

## Выявление корреляций поверхностного интерфейса пленок $a$ -Si:H методом двумерного флуктуационного анализа

© А.В. Алпатов, С.П. Вихров, Н.В. Гришанкина<sup>¶</sup>

Рязанский государственный радиотехнический университет,  
390005 Рязань, Россия

(Получена 5 апреля 2012 г. Принята к печати 6 июня 2012 г.)

Представлена реализация модифицированного метода двумерного флуктуационного анализа для выявления корреляций интерфейсов поверхности. Были исследованы модельные поверхности с известным правилом построения, с различными структурными свойствами: упорядоченные, структуры со слабой организацией, хаотические. Полученные значения скейлингового показателя сопоставлялись с известной шкалой значений. Были выявлены особенности поведения скейлинга на различных масштабах. Показано, что метод может эффективно использоваться при исследовании эволюции поверхности, например, при росте пленок неупорядоченных полупроводников, при оценке степени упорядоченности, при исследовании процессов самоорганизации. Были исследованы поверхности пленок аморфного гидрогенизированного кремния, сканы которых были получены методом атомно-силовой микроскопии. Диагностика методом двумерного флуктуационного анализа показала наличие немонофрактальности поверхностей и нескольких составляющих интерфейса поверхности — шумовой и синусоидальной.

### 1. Введение

Пленки аморфного гидрогенизированного кремния  $a$ -Si:H являются важным элементом современной полупроводниковой микро- и наноэлектроники и широко используются в производстве электронных и фотоэлектрических устройств. Это в первую очередь связано с возможностью низкотемпературных процессов осаждения, высокой производительностью и относительно небольшой стоимостью готовых приборов по сравнению, например, с приборами на основе монокристаллического кремния. Однако технология производства  $a$ -Si:H не лишена недостатков. Зачастую практическое применение ограничено наличием метастабильности структуры (эффект Стеблера–Вронского) [1].

Известно [2], что при получении пленок  $a$ -Si:H методом плазмохимического осаждения из силана ( $\text{SiH}_4$ ) требуется значительное время для установления оптимальных технологических режимов — температуры подложки, мощности разряда, скорости потока газов — с целью получения пленок с заданными свойствами. К тому же влияние оказывает геометрия ростовой установки. Таким образом, вторая проблема — это невозможность структуры и соответственно свойств выращиваемых пленок.

Поэтому одной из актуальных научных задач на сегодняшний день является исследование механизмов структурообразования пленок неупорядоченных полупроводников в процессе роста, приводящих к пространственным дефектам, нежелательным электрофизическим свойствам или к их деградации.

Одним из самых распространенных методов исследования таких механизмов является анализ рельефа поверхности пленок на различных стадиях роста или непосредственно в его процессе, при этом изображение рельефа, как правило, получают методами электронной

или зондовой микроскопии. При этом, естественно, надо учитывать, что при осаждении пленок неупорядоченных полупроводников на формирование структуры значительное влияние оказывает подложка, поэтому достоверные результаты исследования поверхности можно получить только при определенной толщине осаждаемых пленок, когда подложка перестает влиять на их структуру.

#### 1.1. Методы анализа интерфейса поверхности

Поверхность пленки сама по себе является сложной трехмерной структурой, поэтому при использовании методов микроскопии правильно говорить не о самой поверхности, а об ее интерфейсе, т.е. кривой границы раздела между поверхностью материала и внешней средой. В свою очередь интерфейс является двухмерной структурой, характеризующейся матрицей, индексы столбцов и строк которой фиксируют пространственную позицию или ячейку, а значение в соответствующей ячейке характеризует значение сканируемого параметра, например высоты. Интерфейс поверхности косвенно описывает ее реальный рельеф и может быть проанализирован с помощью численных методов.

Существует достаточно много методов оценки геометрических и корреляционных свойств интерфейса поверхности пленки (теория информации, расчет параметров шероховатости [3,4], определение функции высотных (height-height) корреляций, нахождение спектральной плотности мощности (PSD) и др.). В последние годы, например, активно развивалась теория нелинейных сложных систем (теории самоорганизации) применительно к неупорядоченным полупроводникам, и процессы их структурообразования рассматривались как самоорганизующиеся [5–7]. Данный подход позволял оценить такие характеристики, как средняя взаимная информация (СВИ), автокорреляционная функция (АКФ), вложение Ф. Такенса. Некоторые авторы [8] описывают

<sup>¶</sup> E-mail: pgnv@mail.ru

механизмы поверхностного сглаживания, действующие в процессе роста пленки  $a\text{-Si:H}$ . Эволюция микрорельефа в сторону сглаженности может быть также объяснена в рамках парадигмы детерминированного хаоса с позиций теории самоорганизации [3]. Однако результаты исследования с применением теории самоорганизации оказались недостаточными для полного понимания процессов, происходящих во время роста материала. Основными недостатками перечисленных методов является то, что они не учитывают важный параметр — пространственный масштаб, или дают ему точечную оценку без учета близлежащих областей, поэтому они не способны полностью описать и классифицировать структурную сложность интерфейса, а следовательно, и поверхности в целом.

Современные подходы к анализу сложных физических систем с нелинейной динамикой поведения (а поверхность пленки, без сомнения, является частью сложной системы) предлагают использовать понятие скейлингового показателя [9]. Использование данного показателя основано на обоснованном предположении, что поверхность пленок демонстрирует эффект статистического аффинного самоподобия (в некотором диапазоне масштабов). Вообще масштабный подход характерен для анализа свойств регулярных и случайных фракталов. Поэтому для описания их структурных свойств используют принцип фрактального разбиения с последующей оценкой некоторой количественной меры в различных масштабах. Для сложноструктурированных изображений такие подходы применяются уже достаточно давно [10,11]. Часто проблемой фрактальных методов является нестационарность контура исследуемого интерфейса поверхности, а также его „недостаточная фрактальность“, т.е. наличие гладких участков контуров, которые уменьшают информативность и чувствительность фрактальных показателей к изменениям ее структуры.

Поэтому в данной работе для выявления и классификации структурной сложности интерфейса пленок  $a\text{-Si:H}$  предлагается использовать метод DFA (Detrended Fluctuation Analysis) [12,13]. Важным достоинством данного метода является наличие четкой шкалы скейлинговых значений, которую можно использовать для классификации. Таким образом, цель работы — показать возможность использования метода DFA (применительно к двумерному случаю) для выявления корреляций интерфейса различных поверхностей.

## 2. Теоретическая часть

### 2.1. Особенности реализации метода DFA и его шкала

Метод DFA [14] представляет собой вариант дисперсионного анализа, который позволяет исследовать эффекты продолжительных корреляций в нестационарных рядах. Впервые он был применен для поиска дальних корреляций в цепочках ДНК. Метод базируется на

идеологии перехода от исходного временного ряда к обобщенной модели одномерных случайных блужданий (random work model).

На рис. 1 для примера представлены две реализации модели случайного процесса с различными корреляционными свойствами: одна моделируется гауссовым шумом  $fg$ , другая — броуновским шумом  $fbm$  с показателем Херста  $H = 0.1$ . Каждая реализация может быть преобразована в функцию кумулятивных сумм (профиль функции) вида:

$$y(k) = \sum_{i=1}^k [f(i) - \langle f \rangle], \quad (1)$$

где  $k = [1, N]$ ,  $N$  — количество элементов выбранной реализации.

Функция  $y(k)$  имеет следующую особенность: если все элементы реализации независимы (например, для гауссовой модели), то имеем случай одномерного дискретного случайного блуждания. Вероятности отрицательных и положительных приращений зависят от степени корреляции между соседними и удаленными элементами реализации, причем преобладание положительных или отрицательных корреляций свидетельствует о наличии „эффекта памяти“. На зависимостях  $y_g(k)$  и  $y_{bm}(k)$  демонстрируется, что вследствие преобладания положительных корреляций амплитуда флуктуационного профиля броуновского шума выше, чем у гауссового. Далее, в рамках метода, профиль  $y(k)$  итерационно разбивается на непрерывно сходящиеся отрезки в широком диапазоне значений  $n$ , в пределах каждого из которых методом наименьших квадратов определяется уравнение прямой, аппроксимирующей последовательность  $y(k)$ . Найденная аппроксимация  $y_n(k)$  рассматривается в качестве локального тренда. Далее вычисляется среднеквадратическая ошибка линейной аппроксимации — флуктуация относительно линейного тренда [14]:

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2}. \quad (2)$$

Считается, что зависимость  $F(n)$  часто имеет степенной характер  $F(n) \propto n^\alpha$ , причем скорость нарастания функции  $F(n)$  зависит от разности амплитуд флуктуационного профиля на малых и больших масштабах (рис. 1). Наличие линейного участка в двойном логарифмическом масштабе  $\lg F(n)$  от  $\lg n$  позволяет говорить о существовании скейлинга [14]. Расчет показал, что скейлинговый показатель  $\alpha$ , характеризующий наклон этого линейного участка, имеет значение 1.06 для броуновского шума и 0.57 для гауссового шума. Теоретические результаты имеют следующие значения: 1.1 и 0.5 для броуновского и гауссового шума соответственно. На практике величина  $\alpha$  отличается для разных  $n$ , что свидетельствует об изменении свойств скейлинга при увеличении масштаба — эффект мультифрактальности. Численные значения  $\alpha$ , характеризующие различные типы коррелированной динамики, приведены в табл. 1, составленной на основе [12,15].

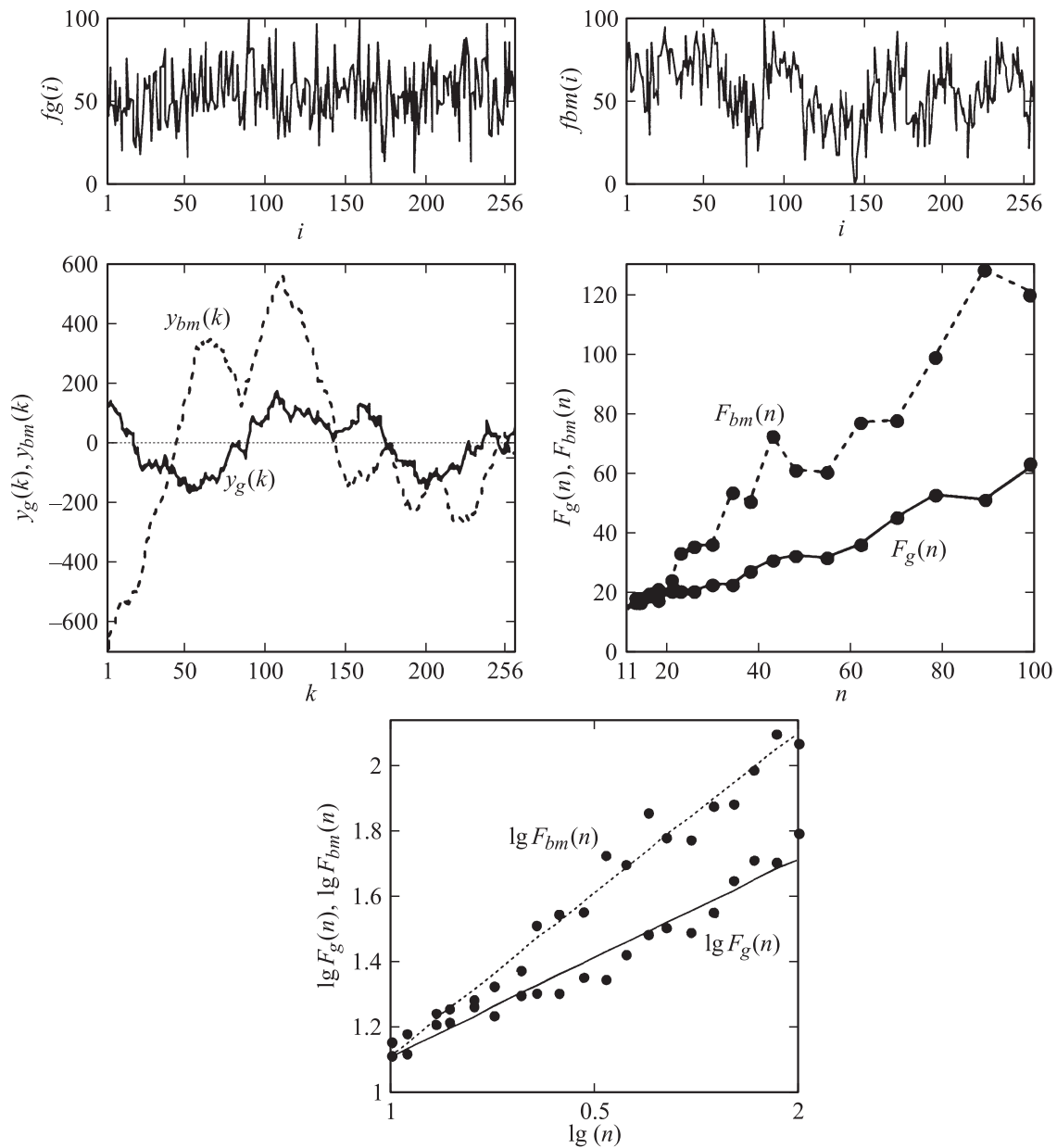


Рис. 1. Иллюстрация работы алгоритма DFA на моделях гауссового шума и одномерного броуновского движения.

Необходимо отметить, что в определенном диапазоне значений  $\alpha$  существует взаимосвязь между скейлинговыми характеристиками DFA-метода и законом спадания автокорреляционной функции (или функции спектральной плотности) [15].

**2.2. Двухмерная реализация метода DFA для анализа флуктуаций интерфейса поверхности**

Концепция флуктуационного анализа не ограничивается одномерным случаем, поэтому логично, что исследователи попытались обобщить его до двумерного и  $N$ -мерного вариантов. Наиболее известна реализация, описанная в работе [9]. На наш взгляд, у нее есть

недостаток, связанный с несоответствием получаемых значений скейлингового показателя двумерных изображений классической шкалы (табл. 1), что затрудняет их классификацию и ограничивает применение метода. В связи с этим в работе предлагается коррекция метода, заключающаяся в построчной, а не поверхностной компенсации линейного тренда. Предлагаемая методика состоит из следующих шагов.

1. Имеется самоподобный или самоаффинный интерфейс поверхности, представленный матрицей высот  $H(i, j)$ , где  $i = 1, 2, \dots, M$  и  $j = 1, 2, \dots, N$ . Вычислим куммулятивную поверхность  $Y(i, j)$ :

$$Y(i, j) = \sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^j H(j, j). \tag{3}$$

**Таблица 1.** Шкала значений скейлингового показателя DFA

Значения $\alpha$	Интерпретация
$0 < \alpha < 0.5$	Антикорреляция (резкие изменения)
$\alpha = 0.5$	Отсутствие корреляции — белый шум
$0.5 < \alpha < 1$	Наличие длительных корреляций, фрактальные свойства
$\alpha = 1$	Фликер-шум ( $1/f$ шум), фрактал
$\alpha > 1$	Нестепенные корреляции, процессы типа случайного блуждания, при $\alpha = 1.5$ — броуновский шум
$\alpha = 2$	Периодический сигнал

2. Разобьем кумулятивную поверхность на  $M_s \times N_s$  непересекающихся квадратных сегментов размером  $s \times s$ , причем  $M_s = M/s$  и  $N_s = N/s$ . В каждом сегменте сформируем поверхность вида  $Y_{u,w}(i, j) = Y(l_1 + i, l_2 + j)$  для  $1 \leq i, j \leq s$ , где  $l_1 = (u - 1)s$  и  $l_2 = (w - 1)s$ , где  $u, w$  — номера сегментов.

3. В каждой поверхности  $Y_{u,w}(i, j)$  вдоль всех профилей по любой из осей или по оси быстрого сканирования для случая АСМ вычислим полиномиальную функцию тренда 1-го порядка вида:

$$\tilde{Y}_{u,w}(i, j) = a i + b, \tag{4}$$

или

$$\tilde{Y}_{u,w}(i, j) = a j + b. \tag{5}$$

4. Вычислим функцию остатка (*detrending surface*):

$$\varepsilon_{u,w}(i, j) = Y_{u,w}(i, j) - \tilde{Y}_{u,w}(i, j). \tag{6}$$

5. Вычислим локальную среднеквадратическую флуктуационную функцию, имея в виду, что после (6)  $\langle \varepsilon_{u,w}(i, j) \rangle = 0$ :

$$F(s, u, w) = \sqrt{\frac{1}{s^2} \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s \varepsilon_{u,w}(i, j)^2}. \tag{7}$$

6. Вычислим полную среднеквадратическую флуктуационную функцию путем усреднения всех значений (7):

$$F(s) = \frac{1}{M_s N_s} \sum_{u=1}^{M_s} \sum_{w=1}^{N_s} F(s, u, w). \tag{8}$$

7. Далее будем изменять масштаб  $s$  в диапазоне  $s_{\min} \approx 4$  до  $s_{\max} \approx \min(M, N)$  или  $s_{\max} \approx \min(M, N)/4$  и вычислять  $F(s)$ , причем для широких диапазонов значений  $s$  справедлива следующая зависимость  $F(s) \propto s^\alpha$ .

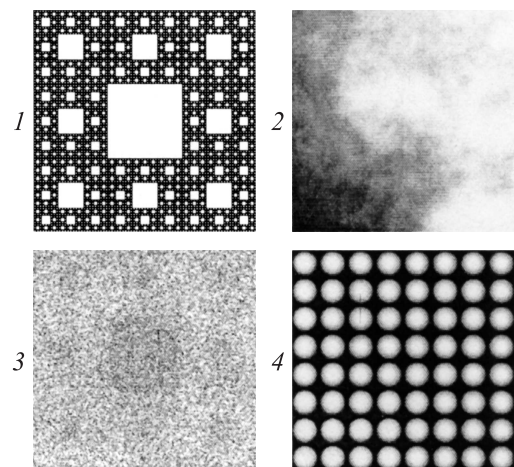
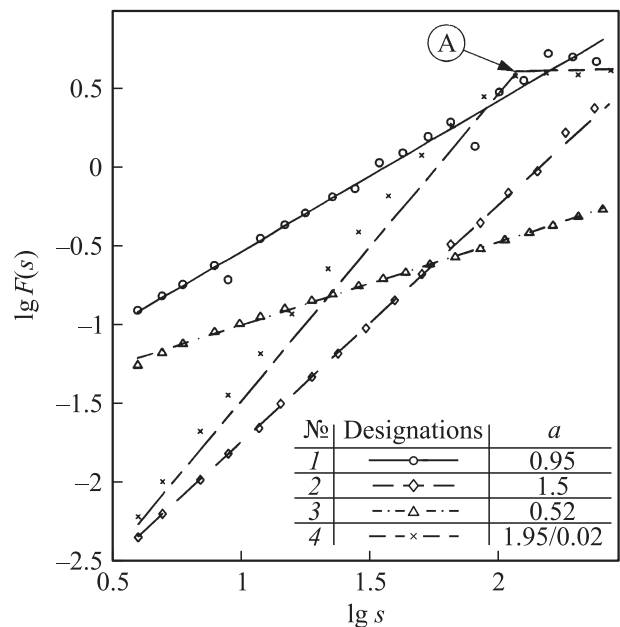
### 3. Экспериментальная часть

#### 3.1. Апробация метода 2D DFA на модельных поверхностях

В этом разделе показаны результаты исследования различного типа модельных поверхностей, с известным

правилом построения, с целью классификации скейлинговых значений.

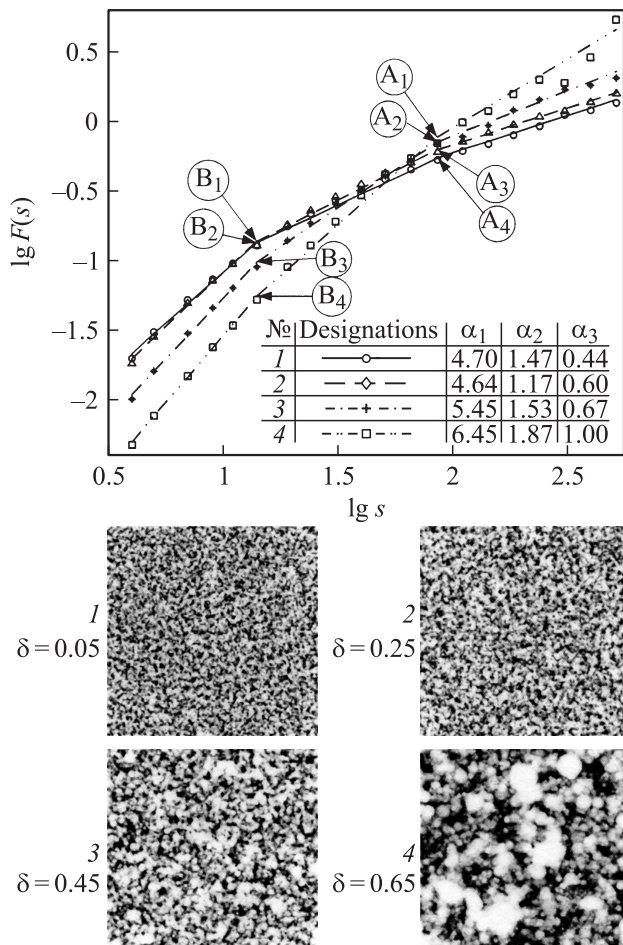
На рис. 2 показаны результаты расчета параметра  $\alpha$  для четырех синтетических поверхностей: 1) регулярного фрактала — ковра Серпинского, 2) случайного фрактала — броуновской поверхности с показателем Херста  $H = 0.5$ , 3) гауссового шума и 4) „кластеры“ — квадратной решетки из полусфер на плоскости. Данные обрабатывались с помощью программы расчета флуктуационных и фрактальных характеристик нестационарных сигналов [16]. Критерием выбора именно таких поверхностей было определение диапазона значений скейлингового показателя в зависимости от степени организации (коррелированности) поверхности структуры. В частности, регулярный фрактал и поверхность „кластеры“ — это упорядоченные поверхности, случайный фрактал —



**Рис. 2.** Расчет скейлинговой экспоненты для модельных поверхностей: 1 — ковер Серпинского, 2 — броуновская поверхность, 3 — гауссовый шум, 4 — кластеры.

слабоорганизованная поверхность, гауссовый шум — неупорядоченная структура.

Как видно, для первых трех поверхностей характерна монофрактальность, т.е. зависимость  $\lg F(s)$  от  $\lg s$  — прямая линия. Это типично для регулярных фракталов, поскольку при изменении масштаба структура поверхности не меняется. Для моделей „броуновская поверхность“ и „гауссовый шум“ визуально хоть и наблюдается зашумленность поверхности, однако этот шум является фрактально однородным, и поэтому для них характерна монофрактальность. При этом получились типичные значения скейлингового показателя: 1.5 для броуновской поверхности и 0.52 для гауссового шума. Для модели „кластеры“ наблюдается излом (crossover) на зависимости  $\lg F(s)$  от  $\lg s$ : сначала значение  $\alpha$  приближается к 2, а далее переходит в 0 (точка А), что говорит об отсутствии любых флуктуаций выше указанного масштаба, т.е. произошла фиксация амплитуды периодического процесса. Схожие результаты получились в работе [13] при исследовании синусоидального тренда. Таким образом, такой вид зависимости  $\lg F(s)$  от  $\lg s$  будет



**Рис. 3.** Исследование флуктуационной функции в зависимости от масштаба для модельной поверхности „частицы“ с вариацией разброса среднего размера трехмерных образований на поверхности.

характерен для всех поверхностей, обладающих дальним порядком (например, идеальный монокристалл).

Далее рассмотрим поверхности типа „частицы“, сгенерированные с помощью программы Gwyddion [17]. Исходный размер трехмерных образований (частиц) на поверхности составлял 3 пикселя при размере поверхности 512 пикселей. Разброс размера частиц  $\delta$  варьировался от 0.05 до 0.65 между большим и малым размерами. На рис. 3 показаны результаты исследования методом 2D DFA.

Как видно, на всех зависимостях имеются 2 излома (точки  $A_1$ – $A_4$  на больших масштабах и  $B_1$ – $B_4$  на малых масштабах). На малых масштабах  $\alpha$  достигает аномально больших значений (4–6), на средних — 1.5–1.9, на больших — 0.4–1. При этом с увеличением разброса размера частиц наблюдается тенденция к увеличению наклона прямой. Для первой поверхности на средних масштабах фиксируется  $\alpha$ , близкий к  $\alpha$  броуновской поверхности. Интересным фактом является то, что излом для всех четырех поверхностей наблюдается на одном и том же масштабе. Вероятно, это связано с тем, что сам тип поверхности не меняется, а меняется только степень шероховатости. Таким образом, данный эксперимент показал, что метод 2D DFA может эффективно использоваться при исследовании эволюции поверхности, и изменение размеров кластеров может непосредственно характеризоваться изменением скейлингового показателя.

Далее были проведены исследования поверхностей, сгенерированных с помощью спектрального синтеза, также в программе Gwyddion. Модуль спектрального синтеза создает случайно шероховатые поверхности синтезом преобразования Фурье поверхности в соответствии с заданными параметрами и затем применением обратного преобразования Фурье для получения реальной поверхности. При генерации поверхностей варьировалась длина автокорреляции гауссиана путем включения гауссова множителя (умножение коэффициентов Фурье на гауссову функцию, что в реальном пространстве соответствует свертке с гауссианом) [17]. Наибольшее значение длины автокорреляции соответствует поверхности № 1, наименьшее — поверхности № 5 (рис. 4).

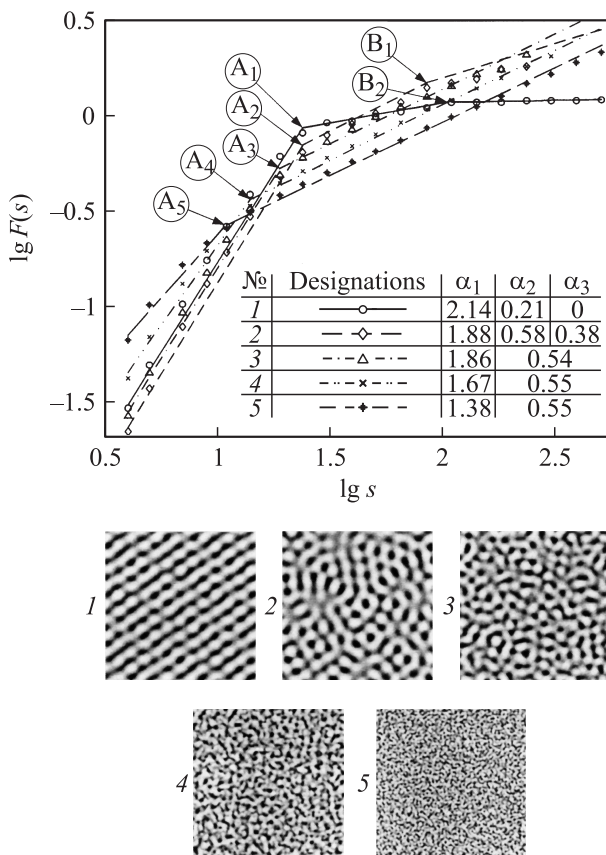
Как можно увидеть, с уменьшением длины автокорреляции поверхность становится более зашумленной, что соответствует уменьшению скейлингового показателя на малых масштабах и смещению первой точки излома в сторону уменьшения масштаба (точки  $A_1$ – $A_5$ ). Для первых двух структур на графиках наблюдается второй излом (точки  $B_1$ ,  $B_2$ ), причем для первой затем наблюдается переход скейлингового показателя в 0. Это очевидно, поскольку поверхность № 1 представляет собой наиболее упорядоченную структуру. Также интересен тот факт, что для поверхностей № 3–№ 5 после второго излома скейлинговый показатель становится одинаковым и равным 0.55.

Таким образом, апробация метода 2D DFA на модельных поверхностях позволяет классифицировать различного типа поверхности по скейлинговому показателю.

**Таблица 2.** Технологические параметры получения пленок *a*-Si:H

№ образца	Тип подложки	Температура подложки $T_{sub}, ^\circ C$	Время осаждения $t_{dep}, ч$	Толщина пленки $d_f, мкм$
1	КЭФ-2*	220	5	3
2	КЭФ-2	170	5	3
3	КЭФ-2	230	2.5	1.5
4	ЭКДБ-0.03	220	5	3
5	ЭКДБ-0.03	230	2.5	1.5
6	ЭКЭС-0.01	170	5	3
7	ЭКЭС-0.01	230	2.5	1.5

*Примечание.* \* КЭФ — кремний электронный, легированный фосфором; ЭКДБ — эпитаксиальный кремний, дырочный, легированный бором; ЭКЭС — эпитаксиальный кремний, электронный, легированный сурьмой.



**Рис. 4.** Исследование средней флуктуационной функции в зависимости от масштаба для спектрально-синтезированных поверхностей с вариацией длины автокорреляции.

Метод 2D DFA позволяет исследовать обширный класс материалов, оценить степень упорядоченности структуры, исследовать процессы самоорганизации.

### 3.2. Апробация метода 2D DFA на поверхностных интерфейсах пленок *a*-Si:H

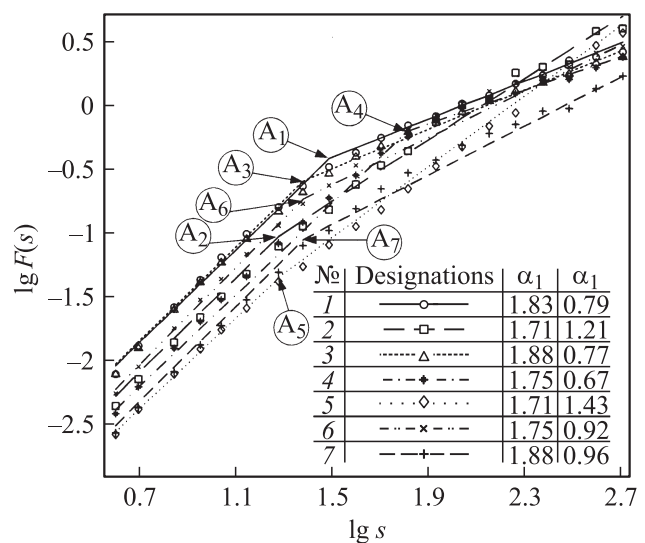
В качестве экспериментальных образцов были выбраны пленки *a*-Si:H, полученные методом тлеющего

разряда (ТР) при различных технологических режимах (табл. 2).

Микрорельеф поверхности образцов исследовался с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ), при диаметре зонда кантилевера около 30 нм. Размеры сканов составили  $256 \times 256, 5 \times 5$  мкм.

Результаты расчета скейлинговых показателей на 20 масштабах (авторская программа в среде Matlab/Octave) для данных экспериментальных образцов представлены на рис. 5.

Как можно заметить, на графиках 2D DFA четко заметен излом (точки  $A_1$ – $A_7$ ), подтверждающий, что поверхность исследованных образцов не является монофрактальной. На малых масштабах значения скейлингового показателя получились близкими к 2, а на больших — меньше 1. Это объясняется тем, что на малых масштабах фиксируется синусоидальная составляющая интерфейса, поскольку при сканировании образца присутствует эффект свертки (т.е. кантилевер оказывает сглаживающее воздействие на реальную картину структуры поверхности). На больших масштабах значение скейлингового



**Рис. 5.** Результаты расчета скейлинговых показателей на 20 масштабах для пленок *a*-Si:H.

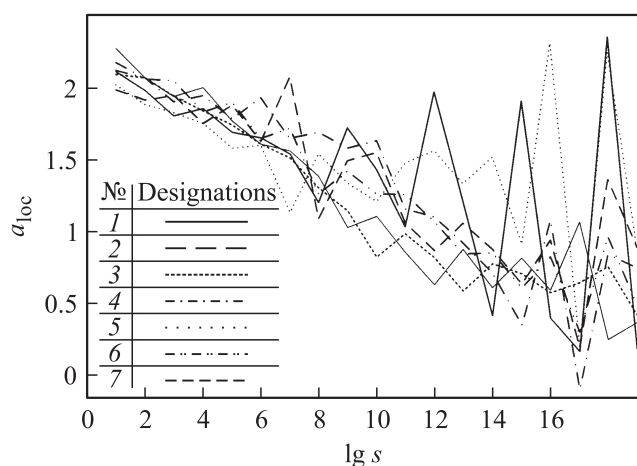


Рис. 6. Эволюция скейлингового показателя в зависимости от масштаба для пленок  $a$ -Si:H.

показателя попадает в категорию от 0.5 до 1.5, что говорит о наличии коррелированного шума.

Поскольку поверхность реальных образцов не обладает монофрактальной структурой, т.е.  $\alpha \neq \text{const}$ , для повышения информативности метода 2D DFA предлагается находить локальные изломы на зависимости, выполняя аппроксимацию не по всем значениям, а между каждыми двумя соседними значениями флуктуационной функции. Полученная кривая отражает локальное изменение скейлингового показателя, позволяя изучить эволюцию  $\alpha$  с ростом масштаба. Как видно из рис. 6, с увеличением масштаба наблюдалась нестабильность скейлингового показателя и соответственно корреляционных свойств, однако для средних значений  $\alpha$  характерна тенденция к уменьшению.

Таким образом, применение метода 2D DFA для модельных и реальных поверхностей показало его эффективность и информативность в исследовании информационно-корреляционных свойств.

#### 4. Заключение

В данной работе был разработан алгоритм работы модифицированного под исследование двумерных поверхностей метода DFA (2D DFA). Предложено выявлять корреляции поверхности по величине скейлингового показателя. Для этого были выбраны различные модельные поверхности с различной степенью корреляций. Были получены следующие величины скейлинговых показателей. Для регулярного фрактала (ковра Серпинского)  $\alpha$  получился равным 0.95, для броуновской поверхности — 1.5, для гауссового шума — 0.52 на всем диапазоне масштабов (монофрактальные поверхности). Для модельной поверхности „кластеры“  $\alpha$  получился равным 1.95 до излома на зависимости и 0.02 после излома. Исследование модельных поверхностей „частицы“ показало 2 различных диапазона значений по мере увеличения масштаба: 4.7–6.45, 1.47–1.87, 0.44–1. Для

сгенерированных с помощью спектрального синтеза поверхностей результаты следующие: на малых масштабах значения  $\alpha$  получились в диапазоне 1.38–2.14, а на больших масштабах результаты разнятся. Поверхность с наибольшей длиной автокорреляции имеет значения  $\alpha$ , равные 0.21 и 0 на средних и больших масштабах соответственно, при уменьшении длины автокорреляции для второй поверхности  $\alpha$  равен 0.58 и 0.38. Для трех других поверхностей с еще меньшей длиной автокорреляции  $\alpha$  становится равным 0.54–0.55. Таким образом, было показано, что метод 2D DFA позволяет исследовать обширный класс материалов, оценивать степень упорядоченности структуры, исследовать процессы самоорганизации; также метод эффективен при исследовании эволюции поверхности, например полупроводниковых материалов на различных стадиях роста.

Далее были исследованы корреляционные свойства поверхности пленок  $a$ -Si:H. Результаты показали наличие немонофрактальности поверхности и нескольких составляющих интерфейса поверхности (шумовой и синусоидальной). На малых масштабах было получено значение скейлингового показателя, близкое к 2, что говорит о периодической составляющей интерфейса поверхности, а на больших масштабах значения  $\alpha$  в большинстве меньше 1, что говорит о шумовой составляющей интерфейса и наличии длительных корреляций. Это близко к результатам, полученным для модельных поверхностей, сгенерированных методом спектрального синтеза.

В дальнейшем представляется интересным проводить исследования на реальных образцах, сравнивая результаты 2D DFA для сканов, полученных методами АСМ и растровой электронной микроскопии. Также целесообразно сравнить результаты, получаемые методом 2D DFA, с результатами других методов исследования информационно-корреляционных характеристик, в частности методом расчета СВИ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, на оборудовании РЦЗМ РГТУ.

#### Список литературы

- [1] А.А. Айвазов, Б.Г. Будагян, С.П. Вихров, А.И. Попов. *Неупорядоченные полупроводники* (М., Высш. шк., 1995) с. 352.
- [2] Н.В. Бодягин, С.П. Вихров. Приложение к журналу „Вестник РГТУ“, 4, 9 (2009).
- [3] ISO 4287-1997.
- [4] ГОСТ 25142-82.
- [5] С.М. Мурсалов, Н.В. Бодягин, С.П. Вихров. Письма ЖТФ, 26 (15), 53 (2000).
- [6] Н.В. Бодягин, С.П. Вихров. Письма ЖТФ, 23 (19), 77 (1997).
- [7] Н.В. Бодягин, С.П. Вихров. Письма ЖТФ, 23 (19), 81 (1997).
- [8] S.V. Mayur, T. Bakos, E.S. Aydil, D. Maroudas. Phys. Rev. Lett., 95, 216 102 (2005).

- [9] A.-L. Barabasi, H.E. Stanley. *Fractal concepts in surface growth* (Cambridge University Press, 1995).
- [10] Г.В. Востовский, А.Г. Колмаков, И.Ж. Бунин. *Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов* (М., НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“) с. 116.
- [11] П.В. Короленко, М.С. Маганова, А.В. Меснянкин. *Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике. Фрактальные и мультифрактальные методы, вейвлет-преобразования* (М., Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, Науч.-исслед. ин-т ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, 2004): Учеб. пособие, с. 82.
- [12] G.-F. Gu, W.-X. Zhou. *Phys. Rev. E*, **74**, 061 104 (2006).
- [13] K. Hu, P.C. Ivanov, Z. Chen, P. Carpena, H.E. Stanley. *Phys. Rev. E*, **64**, 011 114 (2001).
- [14] C.-K. Peng, S. Havlin, H.E. Stanley, A.L. Goldberger. *CHAOS*, **5**, 82 (1995).
- [15] <http://www.physionet.org/tutorials/fmnc/node6.html>
- [16] Программа для расчета флуктуационных и фрактальных характеристик нестационарных сигналов (А.В. Алпатов и др.). Свид-во о гос. регистрации для ЭВМ „№ 2011612858, 8 апреля 2011 г.“
- [17] <http://qwyddion.net>

Редактор Т.А. Полянская

## Elicitation of surface interface correlations of $\alpha$ -Si:H films by the two-dimensional Detrended Fluctuation Analysis (2D DFA)

A.V. Alpatov, S.P. Vikhrov, N.V. Grishankina

Ryazan State Radio Engineering University,  
390005 Ryazan, Russia

**Abstract** An implementation of the modified two-dimensional Detrended Fluctuation Analysis method for the elicitation of surface interfaces correlations was presented. The model surfaces with a noted construction rule, with different structural properties: ordered, structures with a weak order, chaotic were investigated. The obtained scaling exponent values compared with the noted scale of values. The scaling behavior features on different scales were elicited. It was revealed that the method can be efficiently used in surface evolution studies, for example in a disordered semiconductor films growth, in an estimation of an order degree, in an investigation of self-organization processes. Hydrogenated amorphous silicon films surfaces were explored, scans were obtained by Atomic Force Microscopy. Diagnostics by the two-dimensional Detrended Fluctuation Analysis method shown the presence of a surface non-monofractality and a few interface components — noise and sinusoidal.