世纪”载入史册,未来的世纪将是“质量的世纪”。伴随着全球经济一体化的发展,国际市场的竞争日趋激烈,与时间和成本一样,可靠性已成为企业生存与发展的主要制胜因素。广泛应用国内外先进的质量方法和质量技术对于企业提高产品可靠性、提高产品竞争力具有重要意义。好的质量是低成本、高效率、低损耗、高收益的保证;也是长期赢得顾客信任度,企业获得可持续发展的基石。尽管中国企业界最近的热点似乎集中在购并、资本经营、市场拓展、多元化等方面,但事实上,对任何一家生产制造企业来讲,高可靠性的管理、生产流程的控制,是企业发展的最为重要的“内功”之一。如何练好“内功”,不仅需要质量管理思想、方法和手段,更需要有可靠性工程技术的支持。如何利用质量工程技术,设计并生产出低成本、短周期、高质量、高可靠性的产品,由此获得竞争优势,已成为国内外广大理论研究者 and 实际工作者广泛关注的问题。

## 1.1 半导体制造工艺可靠性

由于可靠性与成品率即工艺水平有很强的相关关系,随着微电子技术的迅猛发展,集成电路的规模不断扩大,生产工艺越来越复杂,基于集成电路技术的各种新产品层出不穷,而且越来越呈现出高集成、高智能、高技术综合化的新特点。从经济规模效益和全寿命周期费用成本出发,人们对产品质量和可靠性的要求也不断提高;在经济行为中,大型整机生产厂家不但要求元器件供方的产品是来自统计受控状态下的工艺生产过程,而且还要求半导体制造生产线具有很高的工序能力,以期保证微电子产品的高可靠性和长寿命周期。

目前电子元器件生产的工艺不合格品率已降至 PPM(Parts Per Million:百万分之几)水平,一般集成电路的失效率也将降至 0.1FIT(Failures in Time)数量级,在这种情况下,评价元器件产品质量和可靠性的传统方法或因失去效果或因成本太高已明显不能满足微电子行业的发展。比如目前在国际上已达到几乎每一批产品都能通过批抽样检验的程度,这种传统的“事后”批抽样检验方法已无法区分不同厂家、不同批次产品之间必然存在的质量差别,其结果是生产厂家认为其产品质量已无懈可击,缺乏进一步提高产品质量的动力,同时元器件使用单位也无法确定哪个厂家生产的产品质量更高。

国际上从 20 世纪 80 年代初开始,在如何准确地定量评价高可靠性元器件内在质量方面进行了广泛地探索,提出了工序能力指数和统计过程控制的应用,并形成一套相对完整的质量评价与控制技术。如整机生产厂家在批量采购元器件时,不再追求元器件失效率的具体数值,转而使用工序能力指数技术对半导体制造工艺水平进行评价,通过数据证明元器件产品是出自高可靠性水平的半导体制造生产线,从而保证元器件具有很高的“内在质量”。

为了在制造过程中贯彻预防原则,贝尔实验室的沃尔特·休哈特(W. A. Shewhart)在

20 世纪初创造了基于控制图的统计过程控制理论。但是直到第二次世界大战(以下简称“二战”)爆发后,为克服军工产品质量不稳的问题并降低成本、增加产品产量、保证及时交货,美国国防部于 1942 年将休哈特等一批专家召集起来,制定了采用数理统计方法进行质量控制的战时质量管理标准。尽管该理论在第二次世界大战应用中收到很好的效果,但在战后美国成为工业强国并一个时期内在世界商贸中独霸天下,该统计方法在质量可靠性管理中并没有得到广泛应用。二战中经济遭受严重破坏的日本在 1950 年通过戴明(W. Edwards Deming)博士将统计过程控制的概念引入日本,后邀美国著名质量管理专家朱兰到日本讲学,统计方法在日本的企业中开始受到重视并得到广泛应用,而且收到了良好的效果,提高了日本产品的质量,增强了其产品的国际竞争力。

## 1.2 传统可靠性方法存在的问题

长期以来,评价元器件可靠性的传统方法有以下三种:

(1)批接收抽样检验。按照有关标准的规定,从提交的一批元器件产品中抽取一定数目的元器件进行规定项目的测试检验。若抽取的样本能通过检验,则该批产品为合格。如果抽取的样本不能通过检验,则整批产品判为不合格。

(2)可靠性寿命试验。按照相关标准的规定,抽取一定的样本进行加速寿命试验,通过对试验结果进行数据处理,评价产品的可靠性等级水平。

(3)从现场收集并积累使用寿命数据,评价相应产品的使用质量和可靠性。

但是,由于这些方法的固有缺陷,因此已无法用来即时评价当代高可靠元器件的质量水平。

### 1. 批接收抽样检验方法已不能区分高水平产品之间的质量差别

批接收抽样检验相当于给元器件产品是否合格制定了一个“及格”的标准。到 20 世纪 80 年代中期,随着微电子技术的迅猛发展,元器件产品总体水平的提高,国际上已经达到几乎每一批产品都能通过常规的批抽样检验。因此传统的批抽样检验方法无法区分不同的厂家、不同批次产品之间存在的差别。其结果是元器件生产厂家认为其产品质量已无懈可击,缺乏进一步提高产品质量的动力和方向。同时元器件产品的用户也无法确定哪个厂家生产的产品质量更高。

### 2. 可靠性寿命试验方法已进入“死胡同”

常规的可靠性寿命试验方法是依据抽样理论,抽取一定数量样品,进行规定时间的加速试验,然后根据试验结束时的失效样品数,判断该批元器件的可靠性是否达到某一水平。试验样品数与可靠性水平密切相关。表 1-1 是一个具体实例。

表 1-1 失效率与可靠性试验样品数的关系  
(1 000h 加速寿命试验)

失效率水平	允许 0 失效	允许 2 个失效
1 000FIT	355	835
100FIT	3 550	8 350
10FIT	35 500	83 500



由表 1-1 可见,评价 1 000FIT 失效率,即可靠性水平为 6 级,只需几百个元器件。如果要评价 10FIT 失效率,即可靠性水平为 8 级,则需要几万个样品。

图 1-1 所示为 Intel 公司 CPU 器件失效率的变化。当今,CPU 电路失效率只有 10FIT 左右。一般集成电路的失效率将低至 0.1FIT。显然,由于可靠性寿命试验方法所要求的试验样品数太多,已不可能用于评价高可靠元器件的质量水平。

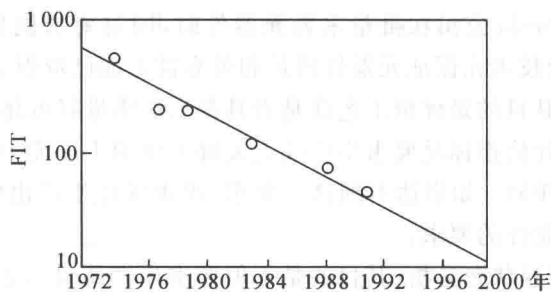


图 1-1 Intel 公司 CPU 器件失效率的变化

### 3. 现场数据采集与积累方法的“滞后性”

显然,采用现场数据积累方法需要经过一定的现场使用时间以后才能对一种元器件的质量和可靠性水平做出评价。对于新研制的品种,这种“滞后性”问题更加突出。如果考虑到由于保密和其他人为因素给数据采集和积累带来的困难,更加限制了现场数据采集与积累方法在评价元器件质量和可靠性方面的适用性。

## 1.3 实现高可靠性的新思路

### 1. 基本观点

基于上述问题,从 20 世纪 80 年代开始,国际上在如何即时定量评价高可靠元器件内在质量方面进行了广泛的探索。根据下述基本原理,形成了一套有效的评价方法。

(1) 可靠性是靠设计、制造出来的,因此可以通过对设计和工艺的评价来评价可靠性。

(2)  $t=0$  时的“失效”决定了成品率, $t>0$  以后的失效决定了可靠性。也就是说元器件的可靠性与成品率有很强的相关性。Intel 公司通过对近 100 万个芯片的试验,得到反映可靠性水平的老化成品率  $Y_r$  与中测成品率 (Sort Yield) 的关系如图 1-2 所示,表现出很强的正相关关系。中测成品率越高,老化成品率也越高,而且数据分散性越小。因此可以通过对成品率的评价来反映元器件的可靠性水平。

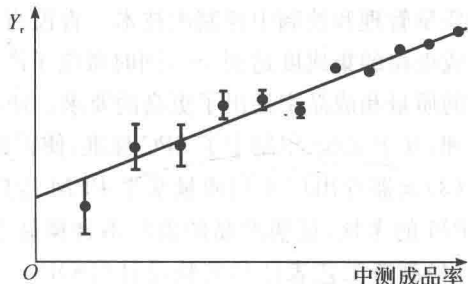


图 1-2 老化成品率与中测成品率之间的关系

(3) 从工艺角度考虑,影响元器件质量和可靠性的原因是工艺中总要产生“缺陷”。如果缺陷趋于零,则工艺成品率趋于 100%,而失效率趋于 0。因此,工艺成品率的评价能反映出产品的质量 and 可靠性水平。

(4) 只有工艺过程稳定受控,才能持续地生产出质量好可靠性高的元器件。

(5) 在工艺水平一定的情况下,提高设计水平,特别是通过优化设计,确定参数最佳中心

值,扩大允许的参数变化容限,就能提高产品成品率。因此,产品成品率能综合反映出设计和制造水平。

## 2. 核心技术

基于上述观点,进入 20 世纪 90 年代以后,国际上一些大型的整机生产厂家在批量采购元器件时,不再追求元器件失效率的具体数值,而是采用下述 3 项技术评价元器件产品的内在质量和可靠性。例如 Motorola 公司在批量采购元器件时,同时要求供货方提供这 3 方面的数据。事实证明,这些评价技术在保证元器件质量和可靠性方面已取得了明显的效果。

(1) 工序能力指数:其目的是评价工艺线是否具备生产质量好可靠性高的元器件所要求的工艺水平。目前采用的评价指标是要求生产线上关键工序的工序能力指数不小于 1.5。工艺不合格品率不大于 3.4PPM。如果达不到这一要求,很难保证生产出的元器件能满足大型整机厂对元器件质量和可靠性的要求。

(2) 工艺过程统计受控状态分析:其目的是不但要求生产线具有很高的工艺能力,而且要求在日常生产过程中能一直保持这种高水平的生产状态。为此,要求采用统计过程控制技术(SPC, Statistical Process Control),通过 SPC 分析,证明在生产过程中未出现异常情况。从而保证提供的元器件产品是在受控的环境下生产的,具有较高的质量和可靠性。

随着微电子技术的迅速发展,集成电路的规模不断扩大,生产工艺越来越复杂,为了满足对集成电路质量和可靠性的越来越高的要求,必须对复杂的生产工艺进行有效监控,确保生产工艺的稳定性。统计过程控制技术作为一种有效的监控手段已在海外获得了广泛的应用。

统计过程控制技术是一种量化质量管理技术,它利用数理统计分析理论,将连续采集的大量工艺参数数据转化为信息,用来制定工艺文件,纠正和改善工艺特性。SPC 技术通过分析判断生产过程的统计受控状态来实时监控生产过程的运行,使操作者可以根据情况适时做出决定,以减少工艺波动,降低系统偏差。减少工艺波动就能增加预测性,减小成品率损失,提高产品质量和可靠性。在统计过程控制技术中,控制图理论在其中有着极为重要的作用。

控制图理论是美国的休哈特博士(W. A. Shewhart)在 1924 年提出的,最早在机械制造领域获得应用并且取得了极大的成功。由于微电子工业的具体情况比较复杂,微电子制造业生产过程的质量管理和控制中控制图技术一直没有得到广泛应用。随着微电子工业的迅速兴起,当单片集成电路的集成度达到  $10^9$ ,同时微电子产品的失效率则已降低到 10FIT 水平,从而对微电路生产的质量和成品率提出了更高的要求。1986 年,美国率先采用 SPC 技术对微电路生产质量进行管理,并于 1988 年制定了 SPC 标准,使得微电路生产的成品率和可靠性有了很大提高。

(3) 元器件出厂平均质量水平 PPM 考核:要求对一段时间范围内元器件出厂平均质量水平 PPM 的考核,证明产品的出厂不合格品率 PPM 值已控制在比较低的数值上。

(4) 制造工艺表征和实验设计(DOE):半导体制造工艺是典型的多工序工艺过程。特别是在超大规模集成电路的制造中,整个工艺过程包括的工序可能达到几百道。为了获得高质量、高性能价格比的优越产品,要求对每道工序进行更为有效的工艺优化设计与更为严格的控制。半导体工艺设计与控制的基础是建立一种既符合工艺技术和工艺设备实际情况又使用方便的半导体工艺与设备模型。现代半导体制造技术对工艺设备优化和控制提出新的要求,需要建立特定工艺设备控制参数与输出指标之间更为直接的联系。

## 1.4 半导体制造工艺控制流程

建立统计过程控制体系,结合工序能力指数和PPM质量水平应用控制过程控制技术,除了解决一系列技术问题外,还包括领导者的责任与承诺、质量保证大纲的制定、培训等管理工作,以及计量、维修、原材料采购等配套工作。图1-3所示为实施半导体制造工艺统计过程控制的基本技术流程。

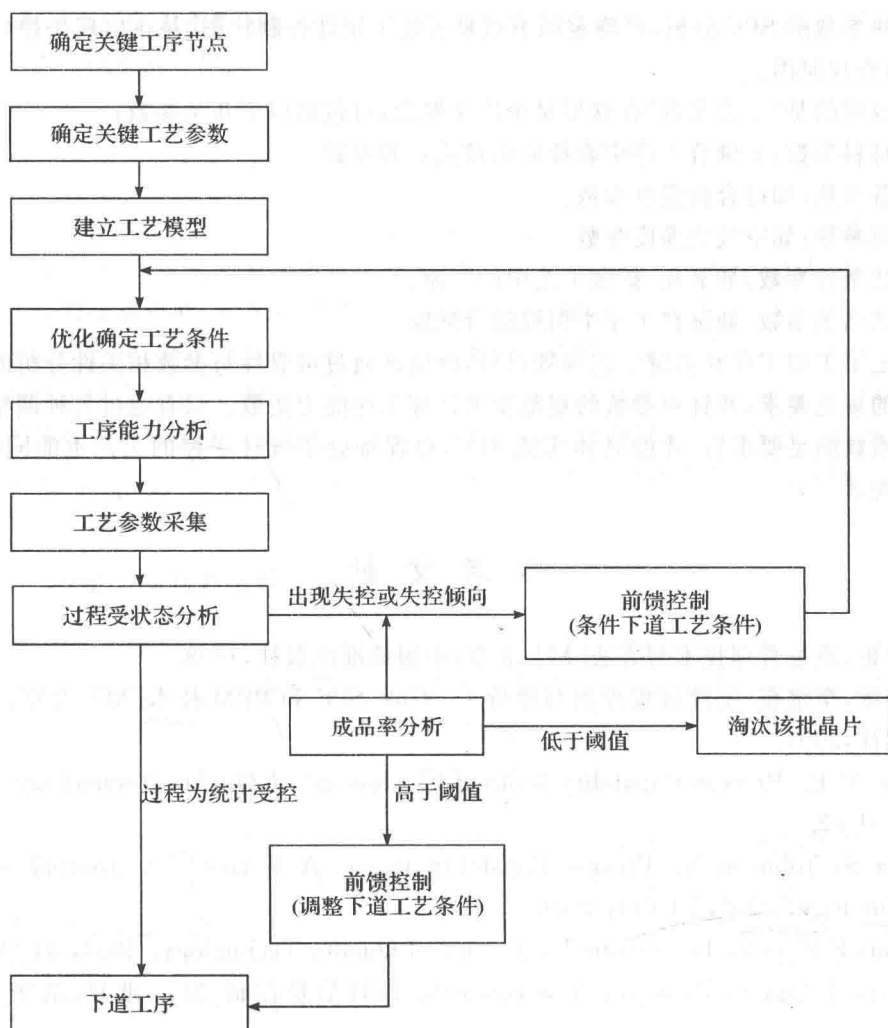


图1-3 SPC技术流程

由图可见,主要包括下述4方面工作:关键工艺过程节点及其关键工艺参数的确定(含工序能力分析)、工艺参数数据采集、工艺受控状态定量分析和过程控制技术。

(1)关键工艺过程节点。统计过程控制(SPC)中的过程(process)具有非常广泛的含义,它是指进行生产或实施服务时涉及的人员、程序、方法、生产设备、材料、测量设备和环境的集合。过程应该具有可测量的输入和输出。过程中可改变产品(服务)的形成、功能、特性及其互换性的工序、环节称为过程节点。对微电路制造工艺来说,工序多、流程长。从应用SPC的角度考

考虑,必须首先确定需要实施 SPC 技术的关键过程节点。

关键过程节点是指对最终产品(服务)的特征、质量、可靠性有重要影响的过程节点。原则上讲,除非通过统计方法或能力研究证明某节点不是关键节点,否则所有的节点均应视作关键过程节点。例如,微电路生产中,外延、氧化、淀积、刻蚀、扩散、离子注入、晶片背面处理、划片、粘片、键合、封装、引线整形和涂敷、打印标志等都应视为关键过程节点。

(2)关键工艺参数。为了定量表征关键过程节点的特性和状态,必须确定相应的关键工艺参数。关键工艺参数是指既能全面反映关键过程节点状态,又适合于参数采集的工艺参数。通过对这些参数的 SPC 分析,可确定该节点是否处于统计控制状态,并在出现失控(或失控倾向)时帮助查找原因。

需要说明的是“工艺参数”在这里是个广义概念,可包括以下几类参数:

- 1)原材料参数:如键合工序中表征硅铝丝质量的参数。
- 2)设备参数:如键合台温度参数。
- 3)环境参数:如空气洁净度参数。
- 4)工艺条件参数:如氧化、扩散工艺中的气流。
- 5)工艺结果参数:如键合工序中引线键合强度。

在确定了关键工序和关键工艺参数以后,就应该通过可靠性与参数相关性分析的方法,确定对参数的规范要求,并针对参数的规范要求计算工序能力指数。只有通过各种调整措施,使工序能力指数满足要求后,才能具体实施 SPC,以保证处于统计受控的工艺也能同时满足工艺规范的要求。

## 参 考 文 献

- [1] 朗志正,质量管理技术与方法[M].北京:中国标准出版社,1998.
- [2] 贾新章,李京苑.统计过程控制与评价——Cpk、SPC 和 PPM 技术[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [3] Kane V E. Process Capability Indices[J]. Journal of Quality Technology, 1986, 18 (1):41-52.
- [4] Kotz S, Johnson N. Process Capability Indices-A Review[J]. Journal of Quality Technology, 2002, 34 (1): 2-19.
- [5] Norma F Hubele. Discussion[J]. Journal of Quality Technology. 2002, 34 (1):20-22.
- [6] Eugene L Grant, Richard S Leavenworth. 统计质量控制[M].北京:清华大学出版社,2001.

## 第2章 单变量工序能力指数

工序能力指数是实现半导体制造工艺控制的关键技术之一,分析工序能力指数的目标就是提高工艺的高可靠性水平,从而提高产品的成品率。本章叙述了单变量工序能力指数的概念和定义,阐述工序能力指数与成品率的关系,推导样本数据为非正态分布和样本数据为截尾样本时工序能力指数的计算。

### 2.1 工序能力指数

对于稳定受控的工艺,由于不可避免地存在各种随机因素的作用,工艺参数总呈现一定的分散性。一般情况下,工艺参数遵循正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ , 其中  $\mu$  为均值,  $\sigma$  为标准偏差。 $\sigma$  的大小反映了参数的分散程度。 $\sigma$  越小,工艺参数的均匀程度越高,也就是说,包括原材料、设备、工艺技术、操作方法等因素在内的该工序在工艺参数的集中性方面综合表现好。对正态分布,绝大部分参数值集中在  $\mu \pm 3\sigma$  范围内,其比例为 99.73%。就是说,  $\pm 3\sigma$  (或者称为  $6\sigma$ ) 一方面代表了工艺参数的正常波动范围幅度,同时也反映了该工序能稳定生产合格产品能力的强弱,该范围的变化,表示该工序的固有能力强弱。因此,工序能力是指工序在一定时间内处于统计控制状态下的质量波动的幅度。

#### 2.1.1 潜在工序能力指数

$6\sigma$  表示的工序能力只是用参数分散程度反映了工序自身的固有能。显然该工序的实际工艺成品率高还低还与工艺规范的要求密切相关。为了综合表示工艺水平满足工艺参数规范要求的程度,广泛采用式(2-1)定义的工序能力指数:

$$C_p = \frac{T_U - T_L}{6\sigma} \quad (2-1)$$

式中,  $T_U$ ,  $T_L$  分别为工艺参数的上、下规范限,式(2-1)适用于工艺参数同时具有上下规范限的情形。如果工艺均值  $\mu$  与工艺参数规范中心  $T_0$  重合,则有  $\mu = T_0 = (T_U + T_L)/2$ 。在实际的工艺生产中,工艺参数的规范中心值  $T_0$  和参数的目标值  $\mu$  可能不重合。

在半导体制造生产中,有些工艺参数只规定了下限值。例如,键合工序的内引线拉力强度参数只要大于某一下限值  $T_L$ , 无上限要求。这时工序能力指数应按下式计算:

$$C_{pu} = \frac{\mu - T_L}{3\sigma} \quad (2-2)$$

若  $\mu < T_L$ , 则取  $C_{pu}$  为零,说明该工序完全没有工序能力。

如果只有规范上限的情况:如果工艺参数规范只规定了上限值  $T_U$ , 无下限要求,则工序能力指数应按式(2-3)计算:

$$C_{pu} = \frac{T_U - \mu}{3\sigma} \quad (2-3)$$

若  $\mu > T_U$ , 则取  $C_{pu}$  为零,说明该工序完全没有工序能力。

工序能力指数  $C_p$  能直接反映出工艺成品率的高低,因此就定量地表征了该工序满足工艺规范要求的能力。

### 2.1.2 实际工序能力指数

在实际的元器件生产中,工艺参数分布中心  $\mu$  与工艺规范中心值  $T_0$  相重合的情况并不多见,因为在整个工艺流程中不可能全部采用闭环工艺控制,大多采用非闭环工艺控制,因此在加工工艺参数时,不可能精确控制元器件某一工艺参数值刚好达到工艺参数规范中心值处时结束该道生产工序,一般先做试片,根据试片测试结果调整工艺条件。即使是在闭环工艺控制条件下,也只是利用工控单板机对过程主要工艺参数进行连续控制,将各个参数控制在其允许的规范范围之内,这就是质量波动的自动补偿。由此可见不管工艺条件是闭环控制还是非闭环控制,  $\mu$  和  $T_0$  往往是不重合的。根据实践统计表明,非闭环工艺条件下,工艺参数分布中心值  $\mu$  与规范中心值  $T_0$  偏移的程度一般为  $1.5\sigma$ ,图 2-1 中实线表示的是参数分布中心比规范中心  $T_0$  小  $1.5\sigma$  的情况。如果考虑到  $\mu$  与  $T_0$  之间的偏离,需要修正  $C_p$ , 定义实际工序能力指数见下式:

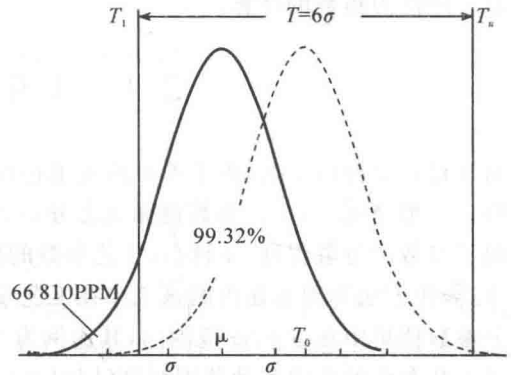


图 2-1 工艺参数分布中心与规范中心  $T_0$  偏离  $1.5\sigma$

$$C_{pk}' = \min\left(\frac{T_U - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - T_L}{3\sigma}\right) = \frac{T}{6\sigma}(1 - K) = \frac{(T_U - T_L)}{6\sigma} \left[ 1 - \frac{|\mu - (T_U + T_L)/2|}{(T_U - T_L)/2} \right] \quad (2-4)$$

其中  $K$  为工艺参数分布中心对工艺规范中心的相对偏离度。当工艺规范取为  $\pm 6\sigma$  且工艺规范中心与工艺分布均值偏离  $1.5\sigma$  时,对应的实际工序能力指数  $C_{pk} = 1.5$ , 工艺成品率为 99.999 66%, 不合格品率仅为 3.4PPM。  $C_{pk}$  考虑了工艺参数分布均值相对工艺规范范围的位置关系。  $C_p$  和  $C_{pk}$  都是针对工艺不合格品率的监测。特别的  $C_{pk}$  还能反映工序的对中性。但是,当工序质量特性值的标准偏差很小时,  $C_{pk}$  的值大小并不反映工序对中性的好坏。  $C_{pk}$  指数的这一局限性可由图 2-2 说明。

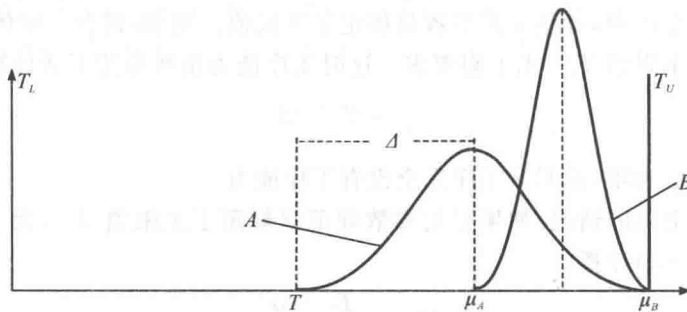


图 2-2  $C_{pk}$  局限性示意图

图示的两曲线分别代表 A, B 两个工序输出, 虽然它们的  $C_{pk}$  值均为 1, 但是它们的工序对中性确有明显的差异。特别地, 如果工艺参数分布中心落在工艺规范界限之上和之外时,  $C_{pk} \leq 0$ , 工艺成品率小于或等于 50%。此时可认为  $C_{pk} = 0$ , 说明工艺完全没有工序能力, 必须采取措施改进工艺过程的加工能力。

### 2.1.3 单变量工序能力总结

以上概述常见的工序能力指数, 实际的应用中, 还须注意以下内容:

工序能力指数能够对生产过程的生产能力给出简洁直观的信息, 而且能推算出工艺成品率水平, 尽管采用的工艺参数数据可能都满足工艺规范要求, 但是可以由这些数据推算出工艺的不合格品率。

工艺参数的分布属于非正态分布时, 常规的工序能力指数定义的理论基础就不成立, 为了仍然能够应用工序能力指数表征生产的工序能力水平, 需要提出非正态分布工序能力指数模型。

在工艺质量评价中应采用相同的工序能力指数模型, 否则不同工序能力指数的定义形式会造成分析结果的不确定性和评价不同厂家同道工序的生产能力时缺乏可比性, 得出错误的结论, 误导工程人员对工艺过程进行不适宜的干预。

为了获得更多的关于生产过程的生产能力和工艺参数的信息, 应该在获得了工序能力指数值的同时与绘制的该工艺过程工艺参数的统计过程控制图一起进行分析, 通过工序能力指数大小获得该工序生产过程的成品率信息, 从而对生产过程的生产能力有一个更全面的了解。而且生产厂家可以通过工序能力指数比较工序的生产能力, 在评价半导体制造生产线的工艺质量时它有很强的实用价值和可操作性。

## 2.2 工序能力指数与成品率关系

### 2.2.1 潜在工序能力指数与成品率关系

通常认为使用工序能力指数最原始的动机就是联系工序的成品率, 工序成品率作为表征工艺设计水平的潜在指标, 与工序能力指数值呈正相关关系。假定工艺参数  $X$  服从正态分布, 则工艺成品率为

$$\begin{aligned} \eta &= \int_{T_L}^{T_U} N(\mu, \sigma^2) dx \\ &= P(|X - \mu| < 3\sigma C_p) = P\left(\frac{|X - \mu|}{\sigma} < 3C_p\right) \\ &= 2\Phi(3C_p) - 1 \end{aligned} \quad (2-5)$$

其中  $\Phi$  为正态分布函数。若规范要求范围为  $\pm 3\sigma$ , 即  $T_U - T_L = 6\sigma$ , 则可得  $C_p = 1$ 。而对正态分布, 工艺参数在  $\mu \pm 3\sigma$  范围的比例为 99.73%, 这就说明  $C_p = 1$  对应工艺成品率为 99.73%, 相应不合格品率为 0.27%, 若用 PPM 表示则为 2700PPM。同理可以得出不同工序能力指数  $C_p$  对应的工艺成品率和不合格品率值, 见表 2-1。

表 2-1  $C_p$  与工艺成品率以及不合格品率的关系

$C_p$	成品率 $\eta$	不合格频率 (PPM)
0.50	86.64%	133 614
0.67	95.45%	45 500
0.80	98.36%	16 395
0.90	99.31%	6 934
1.00	99.73%	2 700
1.10	99.903 3%	967
1.20	99.968 2%	318
1.30	99.990 4%	96
1.33	99.993 6%	64
1.40	99.997 3%	27
1.50	99.999 32%	6.8
1.60	99.999 84%	1.6
1.67	99.999 942%	0.58
1.70	99.999 966%	0.34
1.80	99.999 994%	0.06
2.00	99.999 999 82%	0.0018

2.2.2 实际工序能力指数与成品率关系

如果对等式(2-5)进行扩展使用,在仅仅得知  $C_{pk}$  值时,用  $C_{pk}$  替换等式(2-5)中的  $C_p$  然后计算成品率值,这样得出的结果是错误的。图形显示如图 2-3 所示。

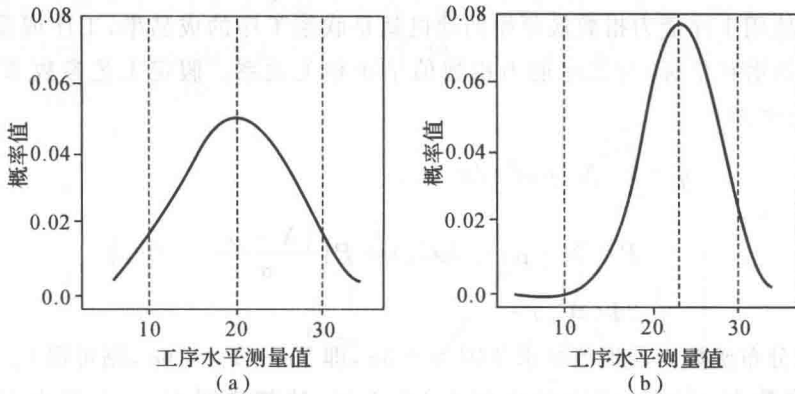


图 2-3 两道工序数据概率分布图 ( $C_{pk} = 0.50$ )

图 2-3 的(a)和(b)分别是两道不同的工序,但是它们的工序能力指数  $C_{pk}$  值都为 0.50,



而两道工序的成品率值却不同。图 2-3(a)对应的成品率  $\eta = 86.639\%$ ，图 2.3(b)对应的成品率  $\eta = 93.184\%$ 。

分析图 2-3 中两道工序对应不同的成品率的原因，主要是因为  $C_p$  表征的是工序的潜在能力，规范区间的中间值必须和样本均值重合，而实际工序能力指数没有这样的要求。因此当样本均值和规范区间中间值不重合，并且标准偏差也不一样时，可以得出相同的工序能力指数，但是成品率却不相同。

对正态分布的工艺参数，在工艺参数规范中心与工艺参数分布中心重合以及不同偏离情况下，工艺不合格品率与工序能力指数的关系如图 2-4 所示。

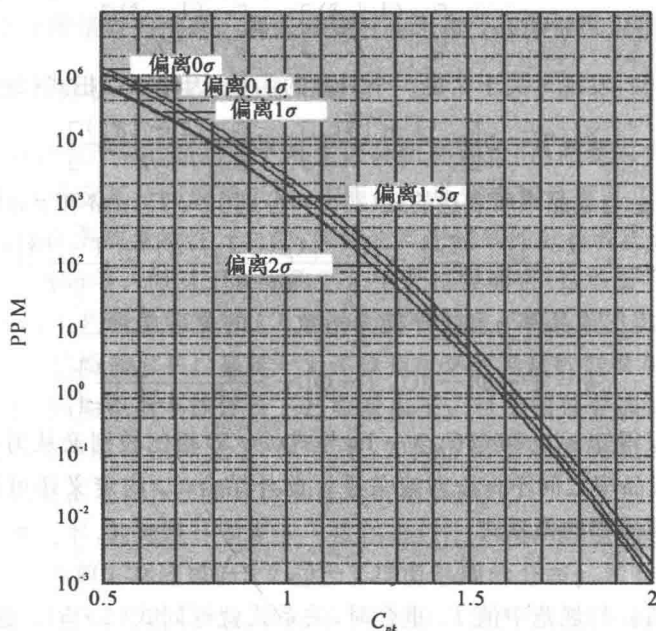


图 2-4 不同偏离情况下工艺不合格品率 PPM 值与工序能力指数的关系曲线

$C_p$  只是反映了工艺规范控制限与工序能力的相对关系，而没有反映工艺参数分布均值相对工艺规范范围的位置关系，所以它只反映了工序的加工质量满足工程标准或顾客提出的技术规格的潜在能力，当工艺参数的分布均值  $\mu$  偏离工艺规范中心  $T_0$  时， $C_p$  的定义公式失去作用。从图 2-4 中可以看出，当工艺规范中心和工艺分布均值偏离增大时，对应的工艺不合格品率曲线下移，可见  $C_{pk}$  与成品率没有一一对应的关系。因此在使用工序能力指数时，不能忽略存在偏离的情况。

通常而言，如果工序产品特性  $X$  满足正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ ，那么该道工序的成品率  $\eta$  可以表示如下：

$$\eta = P(T_L \leq X \leq T_U) \quad (2-6)$$

从式(2-6)可以得出

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - P(X < T_L) - P(X > T_U) \\ &= 1 - P\left(\frac{X - \mu}{\sigma} < \frac{T_L - \mu}{\sigma}\right) - P\left(\frac{X - \mu}{\sigma} > \frac{T_U - \mu}{\sigma}\right) \\ &= \Phi\left(\frac{T_U - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T_L - \mu}{\sigma}\right) \end{aligned} \quad (2-7)$$