

**ЕЛЕКТРОННЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО І ТЕХНОЛОГІЇ**

УДК 621.317.382:539.1

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ
СТЕПЕНИ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ****Левинзон Д.И.***Классический частный университет
ул. Жуковского, 70-б, Запорожье, Украина, 69002***Введение**

В системе критериев оценки качества объемных кристаллов полупроводников особое внимание уделяется параметрам, характеризующим их примесную и структурную неоднородность [1].

В общем случае любой характеристический параметр A распределен в полупроводниковом кристалле неравномерно, т. е. промышленно производимые полупроводниковые материалы представляют собой сплошные физически неоднородные среды. Причины возникновения этих неоднородностей могут носить как обусловленный (закономерный, детерминированный), так и случайный характер. Совокупное действие детерминированных и случайных факторов формирует весьма сложную по характеру объемную неоднородность.

При известной функции распределения F , если роль случайных факторов незначительна, параметр A можно представить как некоторую аналитическую функцию цилиндрических координат:

$$A = F(r, \varphi, l), \quad (1)$$

где r — радиальная, φ — угловая и l — осевая координаты.

В этом случае можно ввести в рассмотрение понятие эффективного пространственно-переменного параметра сплошной среды \bar{A} , представляющего собой интеграл:

$$\bar{A} = \frac{1}{V} \iiint_V F(r, \varphi, l) dr d\varphi dl, \quad (2)$$

где V — объем исследуемого материала, по которому проводится усреднение.

Однако, как правило, аналитическое описание функции распределения не представляется возможным из-за присутствия в ней значительного случайного фона.

Поэтому функция распределения должна строиться статистически на основании экспериментального изучения контролируемой величины A в виде:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i, \quad (3)$$

где n — число точек (или элементарных объемов), в которых измеренные значения A независимы.



Статистический подход в метрологии полупроводников, в отличие от практики единичных лабораторных измерений, обусловлен массовым характером контроля, свойственным производственным процессам.

Поскольку физическое расчленение объекта измерений на n отдельных образцов невозможно и, вообще говоря, абсурдно, ставится задача условной дискретизации контролируемой среды на элементарные объемы с учетом точности, локальности и других параметров применяемых методов и средств измерений.

Наиболее актуальным для промышленного производства полупроводниковых материалов является контроль степени их примесной неоднородности, оцениваемой по характеру распределения величины удельного электрического сопротивления (УЭС).

Критерии оценки примесных неоднородностей из измерений УЭС

Удельное электрическое сопротивление (ρ), представляет собой величину, равную отношению модуля вектора напряженности электрического поля к модулю вектора плотности тока, скалярную для изотропного и тензорную для анизотропного вещества. В примесных полупроводниках УЭС обратно пропорционально концентрации носителей заряда, поэтому им пользуются для оценки распределения примесей в объемных кристаллах [2].

Измерение УЭС осуществляется преимущественно контактными или зондовыми методами. Каждому из зондовых методов свойственна своя специфическая система зондов, характер их ориентации относительно концентрационных градиентов и изменения величины УЭС в межзондовом пространстве.

В частности, двухзондовый метод усредняет значения в межзондовом объеме LS (где L — межзондовое расстояние, S — площадь поперечного сечения образца), и поэтому он удобен для измерений по образующей полупроводникового кристалла. По аналогии четырехзондовый метод усредняет значения УЭС в полусфере радиусом $3l/2$, где l — межзондовое расстояние эквидистантной зондовой головки [2].

Главным показателем качества измерений зондовыми методами является погрешность, поскольку она связана с их точностью. В рассматриваемой нами задаче особое значение приобретает разрешающая способность метода — показатель качества и технологичности измерений, характеризующий свойство метода и средства измерений распознавать объекты, близкие друг к другу в пространстве или во времени. Количественной мерой разрешающей способности является обратное значение того минимального расстояния или временного отрезка, в крайних точках которого возможно получение независимых отсчетов измеряемой величины. Если эти интервалы меньше допустимых, два отсчета сливаются в один, и тогда говорят, что прибор, или устройство «не разрешают» сигнал измерительной информации.

Часто разрешающую способность отождествляют с понятием локальности измерений, однако это далеко не одно и то же. Поскольку практически любое измерение (особенно в материаловедении) дает результат, усредненный в некотором объеме, величина которого зависит от особенностей метода измерений и используемых средств измерений, то локальность измерений можно характеризовать габаритным размером этого объема Z , а обратная ей величина $1/Z$ есть разрешающая способность.

Чем меньше этот размер, тем лучше локальность (разрешающая способность) метода или аппаратуры. Однако стремление улучшить разрешающую способность может привести к тому, что результат измерений утратит физический смысл, т. е. станет недостоверным. Поэтому, проводя аналогию с анализом жидких или сыпучих материалов, локальность можно уподобить минимальному объему пробы, меньше которого она уже недостоверна [3].

Таким образом, стремясь к большей достоверности и воспроизводимости измерений, следует увеличивать объем отбираемой пробы, т.е. по сути приходится ухудшать



локальність измерений и по этой причине теряют ценную информацию о характере распределения параметра A в объеме материала. Попытка же получить картину микрораспределения параметра A , что необходимо с точки зрения технологии, возможна только при условии уменьшения Z , а поскольку абсолютное отклонение $\Delta Z = \text{const}$, то относительная погрешность измерений $\Delta Z/Z$ при этом возрастает.

Эту взаимную противоречивость основных метрологических характеристик следует учитывать в практике массовых измерений полупроводников.

Примем во внимание, что результат единичного измерения ρ в какой-либо точке полупроводникового кристалла обязательно будет содержать некоторую неопределенность, обусловленную своим происхождением следующим причинам:

- случайной составляющей погрешности измерений;
- невоспроизводимости повторных измерений, которая имеет место ввиду невозможности «попасть» абсолютно в ту же точку.

К детерминированным причинам формирования объемной примесной неоднородности в полупроводниковых материалах следует отнести: осевую и радиальную сегрегацию примесей, кривизну фронта кристаллизации, вращение слитка и тигля, выход плоской грани (111) на фронт кристаллизации и др. [4]. Эти факторы действуют на фоне случайных флуктуаций, связанных с неконтролируемыми колебаниями скоростных и температурных режимов роста, механическими вибрациями, присутствием посторонних примесей и пр.

Таким образом, сочетание детерминированных и случайных факторов, анизотропия свойств, искусственная анизотропия ввиду слоистого роста [5] и др. формируют в совокупности модель распределения, описываемую уравнением (3).

В основу экспериментально-статистического подхода к оценке степени неоднородности объемных кристаллов нами положена абстрагированная модель, реализуемая по следующему алгоритму:

1. Исследуемый объем V условно разбивается на ряд кубиков объемом $\Delta V_i = \Delta V = Z^3$ каждый, где Z – локальность измерений. На практике следует брать для вычислений результаты измерений в кубиках, примыкающих к образующей и обоим торцам слитка.

2. Кубики нумеруются в соответствии с рядом случайных величин $(1, 2, \dots, i, \dots, n)$.

3. Значение величины ρ определяется в каждом элементарном кубике $(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i, \dots, \rho_n)$.

4. Определяется абсолютная ошибка каждого измерения ρ_i (погрешность единичного измерения). Обычно принимают относительную погрешность $\frac{\Delta_i}{\rho_i} = \text{const}$ (например, 5% – для четырехзондового и 7% – для двухзондового методов).

5. Максимально возможное число измерений определяется из соотношения $n = \frac{V}{Z^3}$.

Нет смысла брать точки, лежащие друг от друга на расстоянии, меньшем локальности измерений, так как это не повышает уровня информации. Только в случае, когда ребро кубика больше или равно Z , каждое из n измерений может считаться независимым.

6. Вычисляется эффективное (среднеарифметическое) значение ρ :

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (4)$$

7. Вычисляется коэффициент вариации параметра ρ_i :



$$\gamma_{\bar{\rho}} = \frac{1}{\bar{\rho}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n(n-1)}}. \quad (5)$$

Коэффициент $\gamma_{\bar{\rho}}$ служит достаточно объективной мерой степени неоднородности материала, не зависящей от уровня его легирования.

Статистические оценки будут тем значимей, чем больше сделано определений n и чем меньше погрешность единичного измерения Δi . В свою очередь, чем больше Δi , тем больше следует сделать определений (не забывая, впрочем, что $n \ll V/Z^3$ лишено физического смысла). При заданных значениях n и Δi может быть определена доверительная вероятность измерений P .

Связь критериев однородности с технологией

В настоящее время в мировых и отечественных стандартах на полупроводниковые материалы принято в качестве меры их электрической неоднородности использовать так называемый разброс значений величины УЭС по объему кристалла. Практически для оценки этого разброса привлекают совокупность данных измерения УЭС по торцам и образующей слитков.

Пусть последовательность измерений этой совокупности значений УЭС определяется числовым рядом: $1, 2, 3, \dots, i, \dots, n$. Если разработчик прибора или микросхемы определяет заказываемый номинал величины УЭС как ρ_0 , то каждое измеренное значение ρ_i должно удовлетворять следующему условию:

$$(1 - \gamma_{\rho_0})\rho_0 \leq \rho_i \leq (1 + \gamma_{\rho_0})\rho_0, \quad (6)$$

где γ_{ρ_0} γ_{ρ_0} — разброс значений величины УЭС от заказываемого номинала, обычно выражаемый в процентах.

Оценка неоднородности через критерий разброса обладает двумя очевидными недостатками:

1. Не раскрывается характер распределения УЭС в объеме кристалла. Например, кристалл может быть почти однородным, но при этом даже одно отклонение выведет его за пределы, установленные соотношением (6).

2. Не учитывается степень смещения массива значений УЭС в сторону максимальной или минимальной границы. Кристаллы с большими значениями УЭС и кристаллы с меньшими значениями УЭС в пределах полосы (6) квалифицируются как равноценные.

Первый из указанных недостатков устраняется при статистическом подходе, который позволяет в качестве меры неоднородности в условиях массовых измерений ввести коэффициент вариации величины УЭС:

$$\gamma_{\bar{\rho}} = \frac{1}{\bar{\rho}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n(n-1)}}, \quad (7)$$

где $\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i$.



Второй недостаток можно устранить, привлекая к рассмотрению понятие смещения $\bar{\rho}$ относительно заказываемого номинала ρ_0 :

$$\alpha = \frac{\Delta\rho}{\rho}, \quad (8)$$

где $\Delta\rho = |\bar{\rho} - \rho_0|$.

Можно показать, что

$$\gamma_{\rho_0} \approx \frac{\gamma_{\bar{\rho}}}{\sqrt{\alpha + 1}}. \quad (9)$$

Если $\alpha = 0$, то при достаточно большом числе измерений $\gamma_{\rho_0} = \gamma_{\bar{\rho}}$.

Исходя из изложенного, рекомендуется применять вместо традиционного разброса от номинала совокупность критериев оценки степени неоднородности полупроводниковых материалов в виде:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{|\rho_i - \rho_0|}{\rho_0} \leq \gamma_{\rho_0} = \gamma_1 \\ \gamma_{\bar{\rho}} \leq \gamma_2 \\ |\alpha| \leq \gamma_3 \end{array} \right\} \quad (10)$$

Здесь γ_1 представляет собой разброс от номинала (в соответствии с действующими техническими условиями), а остальные критерии характеризуют соответственно технологию и требования заказчиков приборов и микросхем. Критерий γ_2 определяет условия выращивания кристалла (главным образом тепловые), поскольку он не зависит от степени легирования и является как бы мерой его «истинной» неоднородности. Критерий γ_3 характеризует не что иное, как точность легирования кристалла с целью получения заданного значения ρ_0 , т. е. попадание в «марку». Таким образом, совокупность критериев (10) позволяет осознанно управлять основными технологическими операциями получения кристаллов и осуществлять их оптимальный отбор для изготовления соответствующих приборов и микросхем.

Выводы

1. Предложены критерии оценки степени неоднородности полупроводниковых материалов на основе статистического подхода к построению функции распределения параметра УЭС.

2. Совокупность критериев оценки степени неоднородности полупроводниковых материалов позволяет осознанно управлять основными технологическими операциями получения кристаллов и осуществлять их оптимальный отбор для изготовления соответствующих приборов и микросхем.



Литература

1. Левинзон Д.И. О возможности использования адапционного подхода для построения системы критериев оценки качества объемных кристаллов полупроводников / Д.И. Левинзон // Сложные системы и процессы. — 2006. — № 1. — С. 43-46.
2. Левинзон Д.И. Основы метрологии полупроводников / Д.И. Левинзон — Запорожье: ГУ «ЗИГМУ», 2001. — 120 с.
3. Налимов В.В. Применение математической статистики при анализе вещества. — М. : Физматгиз, 1960. — 430 с.
4. Получение профилированных монокристаллов и изделий способом Степанова / [Антонов П.И., Затуловский Л.М., Левинзон Д.И. и др.] — Л. : Наука, 1981. — 280 с.
5. Воронков В.В. Влияние слоистой неоднородности на результаты измерения удельного сопротивления / В.В. Воронков, Д.И. Левинзон, М.И. Иглицын // Зав. лаб. — 1968. — Т. 24. — № 3. — С. 307-309.

Інформація

Сергеев Я. Д, Квасов Д.Е. Диагональные методы глобальной оптимизации. — М. : Физматлит, 2008. — 352 с.

Настоящая книга посвящена теоретически актуальным и практически важным вопросам разработки теории и численных методов решения широкого класса задач глобальной оптимизации. Книга дает введение в предмет и обобщает ряд последних научных достижений авторов, развивающих традиции Нижегородской школы глобальной оптимизации. Исследования авторов по этой тематике неоднократно поддерживались грантами Российского фонда фундаментальных исследований, а также Советом по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ, Итальянским фондом фундаментальных исследований и международным проектом "Российско-Итальянский университет". Результаты исследований, вошедшие в книгу, были опубликованы в ведущих международных научных журналах и используются более чем в 20 странах мира.

Прудников В.В., Вакилов А.Н., Прудников П.В. Фазовые переходы и методы их компьютерного моделирования. — М. : Физматлит, 2009. — 224 с.

Рассмотрены основные представления современной теории фазовых переходов и критических явлений, идеи и методы компьютерного моделирования статистического поведения и расчета термодинамических характеристик различных систем при фазовых переходах. Предложен практический курс компьютерного моделирования фазовых переходов первого и второго рода в однородных и неупорядоченных системах. Лабораторные работы и задания снабжены конкретными рекомендациями, фрагментами программ, реализующими обсуждаемые алгоритмы, а также действующими программами расчета равновесных и неравновесных статистических характеристик для рассматриваемых систем.

Федотов Н.Г. Теория признаков распознавания образов на основе стохастической геометрии и функционального анализа. — М. : Физматлит, 2009. — 304 с.

В книге предлагается новая теория признаков распознавания образов на основе стохастической геометрии и функционального анализа, которая позволяет формировать конструктивные признаки распознавания нового класса - триплетные признаки. Источником формирования триплетных признаков является введенное автором новое геометрическое преобразование, связанное со сканированием изображений по сложным траекториям. Построена с единых позиций объединенная теория признаков распознавания и предварительной обработки изображений, пригодная для создания мощных самонастраивающихся систем распознавания образов. Приведены примеры эффективного применения теории в области геологии, медицинской и технической диагностики, нанотехнологии, биометрии.