

一个集成电路工艺诊断实例

严利人 李瑞伟 徐春林

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 介绍了一种计算机自动 PCM(process control module)工艺参数分析系统,可用于集成电路制造过程中的工艺诊断和分析.在具体处理上应用了主成分分析方法,能够从大量数据中提取其统计特征,根据这一特征可找出造成工艺波动的关键因素.从所给出的具体诊断实例来看,该方法能够得出一般人工诊断所不能得出的诊断结论,效果较好,是实施严格生产控制的有效工具.

关键词: PCM(process control module); 工艺诊断; 主成分分析

EEACC: 3350E; 3355Z; 7480

中图分类号: TN407

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)12-1340-05

1 引言

集成电路的制造流程,一般说来,都包含了 100 步以上的工艺步骤;并且绝大多数的工艺步骤都涉及到复杂的物理、化学过程,因此要想得到 90% 以上的生产成品率,就必须对流程实施极其严格的质量控制.这种控制既是局部的,针对每一个工艺单步,也是全局的,针对工艺流程整体.

2000 年以来,我国的集成电路产业开始高速增长,若干大型生产线已陆续动工或开工生产.生产环境中 IC 工艺的诊断与分析、控制与优化方面方法的研究的重要性日益突显出来.

一般认为,工艺效果以设计指标为中心在一定的范围内波动.当某一工艺步骤出现问题时,与之有关的多个半导体参数的测试值(来自对工艺控制模块,即 PCM(process control module)中的各个微电子测试结构的电学自动测试)将出现大的方差,这些 PCM 参数的较大波动是工艺不稳定、成品率下降时的主要测试现象.因此希望找到一种方法,它能够从测试现象出发,反过来分析和推究造成这一现象的工艺上的原因,从而有针对性地采取改进措施,达到正确诊断工艺、控制生产、提高成品率的目的.

2 两类数据和两种方法

直接来自 IC 工厂的技术数据有两类,即在线参数和离线参数.在线参数是指产品生产过程中当场测量的一些工艺效果数据,比如在热生长栅氧化层后测量陪片的氧化层厚度,用于及时反映加工结果(如栅氧厚度)是否处在工艺要求的范围之内.离线参数主要就是上面提到的 PCM 测试数据,它包括了一些最基本的器件参数,如 NMOS、PMOS 管的开启电压,不同测试条件下的 NMOS 管、PMOS 管的开态电流、关态电流,各掺杂区方块电阻,PN 结特性等.

在线参数的优点在于可以及时提供各工艺步骤的关键信息,而缺点在于这类信息由于测试成本或其它方面的原因是不完整或不全面的.反过来上述特点又分别是离线参数的缺点和优点,离线参数只在工艺结束后测试,所以反馈不如在线参数及时,但离线参数对工艺效果的反映是全面的.事实上,IC 产品是否合格,在 IC 工厂正是以 PCM 测试数据合格与否(而不是芯片功能是否正确)为判据的.

本文遵循宁肯反馈慢一些,但结论一定要正确的原则,使用 PCM 数据作为工艺分析、诊断的依据.

如果某两个测试参数都与某步工艺有关, 例如 PMOS 开启和 NMOS 开启都与栅氧厚度有关, 则原则上可以写成:

$$\begin{cases} P_1 = f_1(T, \text{其它因素}) \\ P_2 = f_2(T, \text{其它因素}) \end{cases}$$

其中 T 为共同的工艺因素. 因为共同因素 T 的存在, 对 P_1 和 P_2 各测出一组样本值, 两组值应当彼此相关. 一个重要的现象出现在 T 因素控制得极好的情况, 当因素 T 是一个常数, 没有一点儿波动时(先进工艺至少存在这种倾向, 可以稳定地控制到这种程度), 两参数“解耦”, 两组测试值成为不相关. 所以相关分析可以指出工艺中某项工艺指标控制的程度如何, 它取决于有关变量彼此间相关系数的大小(两参数情况)或协相关矩阵的特性(两或多参数情况).

当前, 世界范围内主流的生产控制方法是 SPC (statistic process control), 尽管该方法已经成功地应用于多种行业, 但它仍然属于监控性的方法, 缺乏足够的分析能力, 并不能满足 IC 行业的工艺分析和诊断的需要.

根据上面关于相关的讨论, 以提取均值和方差并作图这样的方式工作的 SPC 控制, 其主要的缺点在于将一系列的样本数据简化成为一、两个特征参数(均值和方差). 对于两列数据, 我们可以提及相关性, 但对于两个数据(例如两个均值), 则无法提及相关性, 这样在 SPC 方法中所作的简化实际上是不恰当的, 它损失了原始测试数据间的相关联系, 而这种相关联系, 正是进行工艺研究分析所需要的. 因此说 SPC 方法只可以监控, 没有诊断功能.

本文对 PCM 参数进行多元相关性分析, 主要的数学方法是主成分分析(PCA, principal component analysis), 在下面给出其算法简介和一个具体的工艺诊断实例.

3 主成分分析

主成分的概念最初由 Karl Parson 在 1901 年提出, 1933 年由 Hotelling 将这个概念推广到随机向量^[1]. 以我们实际处理的问题为例, 其基本思想, 可以说明如下:

假定存在足够多的采样点, 例如 s 个, 在每个采样点上测试了 p 个 PCM 参数, 这样样本数据的总量是 $s \times p$ 个. 对于每一个参数的 s 个数据来说, 可以计算其均值、方差等基本统计量; 将这 p 个参数

进行归一化线性组合, 得到一个新定义参数, 并且这个新定义参数在各采样点上的数据也是可以求出的, 在所有可能的方案中取这样一个线性组合, 对新参数的 s 个样本数据计算其方差, 要求达到最大值, 称这样组合出来的新参数为第一主成分. 在所有可能的组合方案中, 取与已求出的各主成分正交且方差最大者, 依次得到第二, 第三, ……主成分. 其数学模型是^[1]:

p 个参数, s 个样本的原始数据阵写作,

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{s1} & x_{s2} & \cdots & x_{sp} \end{bmatrix} \equiv (X_1, X_2, \cdots, X_p) \quad (1)$$

其中

$$X_i = \begin{bmatrix} x_{1i} \\ x_{2i} \\ \vdots \\ x_{si} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \cdots, p$$

主成分表达式为:

$$F_i = a_{1i}T_1 + a_{2i}T_2 + \cdots + a_{pi}T_p, \quad i = 1, 2, \cdots, p \quad (2)$$

式中 T_i 为各 PCM 参数, 共有 p 个. 要求组合系数满足: (1) $a_{1i}^2 + a_{2i}^2 + \cdots + a_{pi}^2 = 1 (i = 1, 2, \cdots, p)$; (2) 各 F_i 间彼此不相关; (3) F_1 是一切线性组合中方差最大的, F_2 是与 F_1 不相关的一切组合中方差最大的, ……等等.

计算(2)式中的各组合系数的过程如下(请参见图 2):

(1) 数据标准化. 标准化方案可见公式(3). 标准化后的数据将不受量纲和数量级变化的影响.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sqrt{S_{jj}}}, \quad i = 1, 2, \cdots, s \quad j = 1, 2, \cdots, p \quad (3)$$

其中取 S_{jj} 为样本标准差.

(2) 对标准化后的各 PCM 参数按公式(4)计算相关矩阵.

$$R = (r_{ij}), \quad r_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sqrt{S_{ii}} \sqrt{S_{jj}}}, \quad i, j = 1, 2, \cdots, p \quad (4)$$

式中 S_{ij} 为样本协差.

(3) 采用 Jacobi 过关法^[2]对所得到的相关矩阵计算特征值及其对应的特征向量, 数学上可证明最

大的特征值就是第一主成分的方差,而最大特征值所对应的特征向量,它的各分量就是第一主成分写成公式(2)形式时的各组合系数。

4 工艺诊断的实例

实现工艺分析和诊断的软件系统见图1和图2,其中关键性的步骤,是利用主成分方法提取测试数据的综合统计特征。

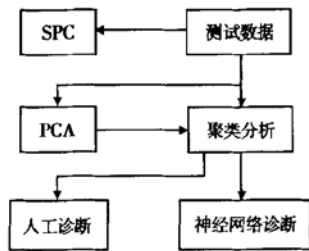


图1 工艺分析系统结构

Fig.1 A process analysis system

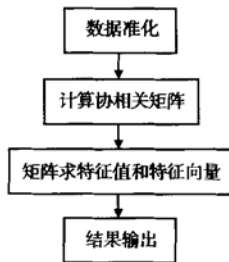


图2 主成分分析模块

Fig.2 PCA module of process analysis

取某铝栅CMOS产品,其中调开启步骤为一次注入同时调NMOS管和PMOS管的开启电压。产品的制造按批次组织,同一批的产品经历完全相同的工艺过程,可将该批的所有测试数据放在一起进行分析。取这样的一批硅片共22片,在每片上设置5个采样点,每点测试36种PCM参数,这样总的样本数据为3960个。PCM的测试在HP4062B半导体参数测试系统上程控自动完成,数据通过局部联网进入PC机,由PC机上安装的工艺分析软件进行后续处理。

对所取得的近4000个数据计算主成分,主要结论有:

(1) 数据标准化之后,全局总方差为36,其中每个PCM参数贡献1。

(2) 特征值从大到小排列,前7个特征值相加达

到29.50,占总方差的82%。这样前7个主成分最为重要,可解释总方差的82%,而其它29个主成分并不重要。

(3) 前3个主成分,计算结果如表1所示。

表1 计算结果

Table 1 Results from the PCA calculation

	F_1	F_2	F_3
特征值	11.413	6.110	4.077
NMOS管开启电压	- 0.255	- 0.086	0.068
PMOS管开启电压	0.277	0.024	- 0.125
NMOS管饱和跨导1	0.155	0.318	0.141
PMOS管饱和跨导1	- 0.262	0.079	0.161
NMOS管饱和跨导2	0.088	0.340	0.209
PMOS管饱和跨导2	- 0.252	0.126	0.187
NMOS管饱和跨导3	0.059	0.320	0.232
PMOS管饱和跨导3	- 0.241	0.131	0.162
NMOS管开态电流1	0.221	0.253	0.039
PMOS管开态电流1	- 0.257	0.040	0.122
NMOS管开态电流2	0.175	0.306	0.115
PMOS管开态电流2	- 0.262	0.085	0.167
NMOS管开态电流3	0.148	0.322	0.153
PMOS管开态电流3	- 0.263	0.095	0.169
NMOS管关态电流1	0.160	0.089	- 0.180
PMOS管关态电流1	0.143	- 0.275	0.175
NMOS管关态电流2	0.159	0.089	- 0.179
PMOS管关态电流2	0.129	- 0.179	0.166
NMOS管关态电流3	0.159	0.090	- 0.178
PMOS管关态电流3	0.108	- 0.066	0.126
NMOS管栅氧漏电1	0.130	- 0.072	0.293
PMOS管栅氧漏电1	0.137	- 0.236	0.255
NMOS管栅氧漏电2	0.078	- 0.085	0.318
PMOS管栅氧漏电2	0.174	- 0.221	0.218
NMOS管栅氧漏电3	0.093	- 0.127	0.334
PMOS管栅氧漏电3	0.170	- 0.219	0.211
.....			

(4) 表1中较大的系数值用黑体字突出出来。当工艺专家面对近4000个原始数据,要求其一眼能够看出工艺问题,终归勉强。然而如果仅考察表1中的数据特征,那么结论是非常明显的:第一主成分是关于PMOS管的,PMOS管的问题(特征值为11.413)占到全局方差的1/3;其次是NMOS管方面的问题,占全局方差的1/6;再次是栅氧质量的问题,占总方差的1/9。

(5) 考察第一主成分各系数,假设调开启注入工艺控制的不好,存在较大的波动。

(6) 由于NMOS和PMOS管同时调开启,当调开启注入工艺存在问题时,NMOS和PMOS管开启电压都会受到影响,体现为表1中对应格内较大的系数值。

(7) 调开启注入杂质为B离子,当注入的B离

子过多时, PMOS 管容易开启, 而 NMOS 管不容易开启, 反过来情形类似, 所以是一种反相关, 请注意表 1 中相应系数的一正一反. 其它系数的正负号含义相同.

(8) 没有多少工艺原因可以导致反相关, 栅氧化层中的正电荷可以算一个, 但第一主成分 F_1 的各系数中, 受栅氧电荷影响的栅氧漏电、PN 结反向特性(未列出)等影响, 其对应的系数数值都不大, 对于 F_1 方差的贡献不重要, 因而可以排除这一因素.

(9) 饱和跨导是测两次电流, 然后相减得到(令两次测试的偏置电压相差 1V). 这样饱和跨导可暂视为某种电流测试.

(10) 所有 PMOS 管电流特性均劣于 NMOS 管. NMOS 管是表面沟器件, 载流子迁移率近似为常数, 电流主要受开启影响; PMOS 管是埋沟器件, 电流除受开启影响外, 还受载流子迁移率波动的影响, 因为调开启注入的深浅、浓度有较大波动时, 实际的沟道位置、导电特性均受影响.

(11) 以上诊断结论得到近 4000 次不同测试结果的支持.

(12) 清华大学微电子学研究所的工艺线使用的是一台较老的离子注入机(15 年以上). 该注入机发生过多次硬件故障, 近 5、6 年来, 限于经费, 不曾进行过任何校准、检验, 加上工艺条件设置在机器的极限能力处, 工艺控制不好, 并不奇怪.

(13) 如果不采用 PCA 方法提取数据特征, 比如偶然想到要实测一下 NMOS 和 PMOS 管沟道区的杂质浓度分布, 由于调开启注入剂量较小(10^{11}cm^{-2} 量级), 浓度分布的测试实际上较难进行.

(14) 设浓度分布测试可行. 因为诊断结果是关于工艺波动的统计性结论, 所以要划开许多的样品硅片, 测量多个剖面浓度分布, 最终的结论才会可靠. 考虑到测试成本, 我们认为基于 PCA 的诊断, 方法本身和工艺诊断结果, 均是较优的.

至此完成了一个实际的工艺诊断.

本文从各种角度对这一实例进行了讨论, 但也只涉及到图 1 中诊断系统的主成分分析模块和人工诊断模块, 图 1 系统的其它模块及模块间的联系等, 限于篇幅, 不再赘述.

5 总结

在微电子制造业中, 需要对集成电路工艺进行

分析、诊断, 从而强化生产控制. 要达到这一目标, 在工程实践上面临着许多困难, 实际上迄今尚无合理、合适的系统性方法, 仍然只能依靠专家的人工判断. 本文将主成分方法成功地引进到对 PCM 测试参数的分析、处理之中, 使得 IC 制造的工艺诊断能够且容易实现, 取得的结果是较好的.

PCM 参数本身并不直接反映某个工艺单步的问题, 可看成是若干工艺步骤的综合指标, 本文利用 PCA 方法对 PCM 参数进行了又一次的综合, 所以主成分空间中的数据点分布特征(方向和分布范围)具有极强的表达工艺能力. 某些复杂系统, 例如国民经济系统, 通常认为单纯的一项指标, 比如工业产值, 说明问题的能力是有限的, 在那里也正是应用主成分方法来得到国民经济的综合反映指标, 从而分析、判断经济形势.

当人们认为工艺不存在问题时, 仍可应用 PCA 方法. 工艺表达为主成分空间中的某种数据分布, 它可能会有若干制造系统所决定的特殊方向, 不断地从这些方向压缩工艺波动, 直至数据分布成为主成分空间中的一个多维球, 以及持续压缩球的半径, 成为制造业进行工艺控制、优化的一个新途径.

在微电子领域, 已有一些介绍 PCA 方法应用的文章, 主要是讨论辅助设计方面^[3]或设备诊断方面^[4,5]的问题, 涉及工艺控制的文章极少.

参考文献

- [1] Yu Xiulin, Ren Xuesong. Multi-variate statistic analysis. Beijing: Chinese Statistics Press, 1999: 154[于秀林, 任雪松. 多元统计分析. 北京: 中国统计出版社, 1999: 154]
- [2] Li Qingyang, Wang Nengchao, Yi Dayi. Numerical calculation methods. Wuhan: Press of Huazhong University of Science & Technology, 1988: 350[李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析. 武汉: 华中理工大学出版社, 1988: 350]
- [3] Singhal K, Visvanathan V. Statistical device models from worst case files and electrical test data. IEEE Trans Semicond Manuf, 1999, 12(4): 470
- [4] White D A, Goodlin B E, Gower A E, et al. Low open-area endpoint detection using a PCA-based T^2 statistic and Q statistic on optical emission spectroscopy measurements. IEEE Trans Semicond Manuf, 2000, 13(2): 193
- [5] Lachman-Shalem S, Himovitch N, Shauly E N, et al. MBPCA application for fault detection in NMOS fabrication. IEEE Trans Semicond Manuf, 2002, 15(1): 60

An Example on IC Process Diagnosing

Yan Liren, Li Ruiwei and Xu Chunlin

(*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: A computer analysis that deals with the PCM (process control module) parameters is introduced. Since the principal component analysis (PCA) is preferable for extracting information in the IC design field, this multivariate statistic tool is adopted in a similar way to get answers in IC process failure. After the characteristic of the tested PCM data is described by PCA, diagnostic conclusions for a process failure can be easily obtained. This method is illustrated by an example, which is proved successful. The PCA method thus is useful for further IC process diagnosing.

Key words: PCM (process control module); process diagnosing; PCA (principal component analysis)

EEACC: 3350E; 3355Z; 7480

Article ID: 0253-4177(2003)12-1340-05

Yan Liren male, was born in 1968, associate professor. He is engaged in the research on VLSI technology and process, especially on lithography and VLSI process management.

Received 9 January 2003, revised manuscript received 18 April 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics