

超大规模集成电路技术

工艺评价

〔日〕西泽润一 编

科学出版社

73.751
187

超大规模集成电路技术

工 艺 评 价

[日] 西泽润一 编

潘桂堂 石忠诚 译



科 学 出 版 社

1986

8610560

内 容 简 介

本书以半导体集成电路制作工艺的监测、检查及反馈为主要内容,深入探讨了工艺技术与物理化学的联系。全书共十一章,分别介绍了集成电路生产中的评价技术和控制方法、应用气相生长进行器件制作的工艺过程中控制和评价,以及应用最新的表面研究方法进行的工艺评价。同时,还介绍了干法工艺的监控法、用测试图形进行工艺检查及大规模集成电路的工艺线内检查及反馈。书后附有一篇特邀报告,介绍了反应性离子腐蚀中的表面损伤问题。

本书可供从事半导体集成电路研制、生产的科技人员阅读参考,也可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

財団法人 半導体研究振興会, 西沢潤一 編

超 LSI 技術 [4] プロセス 評価

工業調査会発行, 1981

超大规模集成电路技术

工 艺 评 价

〔日〕西沢潤一 編

潘桂堂 石忠诚 译

责任编辑 魏 玲

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年5月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
1986年5月第一次印刷 印张: 19 3/4
印数: 0001—2,700 字数: 458,000

统一书号: 15031·719

本社书号: 4483·15—7

定 价: 4.60 元

译 序

在半导体集成电路工业中,如果把生产过程简单化,就是“器件物理→电路设计→版图设计→工艺技术→检查”这样一个过程。随着集成电路进入超大规模集成电路时代,工艺过程的检查和反馈已提到日程上来,当然,倘若可能,人们更希望能进行现场监测(in situ monitor)并进行工艺过程中反馈(in process feedback),以便在整个工序中实现最佳工艺结构。

本书译自日本“半导体研究”第十七卷——《超LSI技术[4]プロセス評価》,它以将成为今后重要研究课题的现场工艺评价为主题,深入探讨了工艺技术与物理、化学的关系。各章的撰写者均为在各该领域从事创造性研究的科技人员,所述内容既有一定广度,更具相当深度。

本书共十一章,重点介绍了集成电路生产中的评价技术和控制方法、应用气相生长进行器件制作的工艺过程中控制和评价,以及应用最新表面研究方法进行的工艺评价等崭新课题。书后附有一篇特邀报告,介绍了反应性离子腐蚀中硅的表面损伤问题。

本书虽定名为超大规模集成电路技术,但所述内容对大规模集成电路,甚至对中小规模集成电路也是适宜的。所以,本书对所有从事半导体集成电路研制的科研、生产、教学人员均有参考价值。

由于我们水平所限,译文中错误之处肯定存在,希望读者批评、指正。

目 录

译序

第一章 集成电路中的评价技术	1
1.1 引言	1
1.2 为了进行工艺控制所必需的评价	1
1.3 工艺设备自动化和工艺评价	3
1.4 变质、污染的评价	8
1.5 工艺材料评价	14
1.6 性能分析和失效分析	17
1.7 结束语	22
第二章 集成电路生产中的精密控制	23
2.1 引言	23
2.2 控制的形式及其特长	24
2.3 掺杂中的控制	27
2.4 形成膜时的控制	34
2.5 腐蚀中的控制	39
2.6 光刻工序中的控制	42
2.7 做为综合系统的精密控制	44
2.8 结束语	45
第三章 硅气相外延生长及掺杂的工艺过程中控制	46
3.1 引言	46
3.2 在反应过程中同时进行分析	47
3.3 在硅气相生长的同时进行分析	49
3.4 掺杂的工艺过程中控制	58
3.5 结束语	68
第四章 硅气相生长中的工艺过程中评价	69
4.1 引言	69
4.2 对供给生长炉的气体进行工艺过程中评价	70
4.3 炉内气体状态的工艺过程中评价	79
4.4 结束语	94
第五章 CVD 的评价技术	95
5.1 引言	95
5.2 CVD 技术的展望	95
5.3 CVD 技术与半导体器件	98
5.4 评价CVD膜的方法	102
5.5 CVD膜生长时的评价	102
5.6 CVD膜质量的测量及评价	105

5.7	在实际应用中进行评价	108
5.8	CVD 膜的评价技术	109
5.9	结束语	121
第六章	反射式高能电子衍射与半导体表面	122
6.1	反射式高能电子衍射的最近发展	122
6.2	新型的 RHEED 仪	123
6.3	RHEED 法的原理	124
6.4	RHEED 法的特点	127
6.5	硅、锗表面的净化过程	128
6.6	蒸发形成表面结构	131
6.7	结束语	133
第七章	利用二次离子质谱法评价工艺	134
7.1	引言	134
7.2	SIMS 法的概要及重要性	134
7.3	微量杂质的分析	138
7.4	测量样品深度方向的浓度分布	144
7.5	观察二次离子象	153
7.6	绝缘材料的分析	155
7.7	定量分析	160
7.8	结束语	163
第八章	等离子体刻蚀及其工艺过程中控制	164
8.1	引言	164
8.2	工艺过程中控制的重要性	164
8.3	干蚀的机构	165
8.4	干蚀中的监控法	170
8.5	其他的腐蚀监测法	182
8.6	今后的课题	185
8.7	结束语	186
第九章	闪频扫描电镜在集成电路失效分析中的应用	188
9.1	引言	188
9.2	SEM 的电位反差图象	188
9.3	闪频 SEM 的原理	189
9.4	脉冲门控	191
9.5	闪频 SEM 的电子光学	192
9.6	闪频 SEM 的实例	195
9.7	用闪频 SEM 对双极型集成电路进行失效分析的例子	199
9.8	闪频 SEM 法所存在的问题	202
9.9	结束语	206
第十章	用测试图形进行工艺检验	207
10.1	引言	207
10.2	IC 研制中的测试图形	208
10.3	单项基本工艺评价测试图形	211

10.4	设计规则	221
10.5	元件评价测试图形	224
10.6	用于 LSI 研制中的测试图形	227
10.7	工艺数据处理	230
10.8	结束语	231
第十一章	集成电路、大规模集成电路的工艺线内检验和反馈	232
11.1	引言	232
11.2	大规模集成电路工艺中的评价	232
11.3	工艺线内评价及其外围技术	234
11.4	信息的归纳和整理	265
11.5	环境和材料的保全	268
11.6	结束语	273
特邀报告	反应性离子腐蚀中硅的表面损伤	274
A.1	引言	274
A.2	二氧化硅的反应性离子腐蚀	274
A.3	实验设备与腐蚀特性	276
A.4	在 RIE 中硅样品表面的污染及损伤	278
A.5	结束语	289
参考文献		291

第一章 集成电路中的评价技术

村岡久志

1.1 引言

在半导体集成电路的生产中,具备所要求电路功能的芯片在性能(包括可靠性)和经济性方面必须满足要求。硅片进行镜面研磨加工后,在上面制作多个 IC、LSI 芯片的生产工艺是由氧化、扩散,光刻等单项工艺的重复与组合来实现的。芯片在性能方面的第一道关卡是大片上的探针测试。我们非常希望封装后的测试成品率高,为此最近探针测试在性能上作了进一步的改进,使之更接近于最终测试。因而当以提高成品率或进行合理化为目的而改进工艺时,大致可用探针测试来判断改进后的效果。

但是芯片为良品也包括这种情况:即对于产品规格来说,仅其结构是正确的。在单项工艺中偏离了控制值,可在整体上却因互相补偿而成了良品。在成品率低时这种情况特别多。另外,在这种情况下,由于应用户要求而对产品规格作某些变动,或者生产条件的很小的变更,也会使探针测试的成品率下降很多。如欲稳定地进行生产和求得产品质量均一化,就需要对各个工艺参数的基准值进行精密控制。为了提高控制效果,存在着一些评价技术上的问题,诸如追加新的工艺评价方式、提高测试精度、最佳处理方式及最佳处理参数(温度、时间、时间表等)的选择等。此外,基于失效分析和动作分析(性能分析)结果的工艺评价,还将使控制精度得到提高。

另一方面,和新器件开发相关的工艺评价则稍为不同。在本质上和器件功能有关的工艺(比如 MNOS 的栅极氧化膜和 Si_3N_4 膜的形成)或者和提高性能有关的工艺(比如目的在于高速化、高集成化的图形微细化),对于所希望的电气装置将成为关键性工艺,所以,对于这样的器件进行评价时,器件本身将是一个能够检测所希望的目标功能、目标性能的测试器件,对它的评价应当是包含可靠性在内的最终测试。因为工艺本身也已高级化,在评价时,大多需要改进测试方法甚至要开拓新的测试方法。

因此,作为超 LSI 技术,人们正在进行研究的为进行微细加工和微细元件工艺所需的测试方法,就是代表上述那种意义下的工艺评价的测试方法。这些方法已在半导体研究第 14 卷,第 16 卷中详细叙述过,而且本书中关于新的工艺评价和工艺中评价的章节也很多,故在这里,我决定仅以在第十次半导体专业讲习会上,西泽先生把 PCT 改读为完美可控工艺(Perfectly Controlled Technology)这件事做为有益的线索来讲一讲在 IC 生产工艺整体控制中那些通用的工艺评价问题。

1.2 为了进行工艺控制所必需的评价

在半导体研究第 10 卷中已经说明了位错和堆垛层错显著地影响成品率,但当时认为

由未知因素引起的失效，其原因大多数是晶体的缺陷。现在，根据工作经验，我们确信，可把下述几方面控制在必要范围内的器件结构，在性能及成品率方面不会背离设计要求。对于下述几方面，如果设计时充分考虑了工艺宽余度，人们认为成品率可能达到100%。

(1) 布图及构造上的形状尺寸。各个图形的形状尺寸及图形间的相对位置，膜厚和pn结的深度，膜图形和pn结的侧面形状等。

(2) 晶体内部的杂质状态和晶体缺陷。扩散后杂质浓度分布、杂质污染程度、位错、堆垛层错，晶体与膜之间的界面状态等。

(3) 膜的物理化学性质。膜的化学组分和杂质状态，腐蚀特性、结晶性和界面状态等。

对这些方面的控制，即归结为生产工序的单项工艺的评价和控制。

器件设计完毕之后，整个生产工序的工艺结构就决定了，于是，就开始试生产。接着，把试生产所得到的器件特性数据和工艺评价数据进行比较对照，在充分审查研究的基础上，进行工艺处理参数的最佳化(因为所用设备是工厂的正式产品，所以这儿指的是设备控制参数)。如果所设计的器件达到了所希望的成品率，就转入正式生产。如果达不到设计值，就要修改原设计，有时候还需要变更工艺处理方式和改换设备机种。在表1.1中，我们举出了生产集成电路芯片(大片工艺)的主要单项工艺中的一般设备控制参数和工艺评价项目。但是，要严格地控制上述三项内容，仅表中所列举的通常使用的这些评价项目当然是不够的。

要精密地进行控制，就必须把握住必需的评价项目并建立起这些评价项目的管理标准。在器件特性数据和从广义上进行的评价结果之间，假如能够充分地进行理论上和经验上的分析及进行实验结果的归纳性处理，则将会确定在精密控制方面能有效进行反馈的工艺数据。

大片工艺，出于生产性和设备功能方面的原因，一般把数十片(一个支架的量)做为一批来处理。此外，由于半导体本身的构造敏感性，在评价时，生产条件上的微小改变都将成为巨大的误差。因而，在同一批内，在不同批之间，测量值表现出波动是屡见不鲜的。只要没有评价时的统计处理和基于丰富的经验进行的判断，反馈时就要犯大错误。此外，在工艺评价这一阶段，常常因一个劲儿地要求“时间”而失去了反馈的时机。按进行评价的时期来划分，可把工艺评价分为：

(a) 对于每一批，在单项工艺做完时，测试加工中的大片本身或测试专用的监控大片。

(b) 在加工的同时进行评价[自动工艺终点检测……现场监控(IN SITU MONITOR)]。

(c) 用特定的频度进行评价(通常由质量管理小组进行)。

(a)和(b)可以说是工艺过程中的评价。使用现场监控在自动控制中是理想的。例如，可利用这样一些现场监控：在难于进行终点检测的图形腐蚀中利用激光干涉消失^[2](图1.1)，在CDE(Chemical Dry Etching)中利用化学发光^[3]。(b)整体说来还很难，(a)和(c)中，要求快速而有效的数据处理。在(a)中，把评价用的测试仪器和计算机直接连在一起是有效的，但这是今后的问题。

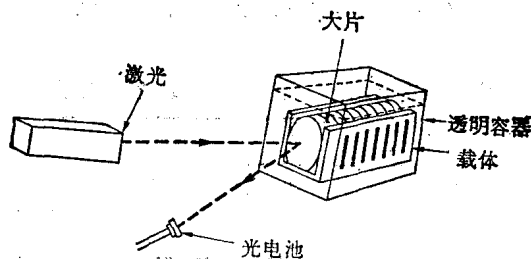


图 1.1 用激光干涉形成图形腐蚀的现场监控^[2]

由于原来就存在着下述工艺不稳定因素,所以需要进行这种反馈:

- 1) 材料大片特性上的参差。
- 2) 工艺设备动作功能的变动和可靠性低。
- 3) 工艺设备部件和油类的质量问题及退化问题。
- 4) 工艺材料的质量及劣化。
- 5) 来自环境的污染(包括操作者带来的污染)。

要解决前面提出的为了进行精密控制所需的三项内容,就必须特别留意这些项目,并使用和工艺评价相同的测量方法和管理方法,严密地进行材料评价、工艺设备评价、工艺材料评价、环境评价等方面的评价,必须进行彻底的管理。特别是设备评价和工艺材料评价、它们对工艺评价有直接影响,所以本文特别提出它们来讲一讲。

1.3 工艺设备自动化和工艺评价

生产工艺处于正常控制状态而成品率发生了变化(特别是在开始生产的初期和生产规模扩大的时期),其原因,当然有工艺本身和设备稳定性或者材料和环境上的问题,同时,操作人员能力不足、操作人员本身带来的尘埃污染,以及工艺数据分析不成熟等诸如此类的操作人员、技术人员的人为因素的影响实际上是非常大的。另外,从降低成本、缩短工期等观点来看,也强烈地要求单项工艺操作实现全自动化和无人化。在扩散工艺中,已实现了把表 1.1 列举的控制参数送进去之后,通过用设备附属的控制器(通常是一个微处理机)处理进行顺序操作,操作人员把卡片插入之后仅需把扩散舟放好就行了。如果进而把计算机和工艺评价设备直接连在一起,用计算机收集数据并进行分析,从而得以实现编制工艺控制数据和对设备控制参数进行反馈,那就有可能有效而迅速灵活地运用工艺评价数据。

1.3.1 生产工艺的计算机控制

各个公司都根据各自生产线的情况进行着大片工艺计算机控制系统的实用化,可是把内容公开发表出来的却很少^[4]。这里我们介绍一下东芝开发的控制系统^[5]。

系统的基本思想是使实现了自动化的单项工艺的生产设备的控制参数经常保持最佳状态,同时使工艺之间易于进行信息交换。这个系统用联机实时方式进行设备的操作、工艺评价数据的收集分析和工程管理等。

若把整个生产过程做为系统,则单项工艺就是一个子系统,而各个设备则是构成系统

表 1.1 集成电路主要工艺¹⁾的设备控制参数和工艺评价项目

单项工艺		工艺设备控制		工艺评价	
		设备	控制参数	评价项目	测试方法
氧化		扩散炉	氧化、扩散温度 气体流量 扩散舟出入速度 升降温速度 氧化扩散时间	膜厚(t_{ox})	椭圆仪
				外观	金属显微镜
				膜的不稳定性	测器件 MOS 特性 用平面二极管测 I_R
扩散		扩散炉		表面电阻(ρ_s) 扩散深度(x_j) 杂质剖面图	四探针法 角度研磨和染色法 角度研磨和扩展电阻法
				测试器件特性	如为双极器件 则测电压 (V_{CBO} , V_{CEO} , V_{BE0}), 电 阻和 H_{fe} 等
光刻	涂胶	甩胶机	旋转次数,滴下量	光刻胶膜厚	椭圆仪
		预坚膜炉	坚膜温度,时间	光刻胶附着力	接触角法
	曝光	掩膜对准仪	照度,曝光时间	图形尺寸 图形对准精度 分辨率 图形形状缺陷	微小尺寸测量仪, 同上,或有游标的掩膜
	显影	显影机	显影温度,显影 时间,漂洗时间		测试图形
		后坚膜炉	坚膜温度、时间		显微镜
腐蚀	湿法	湿蚀装置	腐蚀液液量 腐蚀液温度 腐蚀时间	同上 图形侧面形状	同上 扫描电镜
	干法	等离子腐 蚀装置	控制输出,气体比率, 气体流量,腐蚀时间		
离子注入		离子注入 装置	加速电压,离子电流, 注入时间,剂量, 注入温度,真空度	用剂量在现场监测, 在扩散时,测 ρ_s x_j	— } 准扩散
蒸发		蒸发装置	控制输出 真空度 蒸发速度 衬底温度	膜厚(t_{Al})	四探针测试 ρ_s
				外观(小突起等)	金属显微镜
				接触电阻(R_c)	测器件的电阻值
				污染程度	测器件的 MOS 特性

1) 略去了气相生长和 CVD.

的单元,各自具有做为控制器的微处理机。这样的几台设备连接到做为子系统的区间控制器上,并且,还有对系统全体进行控制的中央计算机(现在用的是 TOSBAC-40D, 256 KB),这就形成了三层阶梯构造(图 1.2)。这是一个考虑到将来系统扩展和设备的变更,同时还意识到情况异常时分散危险的方案。为了进行大量的数据处理,准备了能够进行高

速处理的磁盘装置 (320 MB), 并且使多数项目可以共享数据库的文件。

中央计算机的实用软件, 除去业务管理系统外, 由工艺控制系统和工艺数据管理系统构成。它们各自的业务示于表 1.2 和表 1.3。后者的大部分数据由前者输入、输出于磁盘中保持一定期间之后, 就转到磁带上。后者可以有效地用于生产管理和质量管理, 而其中的项目管理和数据分析则还要反馈给工艺控制业务部分以提供基准值。

工艺控制系统直接和操作有关。工艺控制数据编制已事先在中央计算机中记录, 只要把品种名称、批量序号输入进去, 工艺控制参数就通过区间控制器自动转送到设备控制器。如果操作控制数据用同样途径传送, 工艺设备将自动进行操作。

本系统的第一个特长是先将工艺评

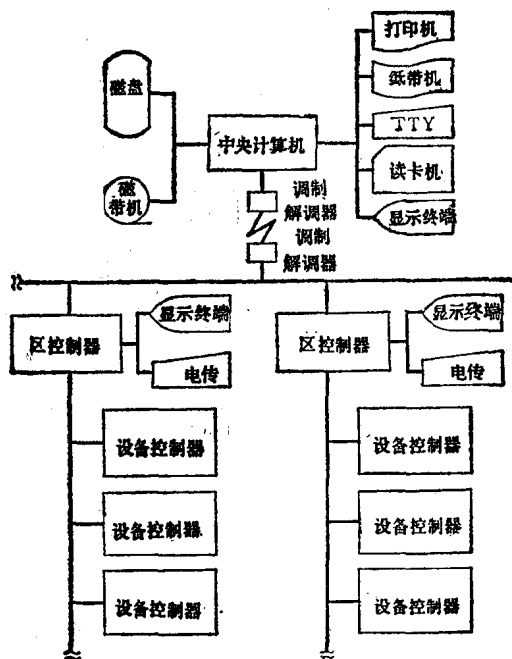


图 1.2 工艺控制系统方框图

表 1.2 中央计算机工艺控制系统的业务

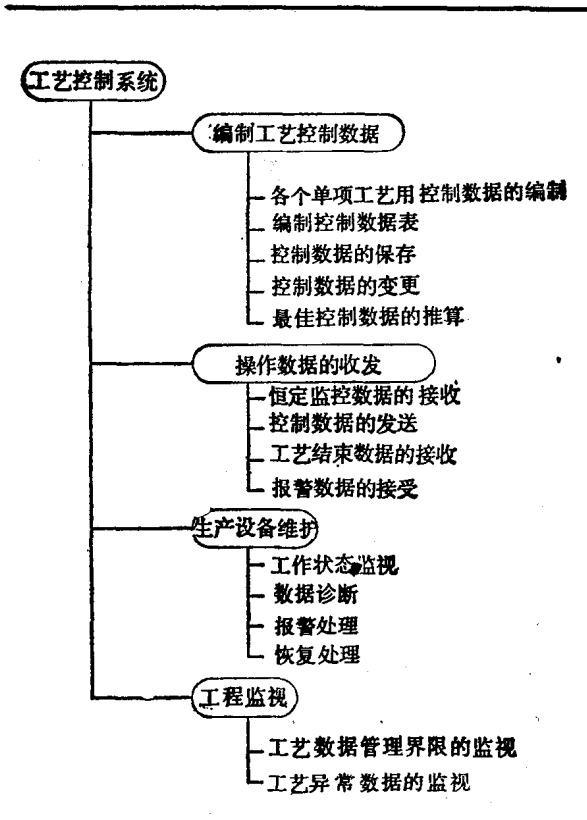
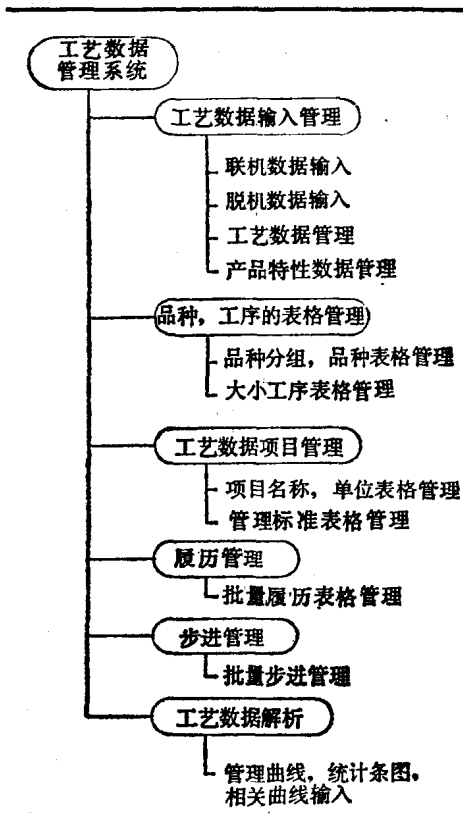


表 1.3 中央计算机工艺数据管理业务



价数据和来自管理系统的管理基准进行比较对照,然后根据经过充分审查研究的算法进行计算和补偿并进行最佳控制数据的推算,使得能进行预定的精密反馈控制(图 1.3)。此外,这个比较对照还执行工序异常监视业务。包括现场工艺评价在内,倘打算用简单的算法控制设备,则应使控制器具有闭环反馈功能。

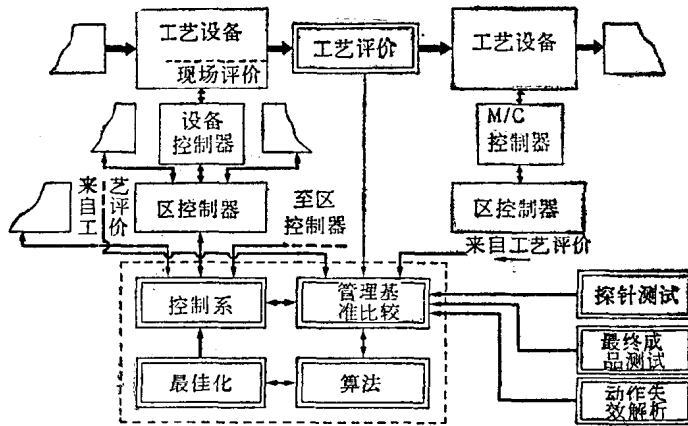


图 1.3 工艺评价的反馈

本系统的第二个特长是它具有一个维护系统。该维护系统用一定的监视周期把设备的控制参数数据由区间控制器转送到中央计算机中去,并在区控器和中央计算机两方,由CRT进行集中监视,以使工艺设备高可靠性地工作。该数据用诊断数据进行诊断,然后进行报警处理和恢复处理。下一个阶段,我们打算把故障预知效果的次要的特性值(振动值、发热量等)的监视放到这个维护系统中去。

1.3.2 工艺设备评价

在自动化生产线中,前提是设备运转稳定,所以当引入一个新设备并进行性能评价时,应当以高运转效率为进行评价的对象。至少要考虑下述几点:

- (1) 对(设备的)目的功能特性值(一般性能)当然要进行评价;
- (2) 评价包含次要的功能特性在内的环境适应性;
- (3) 对操作、调整的难易程度进行评价;
- (4) 评价是否具备包括故障预报、故障对策的软件;
- (5) 对维护保养机器需用部件的供应情况等评价;
- (6) 对生产线内部的协调情况进行评价;
- (7) 评价互换性(同机种及不同机种间的互换性);

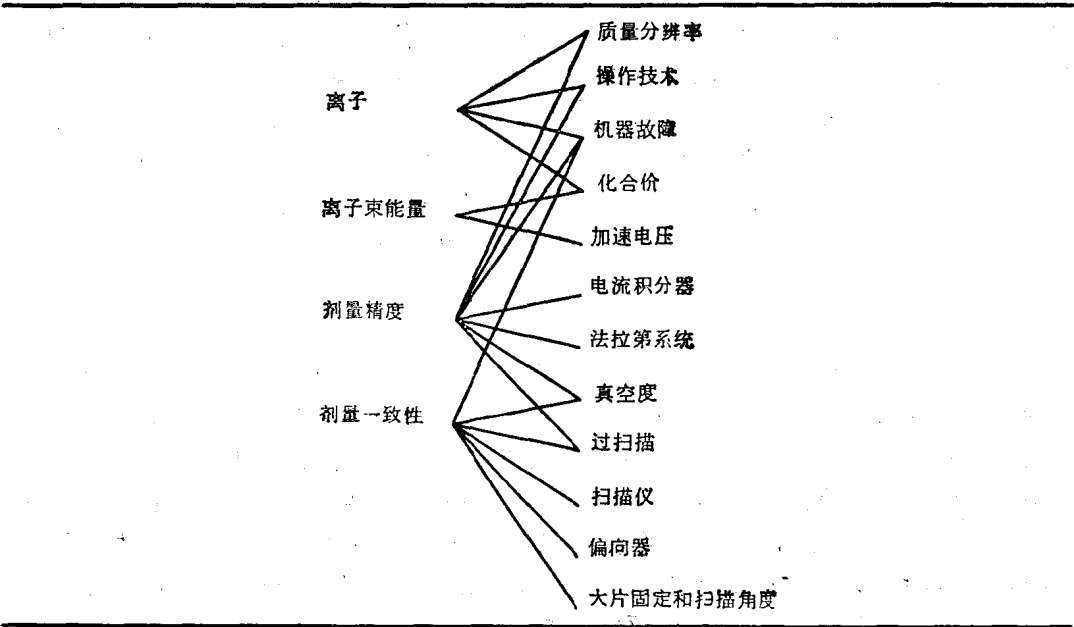
在确认功能的测试线上,要对设备精度的维持及其性能的重复性进行评价。

在设备引入之后,在充分调查类似机种的运转数据和经验的基础上,要推断设备功能劣化的图形(特别是要把部件及部件连接部分的劣化图形联系起来进行推断)并编制一个监视程序,而且以后每发生一次故障都要在分析之后进行校正。

这里,我们以被人称为单项工艺自动化中最为困难的离子注入工艺为例。在东芝,1972年,做为生产机器,首先有两台,接着又有十几台离子注入机投入批量生产中使用,可是直到最近,我们都在为部件(特别是电路和传送系统的部件)的劣化损伤之类的简单

事故伤脑筋。在自动化之前,影响离子注入重复性的参数如表 1.4 所列举的那样多。为了在不同机种之间进行校正,就必须注意离子源、离子能量、剂量精度、均匀性和重复性。

表 1.4 影响离子注入设备重复性的参数



使重复性变坏的最大因素是离子源。因为随着离子束电流的增加,离子源就变为 Freeman 的热灯丝式^[6](图 1.4)。当把此种情况做为要考虑的问题时,和束流有关系的是在腔膛之前的引出电极上的引出电压、灯丝电流和气体量。这里,灯丝材料钨表面状态不稳定,离子束也就不稳定。即使我们想施以反馈,可参数也过于多,因而灯丝是个关键,它成了工艺材料开发的问题。

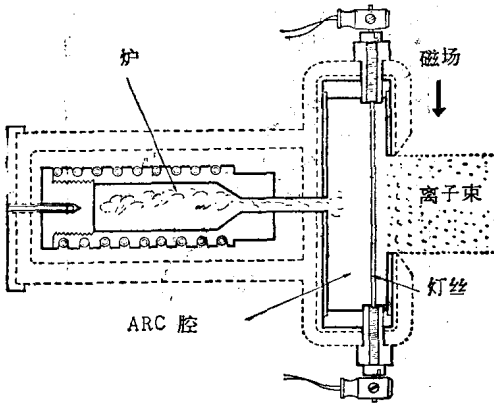
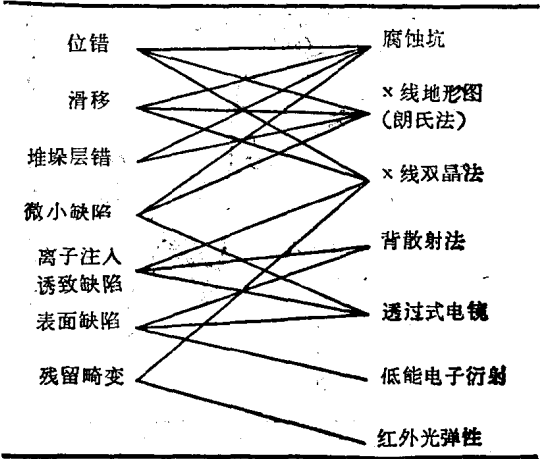


图 1.4 Freeman 离子源的构造^[6]

表 1.5 晶体缺陷评价方法



1.4 变质、污染的评价

在设备控制中,需要注意精密度的首先是与加工量和加工形状有关的那些项目。由于和器件性能有关,在工艺控制中,和精度问题犹如表里一般重要的是变质和污染的问题。从构造来看,(1) 晶体内部、(2) 膜、(3) 界面(表面)等部位均可引起缺陷和变形,也会引起异物析出和污染。它们当中,既存在象由划伤或灰尘引起的图形缺陷这类被人们认为是使成品率降低的最大原因之一的因素,也有着象晶体中的微小缺陷和界面构造那样一些一直未能从本质上进行真正分析的成分。但是随着测试技术的提高和设立了现实的管理基准,也有一些过去难以评价的现象变得可以进行有效控制了。

1.4.1 晶体缺陷和形变的评价

在 PCT (完美晶体器件工艺: Perfect Crystal Device Technology) 中,我们说过:位错会对器件的噪声、耐压、反向漏电以及对电流放大倍数的均匀性和电流对温度的依赖性等有不好的影响。然而象滑移(slip)那样的重要缺陷将使它所穿过的器件报废。在氧化和外延中诱发的堆垛层错将使结的漏电流增加。在硅材料中,人们非常关心的位错环和析出这样一些微小缺陷,由于与作为杂质而存在的氧有关、将影响吸收效应(本征吸收: Intrinsic Gettering) 并将强烈影响器件特性,关于这一点,正在不断地为人们所了解。

表 1.5 给出了上述晶体缺陷的评价方法。

下边我们以用背散射法进行晶体评价为例进行说明。所谓背散法就是用高速离子轰击样品之后,分析向后方做 Rutherford 散射的离子能量。这是用非破坏性方法测量结晶表面缺陷分布的一种方法,在半导体研究第 12 卷中曾详细地讲过^[8]。使离子束平行于结

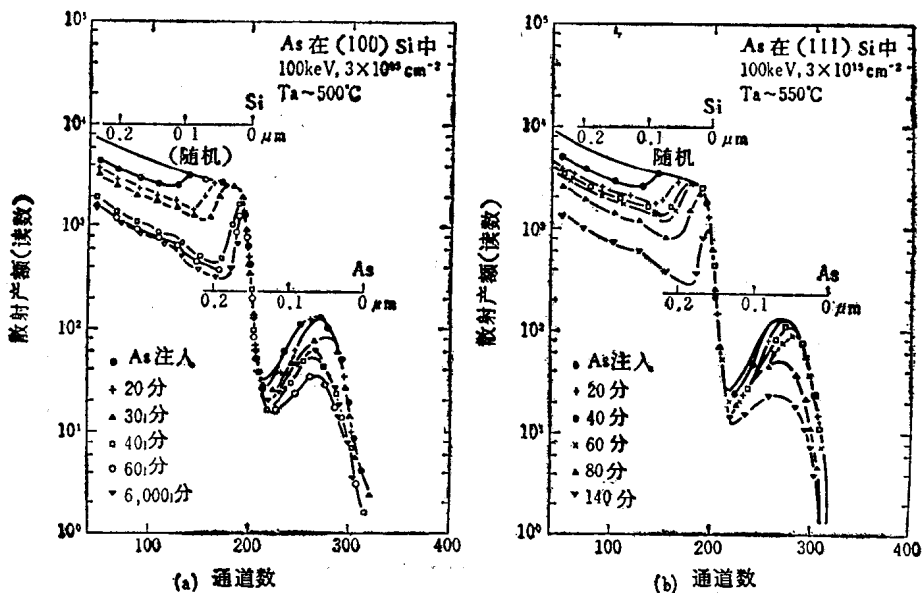


图 1.5 砷离子注入后,硅片的随机轴,主轴方向的背散射谱^[7]。(a) 主轴方向(100), (b) 主轴方向(111)

晶轴入射(主轴方向谱)则背向散射量减少,且和非平行入射条件(随机轴向谱)下的背向散射量之比 χ 成为最小($\chi_{\min}$). $\chi_{\min}$ 和样品的结晶性能有直接关系,我们可以从 $\chi_{\min}$ 的分布得到晶体缺陷在深度方向上的分布.

在图 1.5 中,我们给出了把砷离子注入(100)、(111)硅片后得到的样品,用 350 keV 的 H^+ 离子测定的背散射谱. 在注入砷的样品中,不管是(100)方向还是(111)方向的硅片,在从表面开始直到距表面约 0.1 μm 深的地方主轴方向谱和随机轴向谱很好地一致($\chi_{\min} = 1$),由此可以清楚地知道这一部分由于用离子注入所带来的损伤而呈现无定形状态. 图中给出了在 500°C 从 20 分钟到 100 小时热处理时间增加时的主轴方向谱,可以看出,无定形层((100)和(111)一样)都是从衬底方向渐渐恢复了结晶性.

另一方面,在硅的散射谱中,随着硅逐渐恢复结晶性,砷原子逐渐进入硅的结晶格点,这可用砷的减少来说明. 意味深长的是这一减少是由硅衬底一侧开始的. 在 500°C 进行热处理时,用 60 分钟,砷原子最接近于晶格. 我们可以推测,若再继续加热砷原子就会再度被从晶格赶出来.

背散射法也可用来确定化合物的组分和测定杂质浓度. 然而用它来做微区域分析是困难的. 此外,在质量数类似的样品中,是不能将类似的组分和浓度分离开的. 再者,深度方向的分辨率和分析时间不能兼容,能够用此方法进行测量的深度是几个微米.

随着片子的大形化,在工艺中出现了片子的挠曲度不断增大的问题. 这是一种热应力位错所发生的塑性形变. 微细化的光刻日益需要平坦度良好的片子. 下述测量方法用有图形的片子能够评价挠曲度:

- (1) 平坦度测试仪(光干涉法);
- (2) 电容法;
- (3) 激光反射法;
- (4) 光学测微计.

随着器件微细化而流行起来的投影曝光是用真空吸盘把片子吸住固定好,用表面边界基准点定好焦点面,并以此焦点平面为基准. 我们把高出或低于此平面的凸凹部分叫做 FPD (福科尔平面误差: Forcal Plane Deviation),要求进入焦点深度以内. 所以(1)不适合于做 FPD 的测定.

1.4.2 污染的评价

在所有工艺的前处理中,如何来洗净片子是精密控制的第一步. 长久以来,人们一直把成为氧化膜中可动离子的钠和使结特性软化的重金属做为一个问题,然而目前还是依靠吸收解决这个问题.

污染的评价也用这样一种办法进行:先用中子轰击样品然后进行分析以直接检测出污染元素. 但这种分析并不简单且要求技巧熟练,一种实用的方法是用专测污染的 MOS 和 pn 结二极管片子. 用 MOS 二极管测定 N_{FB} (平带电荷: Flat Band Charge) 及由 BT (偏置温度: Bias Temperature) 处理引起的 ΔN_{FB} (平带电荷的变动量),用 pn 结二极管测漏电流 I_R ,然后再设置管理基准. 利用清洁度非常高的片子来检验扩散炉的清洁度,反过来,我们用十分清洁的扩散炉来检验原始材料的镜面抛光片及前处理或光刻工艺等的污染.

若欲评价片子表面的污染元素,就要用表面分析法。在图 1.6 中,我们给出了适合此项目的而且设备的利用正在流行传播开来的一些方法。这些方法各有自己固有的特色,应根据样品的状态和欲评价的目的元素进行选择。而且,结果的分析也要慎重。

表 1.6 在半导体评价中使用的表面分析法

方法名称	激励粒子	检出粒子	测量面积	测量深度	灵敏度	能得到的情报
AES	电子	俄歇电子	$\phi 0.1-1$ mm	$\sim 10 \text{ \AA}$	$10^{19}/\text{cm}^3$	元素分析、结合能,化学效应引起的状态分析
SEM	电子	俄歇电子	$\phi 0.5 \mu\text{m}-$ 0.1 mm	$\sim 10 \text{ \AA}$	$10^{19}/\text{cm}^3$	表面元素分布
XPS (ESCA)	特征 X 线	光电子	$\phi \sim 1 \text{ mm}$	$\sim 10 \text{ \AA}$	~ 0.1 wt%	因元素分析、化学位移引起的结合状态(非破坏)
EPMA (XMA)	电子	特征 X 线	$\phi 1 \mu\text{m}-$ 0.3 mm	$\sim 1 \mu\text{m}$	0.05 wt%	微小部件分析
IM(M)A (SIMS)	离子	溅射离子	$\phi 2 \mu\text{m}-$ 1 mm	$\sim 3-$ $100 \text{ \AA}$	$10^{19}-$ $10^{15}/\text{cm}^3$	微小部件分析,深度方向分布(高灵敏度)
RBS	离子	背散射离子	$\phi \sim 1 \text{ mm}$	$0-n$ 个 μm	$10^{17}-$ $10^{14}/\text{cm}^3$	元素的定性、定量、深度方向分布(非破坏)结晶性评价

AES: Auger Electron Spectroscopy... 俄歇电子光谱

SAM: Scanning Auger Micro Probe... 扫描俄歇电子探针

XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy ...

ESCA: Electron Spectroscopy for Chemical Analysis ... } X 射线光电子谱

EPMA: Electron Probe Micro Analysis ... } X 射线微分析

XMA: X-ray Micro Analysis ... }

IM(M)A: Ion Microprobe (Mass) Analysis ... } 离子微分析

SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometry ... }

RBS: Rutherford Back Scattering... 背散射法(罗瑟福背散射法)

其中 AES, IMA, XPS 分别在半导体研究第 10 卷^[9]、第 16 卷^[10]和第 11 卷^[11]里讨论过,详细情况请参阅上述各卷。我们这里打算举一个为了定量研究污染元素而做的 XPS 的例子。XPS 是用具有一定能量的 X 射线辐照表面以分析此时放出的光电子能谱的方法,用它可以求出电子的结合能,可以知道表面原子的化学结合状态,还可以识别元素。

如图 1.6 所示,氟酸中的微量的铜和金吸附于浸在氟酸中的硅片上[弗劳因德利希(Freundlich)吸附],所以利用这个关系制作了吸附有各种不同数量的铜、金含量的硅片并用之做了 XPS。图 1.7 求出了铜和金的 XPS 的峰值和吸附量的关系。X 射线源是 Mg K α (1253.6 eV),是在 2×10^{-9} 托以下测量的。探针面积为 $\phi 1 \text{ mm}$ 。人们认为 XPS 的灵敏度差,然而检出限度为 10^{12} 原子/厘米²,一般认为,在检验工序清洁度时用它来做半定量分析是可能的。

以人、机械或片子本身为源的灰尘以及水和药品中浮游物等微粒子引起的污染是影响成品率的一大因素。在硅片上吸附有这些东西,其最简单的评价方法是使用人们在原始材料(镜面抛光大片)的最终检查中采用的光散射方法。这个方法灵敏度也高,即使在 $1 \mu\text{m}$ 以下也可以检测。在暗的地方将强平行光以低角度投射到被测片子上,然后从不使此光线进入人眼的方向上进行观察。