

Дереченник С.С., Булюк В.В., Раткевич А.В., Шепелевич И.С.

МЕТОДИКА ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТИ МИКРОГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР ПО ПЛОСКИМ ТЕНЕВЫМ ОБРАЗАМ

Введение

Одной из актуальных проблем современной микроэлектроники является обеспечение воспроизводимости и стабильности заданных электрических характеристик полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Важнейшее значение для этого имеет контроль отдельных технологических процессов, позволяющий оперативно корректировать критичные отклонения, и добиваться, тем самым, необходимого качества и выхода годных изделий. Так, в настоящее время на всех ключевых этапах производства применяются разнообразное аппаратные средства и методики контроля параметров твердотельных структур, позволяющие с высокой точностью определять элементный и фазовый состав материалов, а также геометрические размеры, структурно-морфологические свойства и электрофизические параметры отдельных элементов и слоев структуры [1]. Эти же средства и методики незаменимы также на стадиях разработки новых изделий и проектирования технологических процессов.

Выполнение упомянутых требований воспроизводимости и стабильности в огромной степени зависит, в числе прочих факторов, от геометрического совершенства формируемых микрогетерогенных структур. Так, например, нерегулярность толщины диэлектрической пленки в интегральном конденсаторе приведет к заметному снижению его электрической прочности и отклонению фактической емкости от расчетных параметров. Несовершенство же границы раздела перехода Шоттки или р-п-перехода очевидно вызовет увеличение токов утечки и ухудшение частотных параметров приборов. Миниатюризация и усложнение микроструктур не снижает значимости данного фактора, а, наоборот, требует внимания к геометрическому совершенству поверхностей и границ раздела на все меньших масштабных уровнях - вплоть до наноразмерного. Главной причиной нерегулярности поверхностей и границ раздела фаз является вероятностный характер поведения микрочастиц (атомов, молекул, кластеров), в наибольшей степени проявляющийся в сильно неравновесных термодинамических условиях, типичных для высокоэнергетических технологических воздействий.

Высокоточные средства геометрического, топологического и структурно-морфологического контроля твердотельных структур, основаны, как правило, на методах электронной микроскопии, и используются для определения размеров отдельных областей, а также для оценки качества слоев микроструктуры - шероховатости и дефектности поверхности, размера и ориентации зерен поликристаллического материала. К сожалению, из-за существенной нерегулярности исследуемых объектов, многие из названных параметров трудно поддаются достоверному количественному описанию, а их оценка в значительной мере базируется на визуальном сравнительном анализе получаемых изображений структуры.

Оказался весьма эффективным и, в связи с этим, активно развивается новый подход к исследованиям топологических и структурно-морфологических особенностей многофазных систем, в том числе и рельефа нерегулярных поверхностей, основанный на представлениях об их фрактальной (точнее, мультифрактальной) природе [2, 3]. В терминах фрактального формализма удастся количественно описать не только свойства уже сформированных недетерминированных структур, но также, например, и кинетику их эволюции при формировании [4].

Таким образом, достоверный количественный анализ морфологических свойств (например, микрорельефа) твердотельных структур, требует создания новых методик определения фрактальных параметров нерегулярной поверхности, основывающихся на обработке данных, получаемых средствами электронной микроскопии.

Постановка задачи

Мультифрактальные объекты, в том числе нерегулярные поверхности физических структур, характеризуются целым рядом фрактальных размерностей - клеточной, информационной, корреляционной и т.д. Набор (спектр) значений таких размерностей, чувствительных к изменениям физических механизмов образования объекта, может служить идентификатором структурного типа сложного многофазного объекта.

Известные и обычно применяемые методы измерения фрактальных размерностей поверхностей основаны на их сечении вертикальной (или горизонтальной) плоскостью с последующим анализом получаемых профилей рельефа (или контура «островов среза») по разработанным алгоритмам с целью определения соответствующих степенных зависимостей необходимого параметра (в простейшем случае - длины профиля) от масштаба его измерения. Фрактальная размерность самой поверхности при этом, разумеется, на единицу выше, чем размерность исследуемых (плоских) образов, получаемых при сечении поверхности плоскостью [3].

Существенным недостатком этих методов, снижающим их достоверность при практическом анализе реальной поверхности, является необходимость точного определения двумерной функции высоты профиля. Микрофотографии же поверхности, получаемые, как правило, при косом освещении объекта, содержат исходные искажения, вызванные затенениями от неровностей профиля, проецирующимися, в свою очередь, на неровную поверхность. Следовательно, предлагаемый некоторыми исследователями для интерпретации рельефа поверхности метод «тоновой визуализации» (высота профиля считается прямо пропорциональной яркости участка) идеально применим для визуального отображения точно известной (например, модельной) поверхности, а при обратном преобразовании информации - из реальной микрофотографии в двумерную функцию - может вносить неприемлемую погрешность.

Дереченник Станислав Станиславович, к.т.н., доцент, зав. каф. «ЭВМ и системы» Брестского государственного технического университета, e-mail: chief.cm@bstu.by

Раткевич Алексей Васильевич, ассистент каф. «ЭВМ и системы» Брестского государственного технического университета, e-mail: bcntilexus@yandex.ru

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Булюк Виктор Вячеславович, главный инженер РУНИП «СКБ Запад» НПО «Интеграл».

Беларусь, НПО «Интеграл», г. Брест, ул. Суворова, 96/1.

Шепелевич Ирина Сергеевна, инженер-программист ООО «Марко».

Беларусь, ООО «Марко», г. Брест, ул. Ленина, 22.

Это относится, очевидно, и к изображениям, получаемым методами электронной микроскопии, например с помощью микроскопа Н-800 Hitachi. Так, растровая микроскопия («на отражение») выполняется при освещении исследуемого объекта электронным лучом, падающим на поверхность под небольшим углом к нормали, а детекторы вторичного и/или отраженного излучения также не ориентированы нормально. Равно и просвечивающая электронная микроскопия предполагает исследование копирующих рельеф реплик, которые предварительно затемняют, напыляя на них под достаточно большим углом поглощающий электроны материал [1]. На рисунке 1 приведен типичный пример теневых искажений на изображении поверхности микроструктуры (пленка сплава титан-вольфрам на кремнии), полученном электронной микроскопией на отражение.

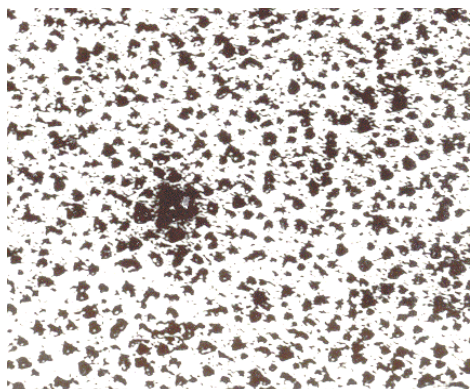


Рис. 1. Микрофотография поверхности Ti:W/Si (увеличение 2000)

Таким образом, необходимо разработать методику расчета фрактальных размерностей нерегулярной поверхности, основанную на обработке ее теневого образа, полученного при косом освещении, а также оценить ее точность в широком диапазоне параметров.

Разработка методики фрактального анализа микро- рельефа по теневому образу

Разработку, оценку точности и доказательство достоверности новой методики удобно выполнять с использованием точно заданных мультифрактальных поверхностей, которые могут быть построены известными способами - методом случайного переноса или методом случайного сложения [5]. С этой целью была создана программная система [6], выполняющая следующие функции:

- генерация выбранным методом случайных поверхностей размером 256×256×256 с фрактальной размерностью в диапазоне 2,1...2,7;
- формирование теневого образа поверхностей при их косом освещении в диапазоне углов 10°...80°;
- расчет фрактальных (клеточной и информационной) размерностей стандартными методами - по вертикальным профилям либо по «островам» в горизонтальном срезе;
- сервисные функции (пакетная обработка данных, визуализация, ведение базы поверхностей и результатов и т.п.).

Корректность принятых алгоритмов измерения размерностей плоских объектов (линий контура «островов среза», линий профиля поверхности) была подтверждена на стандартных регулярных фракталах - ковре Серпинского (погрешность расчета составила менее 0,2%) и снежинке Коха (1...3%). Было также обнаружено некоторое несоответствие явно задаваемого при генерации показателя Херста итоговым размерностям полученных поверхностей, что свидетельствует о частичной некорректности суждений в описании упомянутых методов генерации. В связи с этим, эмпирически были установлены правила выбора исходных настроек, позволяющие получать поверхности желаемой размерности.

На рисунке 2 приведены типичные теневые образы, полученные при различных углах освещения модельной поверхности, сгенерированной методом случайного сложения.

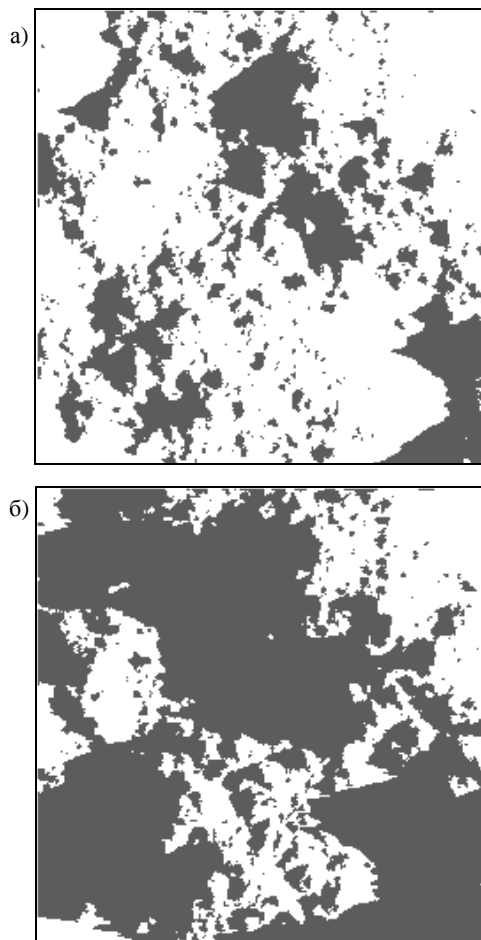


Рис. 2. Теневые образы модельной фрактальной поверхности ($D = 2,35 \pm 0,01$), освещаемой под углом 30° (а) и 60° (б) к нормали

Размерность этой поверхности $D_{box} = 2,35 \pm 0,01$ измерялась стандартным методом: путем выявления степенной зависимости числа клеток, необходимых для покрытия контура «островов среза», образующихся в горизонтальном сечении поверхности (на уровне середины высоты профиля), от размера клеток. Применяя такой же алгоритм измерения клеточной размерности к контурам данных теневых образов, и прибавляя, как обычно, к полученным значениям единицу, получаем величины $2,54 \pm 0,015$ и $2,60 \pm 0,015$, соответственно. Превышение размерности D_{box} вызвано, видимо, дополнительным искажением теней от неровностей, падающих на неровную же поверхность. Следовательно, к клеточной размерности контура теневого образа необходимо прибавлять величину, меньшую единицы.

Определим отклонение $\Delta D = D_{box} - D_{\alpha}$, как методическую поправку расчета по теневому образу, и установим закономерность $\Delta D = \Delta D(\alpha, D_{\alpha})$ ее изменения от угла α освещения, при котором формируется теневой образ, а также от размерности D_{α} контура этого плоского теневого образа. Тогда искомую размерность поверхности $D \rightarrow D_{box}$ можно определять в явном виде

$$D = D_{\alpha} + \Delta D(\alpha, D_{\alpha}). \tag{1}$$

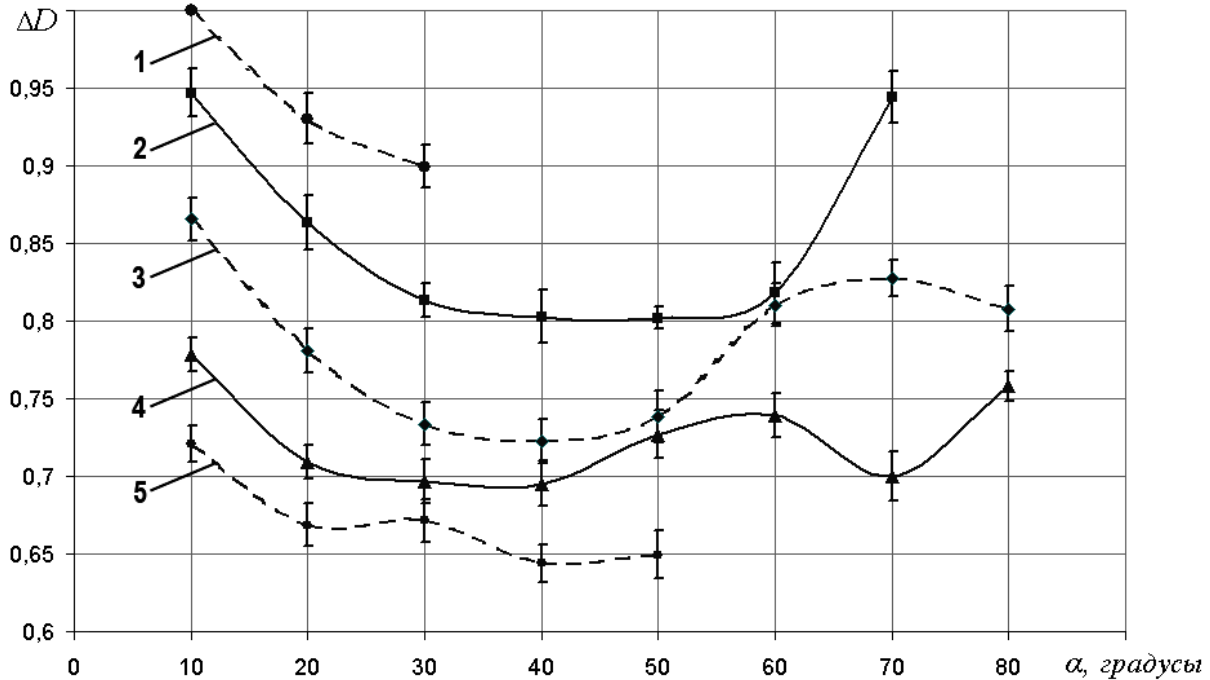


Рис. 3. Зависимость методической поправки расчета по теневым образам от угла освещения, для различных значений размерности контура теневого образа: 1 - $D_\alpha = 1,3$; 2 - $D_\alpha = 1,4$; 3 - $D_\alpha = 1,5$; 4 - $D_\alpha = 1,6$; 5 - $D_\alpha = 1,7$.

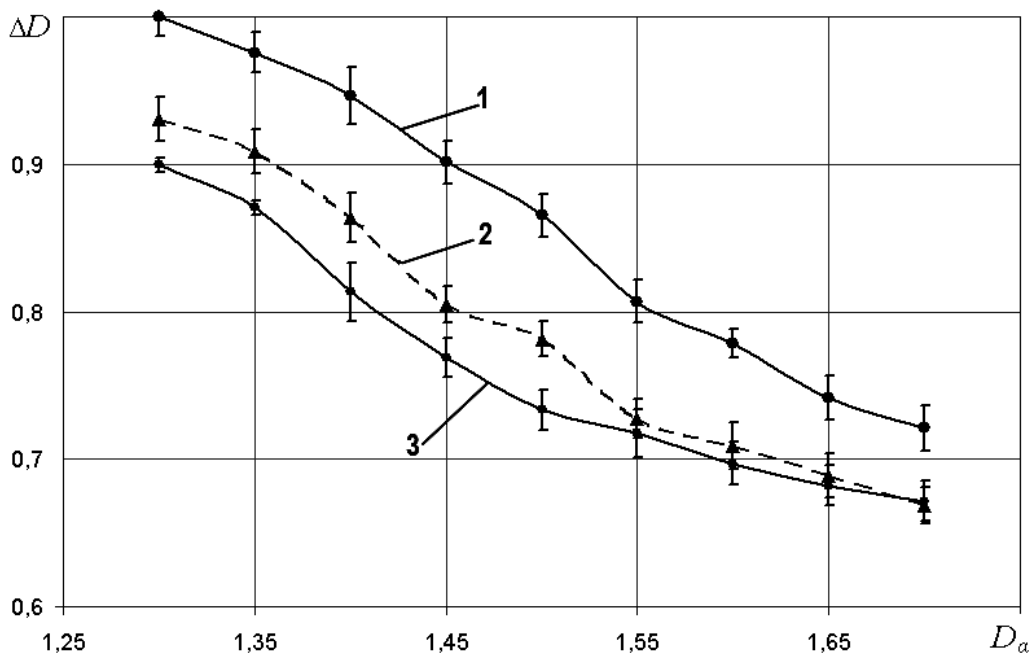


Рис. 4. Зависимость методической поправки расчета по теневым образам от размерности их контура, для различных углов освещения: 1 - $\alpha = 10^\circ$; 2 - $\alpha = 20^\circ$; 3 - $\alpha = 30^\circ$.

С использованием упомянутой программной системы был выполнен вычислительный эксперимент, заключающийся в: а) генерации набора модельных поверхностей различной размерности; б) измерении клеточной размерности каждой поверхности стандартным методом; в) формировании набора теневых образов для каждой поверхности; г) измерении клеточной размерности контура каждого теневого образа. Диапазон фрактальных размерностей поверхностей (2,2...2,6) был выбран как наиболее вероятный для реальных микроэлектронных структур. Количество исследованных модельных

поверхностей составило 480, угол освещения каждой поверхности изменялся от 10 до 80° с шагом 10°.

Из полученных таким образом 3640 результатов для дальнейшего исследования отбирались только те, в которых клеточная размерность D_α контура теневого образа совпадала, с точностью $\pm 0,01$, со значениями из ряда: 1,3; 1,35; 1,4; ... 1,7. Таковых оказалось более 2600, и они были сгруппированы, по значениям D_α и α , в 72 группы. 20 групп, в которых оказалось менее чем по 10 образов, далее не рассматривались.

Для всех оставшихся образов затем вычислялись отклонения $\Delta D = D_{box} - D_{\alpha}$, которые статистически обрабатывались в группах, что позволило выявить частные зависимости $\Delta D(\alpha)$ и $\Delta D(D_{\alpha})$, некоторые из которых приведены, соответственно, на рисунках 3, 4.

Анализ зависимостей $\Delta D(\alpha)$ показывает, что они достаточно монотонны для углов α из диапазона 10...40°, который и имеет наибольшее применение в практике контроля качества поверхностей. Ограничивая диапазон углов указанными значениями, был осуществлен поиск аппроксимирующей аналитической зависимости в виде:

$$\Delta D = \Delta D(\alpha, D_{\alpha}) = (A - B \cdot tg \alpha) \cdot D_{\alpha}^{-C} \quad (2)$$

Для поиска решения применялся метод сопряженных градиентов, в качестве критерия качества решения выступала минимизация отклонения (квадратичная оценка) клеточных размерностей, вычисленных по известной и новой методикам. В результате были найдены значения 1,44; 0,24 и 1,30, соответственно, для коэффициентов A , B и C уравнения (2). Среднее и максимальное абсолютные отклонения вычисления размерности, при данных коэффициентах, составили, соответственно, $\pm 0,018$ и $\pm 0,025$.

Окончательно, с учетом (1) и (2), математически формулируем методику определения клеточной размерности поверхности по ее теневому образу (микрофотографии)

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta D = (1,44 - 0,24 \cdot tg \alpha) \cdot D_{\alpha}^{-1,3} ; \\ 10^{\circ} \leq \alpha \leq 40^{\circ} ; 1,3 \leq D_{\alpha} \leq 1,7 ; \\ D_{box} \approx D = D_{\alpha} + \Delta D ; \\ 2,2 \leq D \leq 2,6 ; |D_{box} - D| \leq 0,025 . \end{array} \right. \quad (3)$$

Обсуждение и выводы

Новая методика определения фрактальной (клеточной) размерности поверхностей позволяет количественно оценивать морфологические свойства микрогетерогенной структуры по микрофотографиям поверхности, поэтому относится к неразрушающим и бесконтактным методам контроля. Методика достоверна в практически значимом диапазоне параметров, а ее общая погрешность, с учетом типичной погрешности измерения клеточных размерностей (0,01...0,015), не превышает $\pm 0,04$ (менее 2 %).

УДК 621.793.6:785.5

Хвисевич В.М., Сазонов М.И., Якушевич С.

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И УПРОЧНЕНИЯ В ХРОМИСТОЙ СТАЛИ 14X17H2 ПРИ ДВУХКРАТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ В ЗАЩИТНОЙ СРЕДЕ АРГОНА

Эксплуатация многих деталей машин и механизмов, использующихся, например, в пищевой промышленности, происходит в условиях механического и коррозионного износов. В этой связи детали приходится изготавливать из дорогостоящих хромистых (нержавеющих) сталей и, в частности, 14X17H2. Одним из способов повышения долговечности таких деталей является формирование в поверхностном слое детали структур с высокой прочностью и вязкостью сердцевин. Учитывая широкие технологические возможности и производительность концентрированных источников энергии при их воздействии на изделия [1, 2], интересно изучить условия, при которых для этих целей может быть использована термообработка плазменной струей хромистых сталей. В отличие от лазерного и электронно-лучевого методов обра-

ботки, метод поверхностного плазменного упрочнения недорог, универсален и позволяет получить мелкоизмельченный мартенсит. За счет получения высоких скоростей нагрева и охлаждения материалов, происходит поверхностная плазменная закалка (ППЗ) и в результате образуются слои с высокими уровнями эксплуатационных свойств.

Для фрактальных размерностей более высоких порядков (информационной, корреляционной и т.д.) могут быть найдены зависимости, аналогичные (3), что повысит общность данной методики. Кроме того, предложенный принцип анализа может быть применен для разработки новых способов неразрушающего бесконтактного контроля других параметров рельефа поверхности, например, шероховатости.

Выполнив дополнительные исследования, можно также определить оптимальные, по точности и информативности фрактального анализа, углы освещения для формирования теневых образов, что позволит выработать рекомендации по наилучшим режимам применения аппаратных средств контроля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В.А. Емельянов, В.В. Баранов, Т.В. Петлицкая и др. Аппаратные средства контроля параметров твердотельных структур в производстве СБИС / Под редакцией А.П. Достанко.- Мн.: НПО «Интеграл», 1997.- 71 с.
2. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении.- М.: Наука, 1994.- 384 с.
3. Раткевич А.В., Дереченник С.С. Применение фрактальных методов в экспериментальных и теоретических исследованиях тонкоплёночных структур // Вестник БГТУ.- Машиностроение, автоматизация, ЭВМ.- 2003, № 4(22).- С. 54-58.
4. Пелегов Д.В. Использование фрактального формализма для описания кинетики фазовых превращений в конечных системах / Автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук по спец. 01.04.07 «Физика твердого тела».- Екатеринбург: Уральский политехн. ин-т, 2000.
5. Федер Е. Фракталы.- М.: Мир, 1991.- 262 с.
6. Хвисюк Д.А., Шепелевич И.С. Программная система для фрактального анализа поверхностей / Научный руководитель С.С. Дереченник // Сборник конкурсных научных работ молодых ученых, аспирантов и студентов.- Брест: БГТУ, 2004.- С. 155-158.

ботки, метод поверхностного плазменного упрочнения недорог, универсален и позволяет получить мелкоизмельченный мартенсит. За счет получения высоких скоростей нагрева и охлаждения материалов, происходит поверхностная плазменная закалка (ППЗ) и в результате образуются слои с высокими уровнями эксплуатационных свойств.

Сталь 14X17H2 относится к полуферритному классу [3] и содержит 0,18 % С, 17 % Cr, 2,0 % Ni, 0,4 % Mn, 0,32 % Mo и др.

ППЗ этой стали осуществляли плазмотроном с плотностью теплового потока $2,5 \cdot 10^7 - 6,0 \cdot 10^7$ Вт/м², в качестве плазмообразующего и защитного газов применялся аргон.

Для определения влияния термообработки на микроструктуру и свойства стали были изготовлены шлифы в поперечном сечении к обработанной поверхности. Шлифы травили