

К. т. н. Т. В. ШЕСТАКОВА

Молдова, г. Кишинев, Технический университет  
E-mail: t.sestacova@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
24.07—14.12 2006 г.

Оппонент к. ф.-м. н. А. Н. ПЕТЛИЦКИЙ  
(НПО "Интеграл", г. Минск)

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАДИЙ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

*Рассматривается методика исследования технологического процесса изготовления интегральных микросхем в условиях реального производства с целью повышения качества готовой продукции.*

Технологический процесс (ТП) изготовления интегральных микросхем (ИМС) является многофакторным объектом со сложной структурой внутренних взаимосвязей. Рост степени интеграции компонентов и их функциональной сложности обуславливает появление новых острых проблем в области повышения качества и надежности изделий микроэлектроники. Так, значительное увеличение выпуска ИМС тормозится сравнительно низким процентом выхода годных. Причиной этого является несовершенство как самой технологии изготовления микросхем, так и методов и средств контроля и управления.

В статье рассматривается методика исследования ТП производства кристаллов ИМС с целью повышения качества изделий электронной техники непосредственно в процессе их производства.

### Методы исследований

В силу стохастичности ТП и вероятностного характера контролируемых величин в условиях *массового производства* ИМС наиболее перспективным для решения указанных задач является математико-статистическое направление причинно-следственного подхода. Объект при этом рассматривается как некоторая система взаимодействия входных параметров с некоторой выходной целевой функцией, причем структура и степень взаимосвязи параметров в общем случае неизвестны (модель «черного ящика»). Результатом реализации этого подхода является получение на основе экспериментальных данных математических моделей процессов в виде регрессионных уравнений, описывающих механизм взаимодействия входных и выходных параметров. Получаемые математические модели используются как для диагностики состояния объектов, так и для прогнозирования их поведения, выявления тенденций и скорости изменения и развития.

В электронной промышленности накоплен определенный опыт использования этого подхода, однако моделирование в условиях *непрерывного производственного цикла*, которое учитывало бы специфику

сбора данных, а также структурные особенности и сложность исследуемых объектов, представляет собой серьезную проблему.

Как известно, эксперимент может быть специально спланирован (его тогда называют *активным*), а может быть лишь измерением значений факторов при различных состояниях объекта (*пассивный эксперимент*). В последнем случае получение информации не требует больших затрат на проведение опытов, т. к. осуществляется в непрерывном производственном цикле, хотя и занимает больше времени.

Одним из самых распространенных и давно известных методов расчета регрессионных моделей в условиях пассивного эксперимента является *классический метод наименьших квадратов (МНКК)* [1, с. 141]. Однако он обладает рядом недостатков. Как известно, свойства информации, полученной при реализации пассивного эксперимента, отличаются от свойств информации активного плана, что в конечном итоге сказывается на точности и эффективности рассчитанной математической модели. Так, нарушение свойств ортогональности, линейной независимости, нормировки столбцов исходной таблицы данных приводит к тому, что коэффициенты будущей модели являются смешанными оценками, и любое изменение формы уравнения требует пересчета всех коэффициентов заново. Кроме того, невозможна процедура статистической проверки адекватности таких моделей (например, по критерию Фишера), нет информации о степени влияния каждого фактора на целевую функцию, имеются определенные неудобства вычислительной процедуры при возрастании числа исследуемых факторов. Все это снижает точность расчетов и оперативность обработки информации и ограничивает, таким образом, возможность применения метода непосредственно в производственных условиях.

Проблему получения адекватных математических моделей с выявлением степени влияния на целевую функцию каждого рассматриваемого фактора в отдельности предлагается решать с помощью специального метода — *метода наименьших квадратов с ортогонализацией исходных данных (МНКО)* [2, 3]. В отличие от классического, метод МНКО предусматривает процедуру предварительной ортогонализации исходных данных, что позволяет получить независимые оценки коэффициентов регрессии со всеми

необходимыми процедурами статистического анализа (проверка на значимость, однородность, адекватность). Это обстоятельство и обеспечивает высокую точность, разрешающую способность и эффективность метода в условиях реального производства массовой продукции.

**Результаты исследований**

Исследования проводились в несколько этапов. Охватить весь технологический процесс изготовления ИМС в целом — практически невыполнимая задача. Поэтому на первом этапе мы ограничились лишь частью сложной производственной цепи, на выходе которой наблюдался самый большой процент брака, а именно, ТП формирования структуры ИМС на уровне кристаллов. Этот процесс состоит из множества операций, на которых действуют десятки факторов различной физической природы и различного характера проявления (вероятностные, случайные, детерминированные и т. д.) со сложной многоуровневой структурой взаимосвязей.

В качестве целевой функции можно выбирать различные параметры ТП в зависимости от цели и уровня исследований. Главное, чтобы параметр являлся комплексным выходным показателем качества (ВПК) на данном уровне. Например, это может быть процент выхода годных всего ТП или отдельных его операций. В рассматриваемом исследовании в качестве ВПК было выбрано *выходное напряжение логического "нуля"*, являющееся комплексной оценкой как самого ТП, так и его продукции. Кроме того, именно по этому параметру имелся наибольший процент брака на выходе.

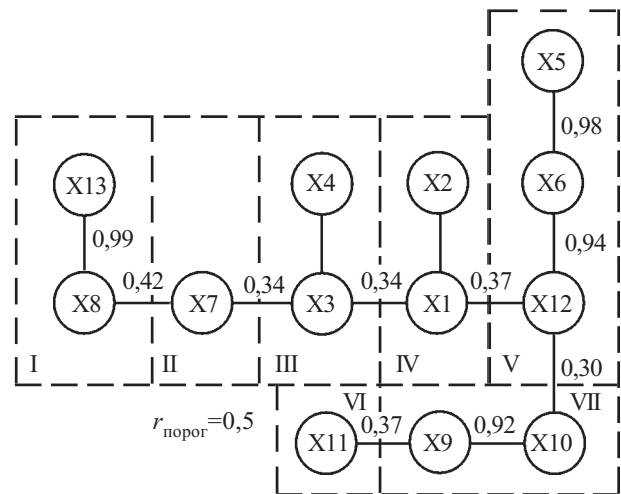
Главная сложность в исследовании подобных процессов состоит в так называемом «проклятии размерности пространства». Дело в том, что на сегодняшний день не существует эффективных методов получения математических моделей объектов, в которых действуют десятки, а то и сотни входных факторов. А процесс производства ИМС, как отмечалось выше, именно таковым и является. Поэтому необходимым следующим этапом было сокращение исходного списка входных факторов с оставлением в нем лишь сильнодействующих.

С этой целью, исходя из процесса формирования основных технических свойств изделий, а также технологических этапов изготовления пассивных и активных элементов на кристалле, была построена структурная схема формирования ВПК. На нижнем уровне иерархической схемы располагались технологические факторы процесса (температура, расход газов, длительность процессов и т. д.), на следующем уровне — электрофизические параметры (ЭФП) структуры микросхем (поверхностное сопротивление слоев, их физические размеры и пр.), затем следовали ЭФП компонентов ИМС (коэффициенты усиления, входное и выходное напряжение диодов Шоттки, сопротивление тела коллектора и др.). На самом верхнем уровне иерархии находились статические параметры — выходное напряжение логического "нуля" и логической "единицы", выбранные в качестве ВПК кристаллов ИМС. При этом учитывалась возмож-

ность измерения и контроля рассматриваемых факторов и параметров в реальном производстве.

Построение структурной схемы значительно уменьшило неопределенность в идентификации взаимосвязей параметров, однако эти связи могут быть еще достаточно сложными (пересекающимися, обратными и т. д.), что затрудняет дальнейшее моделирование. В этом случае целесообразно воспользоваться подходом, связанным с агрегированием параметров, т. е. выделением группы факторов в виде одного обобщенного фактора. Реализует этот подход так называемый метод *корреляционных плеяд* [4, с. 96], основанный на предположении, что измеряемые параметры наиболее сильно коррелируют друг с другом в том случае, когда они сильно зависят от одного и того же фактора.

Это предположение принимается за исходную гипотезу, и производится разбиение всех измеряемых параметров на такие группы-плеяды, что параметры, принадлежащие одной группе, в некотором смысле сильно коррелируют между собой, а параметры, принадлежащие разным группам, коррелируют относительно слабо. При этом матрица корреляций преобразуется в некоторый граф с учетом возрастания коэффициентов корреляции между параметрами. Фрагмент такого графа представлен на **рисунке**. Всего было рассмотрено 58 параметров, из которых после разбиения получилось 12 плеяд.



Фрагмент графа корреляционных плеяд (7 плеяд)

При выборе порогового значения коэффициента корреляции  $r_{\text{порог}}$  при разбиении необходимо учитывать как статистический, так и физический смысл исследуемой взаимосвязи. Отбрав от каждой плеяды по одному представителю (возможно, где-то по два), получаем список информативных параметров, которые в дальнейшем войдут в математическую модель. На этом этап сокращения факторного пространства завершен.

Следующим этапом исследования является определение математической модели зависимости ВПК от параметров, выявленных на предыдущем этапе.

Методом МНК были получены модели, одна из которых имеет следующий вид:

$$U_{\text{вых}}(0) = 419,7 + 5,365X_{11} + 1,970X_5 + 1,394X_1 - 0,55X_7 + 0,020X_4,$$

где  $U_{\text{вых}}(0)$  — выходное напряжение логического "нуля";  
 $X_1$  — поверхностное сопротивление скрытого слоя;  
 $X_4$  — статический коэффициент усиления транзистора;  
 $X_5$  — поверхностное сопротивление эмиттера;  
 $X_7$  — выходное напряжение диода Шоттки на кристалле;  
 $X_{11}$  — сопротивление на кристалле.

При этом были соблюдены все формальные процедуры статистического анализа, в том числе проверка на значимость коэффициентов модели и ее адекватности. В модель вошли лишь сильнодействующие факторы, выявленные по критерию Стьюдента [5, с. 331]. Но это не означает, что остальные факторы, не вошедшие в модель, не влияют на целевую функцию. Просто их влияние гораздо слабее на фоне оставшихся факторов, поэтому с риском 1—5% ими можно пренебречь.

По полученной модели можно прогнозировать поведение  $U_{\text{вых}}(0)$  в зависимости от изменения значений входных факторов путем подстановки в уравнение конкретных значений  $X_i$ . Причем достоинством уравнений данного типа является то, что значения факторов подставляются в натуральных единицах измерения, без каких-либо преобразований, что очень удобно в условиях реального производства. Кроме того, с помощью уравнения решается и обратная задача — определение величин факторов  $X_i$  для получения требуемого значения целевой функции.

Представленная выше модель описывает взаимосвязь параметров верхних уровней иерархии. Вошедшие в нее параметры, в свою очередь, формируются составляющими нижнего уровня, т. е. факторами технологических режимов. Для этих параметров также были рассчитаны математические модели, описывающие влияние разброса технологических режимов различных операций на параметры микросхем на кристалле. По модели путем корректировки параметров режимов (в пределах допустимых значений) можно скорректировать качество готовой продукции, т. е. увеличить количество микросхем с требуемыми характеристиками.

Аналогичные исследования следует проводить на различных уровнях формирования выходного показателя качества (согласно структурной схеме). При этом на одном уровне иерархии параметр может выступать в качестве целевой функции, а на другом — в качестве входного фактора. Таким образом, можно скорректировать все «узкие места» сложного многофакторного процесса.

### Заключение

Приведенные методы и результаты исследований показывают, насколько эффективно можно применять современные методы научных исследований в условиях сложных многофакторных процессов, каким является технологический процесс изготовления интегральных микросхем. В настоящее время такой подход, на наш взгляд, является единственным эффективным средством изучения одновременного влияния множества факторов, как сильно, так и слабо действующих на выходной показатель качества продукции. По полученным математическим моделям можно сделать выводы относительно причин появления изделий низкого качества, давать рекомендации по оптимизации технологических режимов конкретных операций непосредственно в производственных условиях. Внедрение полученных результатов позволяет увеличить выход годных изделий.

Следует также отметить, что математические модели данного типа справедливы лишь для тех процессов, в условиях которых ставились эксперименты по их определению. Поэтому в случае каких-либо изменений в конструкции изделий или технологии их изготовления математические модели следует корректировать, проводить дополнительные эксперименты и заново рассчитывать коэффициенты моделей.

Данная методика исследований реализована в виде пакета прикладных программ, позволяющих оперативно, в условиях реального производства производить необходимые расчеты по результатам контрольных измерений в ходе технологического процесса.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.— М.: Наука, 1976.
2. Долгов Ю. А., Шестакова Т. В. Метод моделирования технологических процессов серийного производства // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— № 4'1992/1'1993.— С. 23—25.
3. Shestakova T. Mathematical modeling in integrated circuit technologies // Intern. Conf. on Automation, Quality and Testing, Robotics A&QT-R 2002 (THETA).— Cluj-Napoca, Romania.— 2002.— Т. I.— Р. 274.
4. Дружинин Г. В. Методы оценки и прогнозирования качества.— М.: Радио и связь, 1982.
5. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений.— М.: Наука, 1971.