

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПРОЦЕССОВ В
МЕТАЛЛУРГИИ И МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 621.317.382:539.1

В.Е. Бахрушин, М.А. Игнахина

**ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ
ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО
КОНТРОЛЯ В МЕТАЛЛУРГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Постановка проблемы и анализ публикаций

Статистические методы широко используются в производственном контроле качества в металлургии полупроводников [1]. В частности, при производстве кремниевых эпитаксиальных композиций к числу основных контролируемых параметров относятся толщина эпитаксиального слоя, удельное электросопротивление и их разбросы [2, 3]. Кроме того, контролируется ряд параметров, характеризующих качество поверхности: наличие растравливания, окисления, подплавления, бугорков роста, сыпи и т. п., а также концентрации структурных дефектов – дислокаций и дефектов упаковки в рабочей области. В отдельных случаях к лимитируемым параметрам дополнительно относят наличие линий скольжения и их суммарную длину. Особенности контролируемых параметров являются их неоднородность в плоскости эпитаксиального слоя и существенный разброс значений. Для большинства из них законы распределения значений по эпитаксиальной композиции, а также средних значений по серии таких композиций существенно отличаются от нормального или неизвестны. В этих условиях применение традиционных параметрических методов статистического анализа невозможно [4] и актуальной проблемой становится выбор адекватных методик контроля качества производства. Несмотря на большое число публикаций в этой области [5, 6], проблема практического применения непараметрических статистических методов в металлургии и материаловедении полупроводников остается нерешенной. Это обусловлено недостаточной эмпирической базой, большим разнообразием типов композиций и технологий их изготовления, а

также непониманием технологами ограничений параметрических методов и возможных последствий их неправомерного использования. Значительная часть предложений по усовершенствованию методик статистического контроля не учитывает требования производителей о том, чтобы издержки, связанные с внедрением новых методик, были меньшими, чем эффект от их применения.

Целью данной работы является анализ эмпирических данных о распределении некоторых параметров кремниевых эпитаксиальных композиций и обоснование необходимости использования непараметрических статистических методов при производственном контроле их качества.

1. Толщина и удельное электросопротивление эпитаксиального слоя

Современные технологии позволяют воспроизводимо формировать эпитаксиальные слои кремния толщиной 1 – 200 мкм с удельным электросопротивлением 0,05 – 200 Ом·см и неоднородностью распределения не более 3 – 5 % для толщины и 5 – 7 % для удельного электросопротивления [7]. Стандартная методика предполагает определение значения контролируемого параметра как среднего арифметического результатов замеров, выполненных в пяти точках – центре эпитаксиального слоя и четырех точках, взятых на двух взаимноперпендикулярных диаметрах на расстоянии, равном половине радиуса от центра. Неоднородность распределения параметров определяют как отношение разности между максимальным и минимальным результатами к среднему значению.

Существенной особенностью, определяющей выбор статистической модели, является малое количество результатов, по которым необходимо делать оценки. Их увеличение требует выполнения дополнительных измерений и поэтому нежелательно. При выборе методики оценивания параметров необходимо исходить из конечной цели. Она связана с тем, что в результате последующих технологических процессов на эпитаксиальной композиции будут формироваться однотипные элементы с характерным размером порядка 0,1 – 100 мкм. Технология должна обеспечить минимизацию числа элементов, для которых толщина и удельное электросопротивление эпитаксиального слоя не попадают в заданные диапазоны допустимых значений. Конечная задача контроля –

получение максимально точных оценок вероятностей соответствующих событий.

На рис. 1 показаны полученные нами [7] результаты исследования неоднородности толщины эпитаксиальных слоев кремния, полученных при осаждении в вертикальном кварцевом реакторе.

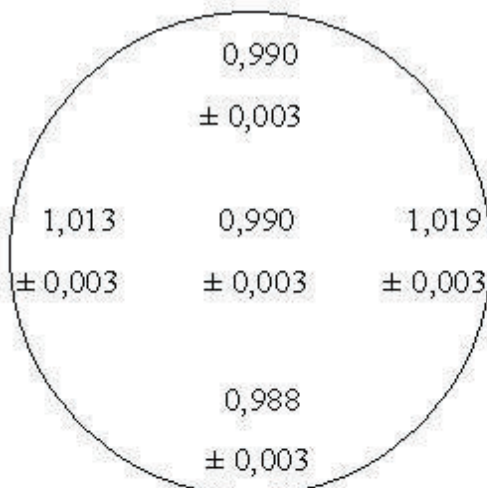


Рисунок 1 - Неоднородность толщины эпитаксиальных слоев кремния

Из рисунка видно, что в данном случае использование среднего арифметического имеющихся пяти замеров в качестве оценки толщины эпитаксиального слоя будет давать существенно искаженный результат. Это связано с наличием неслучайной составляющей распределения толщины, обусловленной симметрией температурного поля относительно вертикального диаметра пластины. Указанная проблема частично может быть снята, изменением выбора точек контроля, расположение которых не должно повторять симметрию реактора. Однако для обоснованного выбора таких точек необходимы специальные исследования. Применение других методов оценки центра распределения, в частности медианного, в данном случае нецелесообразно из-за ограниченного набора данных. Аналогичные проблемы характерны и для контроля удельного электросопротивления эпитаксиального слоя. Основное отличие заключается в том, что этот параметр более чувствителен к флуктуациям температуры подложки и концентрации легирующего компонента в газовой фазе. Поэтому неоднородность его распределения является более высокой, а распределение по поверхности слоя – более сложным.

Больше вопросов вызывает оценка вероятности получения готовых элементов, не удовлетворяющих требованиям по толщине и удельному электросопротивлению эпитаксиального слоя. Существующие методики основаны на предположении о нормальном законе распределения этих характеристик и интерпретации получаемых среднего значения и разброса как параметров соответствующих функций распределения. В действительности такое предположение не выполняется. Поэтому более обоснованным представляется получение интервальных или квантильных оценок толщины и удельного электросопротивления на основе предварительно полученных модельных функций распределения значений исследуемых характеристик.

2. Плотности дислокаций и дефектов упаковки

Другим примером неправомерности использования параметрических статистических методов в контроле качества является контроль плотностей структурных дефектов эпитаксиального слоя. На рис. 2 показаны эмпирические функции распределения эпитаксиальных композиций по плотности дислокаций, полученные для реакторов двух типов. Видно, что закон распределения, существенно отличается от нормального. Это особенно четко видно для кривой 1.

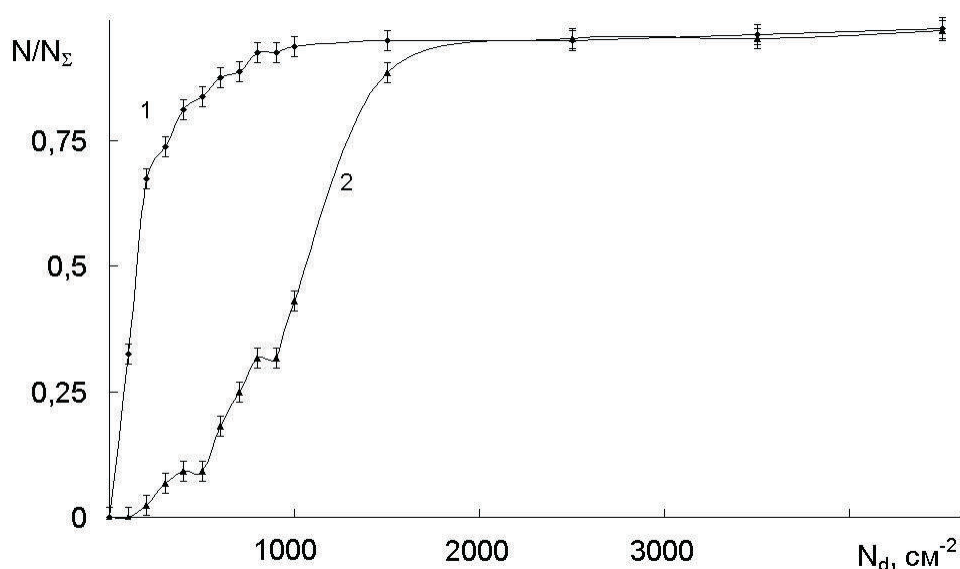


Рисунок 2 - Графики функций распределения по плотности дислокаций для композиций, полученных в двух типах реакторов

Близкими по виду к кривой 1 являются функции распределения композиций по плотности дефектов упаковки. Их характерными особенностями являются ограниченность значений плотностей дефектов, широкий диапазон их изменения (от 10^1 до 10^5 см⁻²), резкое возрастание функции распределения в области малых значений плотностей дефектов.

Очевидно, что и в этом случае методы контроля, основанные на предположении о нормальном законе распределения значений тестируемых параметров, будут давать существенную погрешность.

Выводы

Полученные результаты показывают наличие существенных отклонений распределения толщины, удельного электросопротивления и плотностей структурных дефектов эпитаксиальных слоев кремниевых композиций от нормального закона. Это свидетельствует о необходимости применения непараметрических статистических методов для разработки методик контроля их качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология полупроводникового кремния / Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червонный И.Ф. и др. – М.: Металлургия, 1992. – 408 с.
2. Нашельский А.Я. Технология полупроводниковых материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 336 с.
3. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
4. Бахрушин В.Є. Аналіз даних. – Запоріжжя: ГУ “ЗІДМУ”, 2006. – 128 с.
5. Morris R.E. The use of nonparametric statistics in quantitative electron microscopy // Journal of Electron microscopy. – 2000. – V. 49, N 4. – P. 545 – 549.
6. Орлов А.И. Математические методы исследования и теория измерений. – Заводская лаборатория. – 2006. - № 1. – С. 67 – 70.
7. Бахрушин В.Є. Получение и физические свойства слаболегированных слоев многослойных композиций. – Запорожье: ГУ “ЗИГМУ”, 2001. – 247 с.

Получено 11.03.2008 г.