УДК 621.315.592

# КЛАССИФИКАЦИЯ СТЕПЕНИ САМООРГАНИЗАЦИИ РЕЛЬЕФА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ 2D DFA И СВИ

Н. В. Рыбина, к.ф.-м.н., доцент каф. МНЭЛ, РГРТУ, pgnv@mail.ru С. П. Вихров, д.ф.-м.н., профессор, г.н.с., Научно-исследовательский институт обработки аэрокосмических изображений (НИИ «Фотон»), РГРТУ, me@rsreu.ru Н. Б. Рыбин, к.ф.-м.н., вед.инж. УОНИ, РГРТУ, nikolay-rybin@ya.ru

**Цель работы** – классификация тонкопленочных структур по степени самоорганизации с помощью скейлингового показателя, средней взаимной информации и максимальной взаимной информации, определяемых методами двухмерного флуктуационного анализа с исключенным трендом и средней взаимной информации.

Синтезированы модельные поверхности различной степени упорядоченности (самоорганизации), рельеф которых исследовался методами двухмерного флуктуационного анализа с исключенным трендом и средней взаимной информации. По результатам исследования модельных поверхностей составлены таблицы значений скейлингового показателя, средней и максимальной взаимной информации, которые позволяют классифицировать тонкопленочные структуры по степени самоорганизации. Апробация полученных результатов была проведена на тонкопленочных образцах a-Si:H. Сделана попытка оценки влияния технологических режимов роста (время осаждения, давление водорода в камере) на процессы самоорганизации в пленках a-Si:H.

**Ключевые слова**: Тонкопленочные структуры, упорядоченность, поверхность, самоорганизация, средняя взаимная информация, максимальная взаимная информация, двухмерный флуктационный анализ с исключенным трендом, корреляционный вектор, скейлинговый показатель.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2017-61-3-143-151

#### Введение

Самоорганизующиеся структуры в настоящее время являются перспективными в качестве будущей элементной базы твердотельной электроники. Здесь можно выделить две тенденции развития:

 использование квантово-размерных эффектов (например, создание одноатомных компьютеров);

 – создание гетерогенных самоорганизующихся структур.

По сути, к гетерогенности приводит уже само уменьшение размеров активных областей. Если рассматривать чисто кристаллические материалы, на основе которых сейчас получают большую часть электронных приборов, то с точки зрения структурных свойств это сильно коррелированные системы. Переход к гетерогенным самоорганизующимся материалам означает переход к структурам с большей энтропией, или, другими словами, с большой информационной емкостью. Для получения знаний о процессах самоорганизации при структурообразовании твердых тел необходимы физические методы исследования структуры материалов и аналитические методы оценки корреляционных свойств структуры.

Структуру тонкопленочных материалов экспериментально можно оценить по их рельефу. Рельеф поверхности, если он сформирован в процессе роста (а не процессами шлифовки, полировки), является одним из наилучших параметров, отражающих структуру материала в объеме. Следует учитывать, что если тонкопленочный материал осаждается на подложку, то рельеф самой подложки может оказывать влияние на рельеф материала. Рельеф тонкопленочных материалов исследовали в нанометровом диапазоне методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Степень самоорганизации [1] определяли по информационно-корреляционным параметрам с помощью методов двумерного флуктуационного анализа с исключенным трендом (2D detrended fluctuation analysis, 2D DFA) [2, 3]



Рисунок 1 – Параметры и характеристики самоорганизации

и средней взаимной информации (СВИ) [4-10]. Метод 2D DFA позволяет рассчитывать скейлинговый показатель, характеризующий степень корреляций в структуре, и корреляционный вектор, показывающий масштаб проявления этих корреляций. Метод СВИ позволяет рассчитывать непосредственно само значение СВИ, характеризующее степень упорядоченности, и значение максимальной взаимной информации (МВИ), показывающее разброс данных (количество точек различной высоты). Зная величину МВИ и количество одинаковых элементов в структуре, можно рассчитать информационную емкость структуры (рельефа). На рисунке 1 представлены описанные информационно-корреляционные параметры.

Целью данной работы была классификация тонкопленочных структур по степени самоорганизации с помощью скейлингового показателя *а*, СВИ и МВИ, определяемых по методам 2D DFA и СВИ. Для этого были выбраны и синтезированы модельные поверхности различной степени упорядоченности (самоорганизации), рельеф которых исследовался методами 2D DFA и СВИ. Апробация полученных результатов была проведена на экспериментальных тонкопленочных образцах. В качестве экспериментальных структур выбраны пленки аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H). На данный момент а-Si:Н широко используется, например, в тонкопленочных солнечных элементах. С точки зрения изучения процессов самоорганизации a-Si:H представляет значительный интерес, так как формирование его структуры происходит в неравновесных условиях, в термодинамически открытой нелинейной системе. В данной работе сделана попытка оценки влияния технологических режимов роста (время осаждения, давление водорода в камере) на процессы самоорганизации в пленках a-Si:H.

## Информационно-корреляционные параметры упорядоченных и хаотических модельных поверхностей

Структура твердотельных материалов многообразна и сложна. Поэтому чтобы исследовать в них процессы самоорганизации, необходима база данных набора параметров, характеризующих самоорганизацию. Для этого были синтезированы и исследованы модельные поверхности различной степени самоорганизации. Синтезированные модельные поверхности условно разделим на 3 группы: упорядоченные, смешанные, хаотические.

В качестве упорядоченных структур выбраны поверхности типа «Кубы», «Конусы» и синусоидальные поверхности. Поверхности «Кубы» представляют собой упорядоченные фигуры в форме кубов на гладкой поверхности с различным периодом. Данная поверхность характеризуется резким спаданием высоты от максимума до нуля (ступенчатая функция). Поверхности «Конусы» представляют собой упорядоченные фигуры в форме конусов на гладкой поверхности с разными периодами. В данном случае рельеф высот меняется по линейному закону (линейно-ступенчатая функция). Для синусоидальных поверхностей характерен нелинейный закон изменения рельефа высот (синусоидальная функция). Поскольку для упорядоченных структур основной характеристикой можно считать период в их расположении, то первой задачей было изучить, как влияет изменение периода на информационно-корреляционные характеристи ки модельных поверхностей.

В качестве неупорядоченных структур была выбрана поверхность «белый шум». Зададим физический размер поверхностей 1×1 мкм при размере в пикселях 512×512. Максимальная высота выступов условно выбрана равной 10 нм.

В таблице 1 представлены рассчитанные информационно-корреляционные параметры упорядоченных и хаотических модельных поверхностей по результатам исследования методами СВИ и 2D DFA.

Из таблицы 1 видно, что для синусоидальных поверхностей значения МВИ получились высокими (0,718-0,731), но чуть меньше, чем у «белого шума». Значения СВИ для синусоидальных поверхностей были максимальными по сравнению с другими группами тестовых поверхностей. Рассчитанные значения корреляционного вектора *d* с высокой точностью совпадают с периодами синусоиды.

Для группы поверхностей «Конусы» по результатам исследования с помощью метода СВИ выявлено, что начиная с определенного количества конусов на поверхности (16×16), наблюдается тенденция уменьшения МВИ и увеличения СВИ по мере уменьшения периода в расположении конусов. Уменьшение МВИ объясняется тем, что для описания конуса меньшего периода

Таблица 1 – Информационно-корреляционные параметры упорядоченных и хаотических модельных поверхностей, определенных с помощью СВИ и 2D DFA

N⁰	Описание поверхности	МВИ	СВИ	α	<i>d</i> , нм				
	Упорядоченные поверхности								
	I. Синусоидальные поверхности:								
1	период 333 нм	0,727	0,126	2; 0	332				
2	период 167 нм	0,731	0,127	2; 0	168				
3	период 84 нм	0,730	0,129	2; 0	83				
4	период 42 нм	0,718	0,123	2; 0	41				
II. Поверхности «Конусы»:									
5	период 500 нм	0,673	0,101	2; 0	490				
6	период 250 нм	0,672	0,086	2; 0	223				
7	период 125 нм	0,673	0,085	2; 0	128				
8	период 63 нм	0,670	0,100	2; 0	63				
9	период 32 нм	0,651	0,171	2; 0	31				
10	период 16 нм	0,571	0,256	2; 0	15				
	III.	Поверхности	«Кубы»:						
11	период 115 нм	0,101	0,004	1,64; 0	106				
12	период 80 нм	0,167	0,008	1,75; 0	78				
13	период 58 нм	0,278	0,014	1,9; 0	59				
14	период 35 нм	0,484	0,019	1,84; 0,4	32				
	Хаотическая поверхность								
15	«белый шум»	0,752	0,001	0,5	-				

участвует меньше точек. Увеличение СВИ объясняется тем, что увеличивается количество векторов обхода, при которых совпадают значения высот. Рассчитанные значения корреляционного вектора по методу 2D DFA имели незначительные отклонения от величин периодов в расположении конусов.

Для группы поверхностей «Кубы» значение скейлингового показателя было заниженным (1,64-1,9) по сравнению с теоретическим (2). На наш взгляд, это связано с наличием резких переходов рельефа кубов. По этой же причине значение корреляционного вектора менее точно отражает период в расположении кубов. Исследование методом СВИ показало, что значения средней взаимной информации были низкими (0,004-0,019) - еще ниже, чем у поверхностей «Конусы». Значения МВИ для поверхностей «Кубы» были также невысокими (0,101-0,484). Однако это не противоречит структурным особенностям этих модельных поверхностей. Модельные поверхности «Кубы» характеризуются резким спаданием высоты от максимума до нуля (ступенчатая функция), поэтому обладают низкой энтропией.

Для «белого шума» на зависимости флуктуационной функции перегибов не наблюдалось, величина скейлингового составила 0,5. Это соответствует теоретическим основам метода 2D DFA [2]. Результаты исследования с помощью метода СВИ показали, что для «белого шума» получена самая большая величина МВИ, равная 0,752. Иная ситуация наблюдается с результатами расчета средней взаимной информации. Поверхность «белый шум» – это полностью хаотическая структура, поэтому упорядоченность в структуре минимальна (СВИ=0,001).

# Информационно-корреляционные параметры смешанных модельных поверхностей

Рельеф тонких пленок, использующихся в твердотельной электронике, сложен и многообразен. По этой причине были синтезированы модельные поверхности смешанного типа. Были выбраны следующие структуры:

1) наложение нескольких синусоид;

2) синусоида с белым шумом;

 полусферические структуры с белым шумом. В данном случае варьировалась амплитуда шума, а также упорядоченность в расположении полусфер на поверхности.

Все модельные поверхности были синтезированы, исходя из соображений сходства с рельефом существующих тонкопленочных структур в твердотельной электронике.

В таблице 2 представлены рассчитанные информационно-корреляционные параметры модельных поверхностей смешанного типа по результатам обработки методами СВИ и 2D DFA.

На графике флуктуационной функции синусоидальных поверхностей с двумя гармоническими составляющими наблюдались 2 перегиба. Значения α до первого перегиба – 2, на интервале между первым и вторым перегибом – 0,6-0,7, после второго перегиба – 0. Рассчитанные значения d согласуются со значениями периодов гармонических составляющих синусоид. У синусоидальных поверхностей с двумя гармоническими составляющими МВИ несколько снижается по сравнению с синусоидальными поверхностями с одной гармонической составляющей. Очевидно, это связано с уменьшением разброса высот профиля поверхности и, как следствие, уменьшением энтропии поверхности. СВИ также уменьшалась по сравнению с синусоидальными поверхностями с одной гармонической составляющей, что говорит об уменьшении степени упорядоченности.

На графике флуктуационной функции синусоидальной поверхности с тремя гармоническими составляющими наблюдались 3 перегиба. Значения α до первого перегиба – 2, на интервале между первым и вторым перегибом - 1,83, между вторым и третьим – 1,03, после третьего перегиба – 0. Рассчитанные значения *d* согласуются со значениями периодов гармонических составляющих синусоид. Значение МВИ для этой структуры незначительно отличается от МВИ для синусоидальной поверхности с двумя гармоническими поверхностей. Значение СВИ снижается до 0,044. Это говорит о том, что увеличение количества периодических компонент в структуре приводит к уменьшению степени упорядоченности.

При наложении на синусоиду белого шума (амплитудой 30 % по отношению к суммарной структуре) метод 2D DFA выявил наличие перегиба на зависимости флуктуационной функции, подтверждающего существование гармонической составляющей в структуре. По методу СВИ для поверхности «синусоида с белым шумом» значение МВИ составило 0,542. Значение СВИ для поверхности «синусоида с белым шумом» попадает в промежуточное положение между отдельно взятыми поверхностями «белый шум» и «синусоида».

Для группы модельных поверхностей, представляющих собой упорядоченное расположение полусфер на поверхности, на графиках флуктуационной функции наблюдался один перегиб. Рассчитанные по этому перегибу значения корреляционного вектора находились в диапазоне 252-256 нм при фактическом периоде 250 нм в

N⁰	Описание поверхности	МВИ	СВИ	α	<i>d</i> , нм
	I. Синусоида	альные пов	ерхности		
1	Наложение двух синусоид с периодами	0,672	0,079	2; 0,7; 0	170; 84
	167 нм и 84 нм				
2	Наложение двух синусоид с периодами	0,651	0,070	2; 0,6; 0	333; 41
	333 нм и 42 нм	0.657	0.044	2 1 92 1 92 0	246
3	Наложение трех синусоид с периодами		0,044	2; 1,83; 1,03; 0	246 HM, 127 m/
	230 HM, 123 HM 105 HM				137 нм, 62 нм
4	Белый шум (30%) + синусоила с перио-	0.542	0.009	11.01	195
	дом 167 нм	0,012	0,005	1,1,0,1	190
	II. Полусфе	ры с белыл	і шумом		
	Упорядоченное расположение полуса	bep на пове	грхности (п	териод 250 нм)	
5	0% шума	0,678	0,054	1,99	252
6	5% шума	0,655	0,053	1,78	252
7	10% шума	0,667	0,049	1,74	252
8	15% шума	0,673	0,046	1,66	252
9	20% шума	0,677	0,044	1,62	252
10	25% шума	0,676	0,041	1,55	252
11	30% шума	0,676	0,040	1,51	252
12	35% шума	0,670	0,037	1,46	252
13	40% шума	0,671	0,036	1,44	252
14	45% шума	0,666	0,034	1,39	256
15	50% шума	0,664	0,033	1,38	256
	Неупорядоченное расположение полус	фер на пов	ерхности (	размер полусфер	250 нм)
16	0% шума	0,489	0,023	1,99	366
17	5% шума	0,505	0,022	1,84	378
18	10% шума	0,530	0,020	1,74	390
19	15% шума	0,550	0,019	1,70	390
20	20% шума	0,571	0,017	1,53	390
21	25% шума	0,581	0,017	1,48	390
22	30% шума	0,587	0,016	1,48	390
23	35% шума	0,607	0,015	1,39	390
24	40% шума	0,607	0,014	1,36	398
25	45% шума	0,622	0,014	1,32	398
26	50% шума	0,617	0,014	1,30	390

Таблица 2 – Информационно-корреляционные параметры модельных поверхностей смешанного типа, определенных с помощью СВИ и 2D DFA

расположении полусфер на поверхности. При увеличении амплитуды накладываемого на полусферы шума с 0 до 50 % наблюдалось постепенное снижение корреляционного вектора с 1,99 до 1,38. Значения МВИ находились в диапазоне 0,664-0,678. При этом с увеличением амплитуды накладываемого на полусферы шума не наблюдалось каких-либо зависимостей в изменении МВИ. Значения СВИ для этой группы поверхностей находились в диапазоне 0,033-0,054. При этом с увеличением амплитуды накладываемого шума СВИ убывала. Для группы модельных поверхностей, представляющих собой неупорядоченное расположение полусфер на поверхности, на графиках флуктуационной функции наблюдался также один перегиб. Значения корреляционного вектора находились в диапазоне 366-398 нм. При увеличении амплитуды накладываемого на полусферы шума не наблюдалось каких-либо зависимостей в изменении корреляционного вектора. При увеличении амплитуды накладываемого на полусферы шума с 0 до 50 % наблюдалось постепенное снижение скейлингового показателя с 1,99 до 1,30, что соответствует теоретическим основам метода 2D DFA. Значения МВИ находились в диапазоне 0,489-0,622, СВИ – 0,014-0,022. С увеличением амплитуды накладываемого на полусферы шума наблюдалось возрастание МВИ и убывание СВИ.

### Классификация значений скейлингового показателя и СВИ

По результатам исследования модельных поверхностей методами 2D DFA и СВИ были составлены таблицы значений скейлингового показателя (таблица 3), СВИ (таблица 4) и МВИ (таблица 5).

Итак, согласно таблице 3, структуры с  $\alpha \leq 0,5$  представляют собой низкокоррелированные системы. Такой случай может возникать при наложении хаотической составляющей на гармоническую составляющую. В этом случае значение скейлингового показателя после перегиба флуктуационной функции усредняется между значениями скейлингового показателя для гармонической структуры ( $\alpha = 0$ ) и хаотической структуры (например,  $\alpha = 0,5$  для белого шума). При  $\alpha = 0$  корреляции в системе отсутствуют.

Таблица 3 – Диапазоны значений скейлингового показателя

Значения	Интерпретация							
α								
a≤0,5	Отсутствие корреляций, низко-							
	коррелированные системы.							
	Примеры поверхностей: белый							
	шум, смешанные поверхности (си-							
	нусоида с шумом, конусы с шумом,							
	полусферы с шумом)							
0,5<α<2	Наличие длительных и несте-							
	пенных корреляций, фрактальные							
	свойства, процессы типа случайно-							
	го блуждания.							
	При <i>а</i> =1 – фликер-шум (1/f							
	шум), регулярный фрактал [2].							
	При <i>α</i> =1,5 – броуновский шум.							
	Другие примеры поверхностей:							
	наложение синусоидальных по-							
	верхностей с разным периодом,							
	конусы, кубы, синусоида с шумом,							
	конусы с шумом, полусферы с шу-							
	МОМ							
α=2	Строго гармонические сигналы,							
	упорядоченные структуры.							
	Примеры поверхностей: сину-							
	соида, полусферы							

При 0,5< $\alpha$ <2 в системе могут присутствовать длительные или нестепенные корреляции. В частности,  $\alpha$ =1 характерно для фликер-шума (1/f шума) и регулярного фрактала,  $\alpha = 1,5 - для$  броуновского шума. Скейлинговый показатель этого диапазона наблюдается на зависимости флуктуационной функции до перегиба в основном для смешанных структур или для структур с резкими перепадами высот в их профиле (конусы, кубы).

Значение  $\alpha = 2$  характерно для строго упорядоченных структур, наблюдается до перегиба флуктуационной функции.

Таблица 4 – Диапазоны значений СВИ

Значения	Интерпретация				
СВИ					
СВИ<0,02	Низкая упорядоченность				
	структур.				
	Примеры поверхностей:				
	кубы, белый шум, синусоида				
	с белым шумом, конусы с				
	белым шумом, неупорядо-				
	ченно расположенные полу-				
	сферы с шумом				
0,02<СВИ<0,1	Средняя упорядоченность				
	структур.				
	Примеры поверхностей:				
	наложение синусоидальных				
	поверхностей с разным пери-				
	одом, конусы, упорядоченно				
	расположенные полусферы с				
	шумом				
СВИ>0,1	Высокая упорядоченность				
	структур.				
	Примеры поверхностей:				
	синусоида				

На основе обработки модельных поверхностей методом СВИ получены следующие диапазоны степени упорядоченности (таблица 4):

- СВИ<0,02 – низкая упорядоченность структур;

-0,02<СВИ<0,1 - средняя упорядоченность структур;

- СВИ>0,1 – высокая упорядоченность структур.

Следует подчеркнуть, что здесь имеется в виду под термином «упорядоченность». Например, поверхности «Кубы» попадают в категорию низкой упорядоченности. Но визуально наблюдается высокая организация в расположении кубов. Поверхность «Кубы» – ступенчатая функция, содержащая два значения высот (фактически 0 и 1). Поэтому в данном случае при обходе массива точек этой поверхности векторами разной длины велика вероятность попадания одного конца вектора в 0, а другого – в 1. Поэтому в итоге усредненная взаимная информация получается низкой.

Таблица 5 – Диапазоны значений МВИ

Значения	Интерпретация						
СВИ							
МВИ<0,5	Низкая информационная						
	емкость и энтропия структур.						
	Примеры поверхностей:						
	кубы						
0,5<МВИ<0,7	Средняя информационная						
	емкость и энтропия структур.						
	Примеры поверхностей:						
	наложение синусоидальных						
	поверхностей с разным пери-						
	одом, конусы, синусоида с						
	шумом, упорядоченно и						
	неупорядоченно расположен-						
	ные полусферы с шумом						
МВИ>0,7	Высокая информационная						
	емкость и энтропия структур.						
	Примеры поверхностей:						
	синусоида, белый шум						

Также по результатам обработки были получены следующие диапазоны МВИ (таблица 5):

– МВИ<0,5 – низкая информационная емкость и энтропия структур;

-0,5<МВИ<0,7 - средняя информационная емкость и энтропия структур;

– МВИ>0,7 – высокая информационная емкость и энтропия структур.

Как видно из таблицы 5, высокая информационная емкость может присутствовать у хаотических структур. Это связано с наличием большого разброса высот поверхности: чем больше разброс высот, тем больше информации можно поместить в эту структуру.

#### Экспериментальная часть

В качестве экспериментальных образцов были взяты пленки a-Si:H, изготовленные в

Носhschule Mittweida (Германия). Образцы получены методом импульсного лазерного напыления (использовался фемтосекундный KrF лазер с длиной волны 248 нм). Образцы разделены на две группы: для группы №1 варьировалось время осаждения пленки а-Si:Н на подложку  $T_{dep}$ , для группы № 2 – давление водорода в камере  $P_{H2}$ . Остальные технологические параметры получения пленок а-Si:Н (температура подложки  $T_{sub}$ , частота повторения импульсов f, плотность энергии лазерного излучения H) представлены в таблицах 6 и 7.

Для данного типа структур (поскольку они неупорядоченные) с помощью метода 2D DFA не было выявлено явных перегибов на зависимости флуктуационной функции, поэтому анализ информационно-корреляционных свойств пленок а-Si:Н проводился только с позиций метода СВИ.

Величины СВИ попадают в категорию низкой упорядоченности структур (СВИ<0,02). Для группы образцов № 1 наблюдалась тенденция увеличения СВИ по мере увеличения времени осаждения пленок а-Si:Н. Это соответствует увеличению степени самоорганизации структуры пленок а-Si:Н с увеличением времени их осаждения (толщины). Для группы образцов № 2 СВИ менялась несущественно по мере изменения давления водорода в камере.

Значения МВИ для всех исследованных образцов попадают в категорию низкой информационной емкости и энтропии структур (МВИ<0,5). Для группы образцов № 1 также наблюдалась тенденция увеличения МВИ по мере увеличения времени осаждения пленок a-Si:H. Это может быть связано с тем, что по мере увеличения толщин пленок a-Si:H увеличивается разброс высот их рельефа. Для группы образцов № 2 МВИ также менялась несущественно по мере изменения давления водорода в камере.

Таблица 6 – Технологические параметры получения и результаты расчета с помощью метода СВИ для группы образцов а-Si:Н №1

№ об-	Тип подложки	$T_{sub}$ ,	<i>f</i> , Гц	$P_{H2}$ ,	Н,	$T_{dep}$	СВИ	МВИ
разца		°C		Па	Дж/см <sup>2</sup>			
1.1	Si, легирован-					4 мин	0,0033	0,0811
1.2	ный Р	200	10	10	7,7	7 мин	0,0040	0,2484
1.3						31 мин	0,0134	0,2570

Таблица 7 – Технологические параметры получения и результаты расчета с помощью метода СВИ для группы образцов а-Si:Н №2

№ об- разца	Тип подложки	$T_{sub},$ °C	<i>f</i> , Гц	<i>H</i> , Дж/см <sup>2</sup>	<i>Т<sub>dep</sub></i> , мин	<i>P<sub>H2</sub></i> , Па	СВИ	МВИ
2.1	Si, легирован-					1	0,0001	0,2370
2.2	ный Р	100	10	8,6	7	25	0,0012	0,2411

#### Заключение

Синтез модельных поверхностей различной степени самоорганизации и обработка их с помощью методов 2D DFA и СВИ позволили составить таблицы с диапазонами скейлингового показателя, СВИ и МВИ. Это, в свою очередь, позволяет классифицировать степень самоорганизации рельефа тонкопленочных структур.

МВИ характеризует информационную емкость структуры и энтропию. Скейлинговый показатель и СВИ характеризуют степень упорядоченности (самоорганизации) в структуре. Однако степень упорядоченности, определяемая по скейлинговому показателю, отражает наличие явных гармонических составляющих в структуре, а степень упорядоченности, определяемая по СВИ, отражает степень коррелирующих между собой значений высот.

На основании проведенных исследований модельных поверхностей показано, метод 2D DFA наиболее подходит для характеризации упорядоченных структур, а метод СВИ – для хаотических. Для смешанных структур необходимо применять эти методы в комплексе, причем по методу СВИ рассматривать также само распределение СВИ в фазовом пространстве, а также величину МВИ.

Полученные на основе исследования групп модельных поверхностей диапазоны значений СВИ и МВИ позволили классифицировать структуру пленок a-Si:H, полученных методом импульсного лазерного напыления. В дальнейшем интерес будут представлять исследования больших серий экспериментальных образцов для выявления влияния технологических режимов на процессы самоорганизации. Это позволит давать конкретные рекомендации для технологов по вопросам получения структур с заданными свойствами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

#### Библиографический список

1. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир, 1991. 240 с.

2. Hu K., Ivanov P. C., Chen Z. etc. Effect of trends on detrended fluctuation analysis // Physical Review E. 2001. Vol. 64. 011114.

3. Gu G.-F., Zhou W.-X. Detrended fluctuation analysis for fractals and multifractals in higher dimensions // Physical Review E. 2006. Vol. 74. 061104.

4. Вихров С. П., Авачева Т. Г., Бодягин Н. В., Гришанкина Н. В., Авачев А. П. Установление степени упорядочения структуры материалов на основе расчета информационно-корреляционных характеристик // Физика и техника полупроводников. Т. 46. Вып. 4. 2012 г. С. 433-438.

5. Алпатов А. В., Вихров С. П., Гришанкина Н. В., Мурсалов С. М. Исследование структурной сложности профиля поверхности материалов с применением метода 2D флуктуационного анализа с исключенным трендом // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. № 4. Часть 2. 2012 г. С. 12-20.

6. Алпатов А. В., Вихров С. П., Гришанкина Н. В. Выявление корреляций поверхностного интерфейса пленок а-Si:Н методом двумерного флуктуационного анализа // ФТП. 2013. Т. 47. Вып. 3. С. 340-347.

7. Алпатов А. В., Вихров С. П., Рыбина Н. В. Исследование корреляционных параметров структуры поверхности неупорядоченных полупроводников с помощью методов двумерного DFA и средней взаимной информации // ФТП. 2015. Т. 49. Вып. 4. С. 467-471.

8. Алпатов А. В., Вихров С. П., Вишняков Н. В., Мурсалов С. М., Рыбин Н. Б., Рыбина Н. В. Комплексный метод исследования корреляционных параметров самоорганизованных структур // ФТП. Т. 50. Вып. 1. 2016 г. С. 23-29.

9. Алпатов А. В., Вихров С. П., Казанский А. Г., Лясковский В. Л., Рыбин Н. Б., Рыбина Н. В., Форш П. А. Исследование корреляционных свойств структуры поверхности пленок nc-Si/a-Si:Н с различной долей кристаллической фазы // ФТП. Т. 50. Вып. 5. 2016 г. С. 600-606.

10. Луняков А. Е., Рыбина Н. В., Рыбин Н. Б. Исследование зависимости корреляционных свойств наноструктурированных поверхностей от параметров их рельефа // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. № 4 (вып. 58), 2016 г. С. 153-158. UDC 621.315.592

## CLASSIFICATION OF THIN-FILM STRUCTURE RELIEF SELF-ORGANIZATION DEGREE BY 2D DFA AND AMI METHOD

N. V. Rybina, Ph.D., associate professor, RSREU, Ryazan; pgnv@mail.ru S. P. Vikhrov, Ph.D., professor, chief researcher, RSREU, Ryazan; me@rsreu.ru N. B. Rybin, Ph.D., leading engineer, RSREU, Ryazan; nikolay-rybin@ya.ru

**The aim of this work** - classification of thin-film structures according to the degree of self-organization by scaling index, average mutual information and maximum mutual information determined by twodimensional detrended fluctuation analysis and average-mutual-information method.

Model surfaces with different degrees of ordering (self-organization) were produced. Their relief was studied by 2D detrended fluctuation analysis and average-mutual-information method. Based on the research results of model surfaces, value lists of scaling index, average and maximum mutual information were compiled which allow to classify thin-film structures by the degree of self-organization. An approvement of obtained results was realized using a-Si:H thin-film samples. An attempt to estimate the influence of the technological regimes of the growth (time of deposition, pressure of hydrogen in the chamber) on self-organization processes in a-Si:H films was made.

*Keywords:* thin-film structures, order, surface, self-organization, average mutual information, maximal mutual information, two-dimensional detrented fluctuation analysis, correlation properties, scaling index.

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-61-3-143-151

#### References

1. **Haken H.** Informatsiya i samoorganizatsiya. Makroskopicheskiy podhod k slozhnym sistemam. M.: Mir, 1991. 240 p. (In Russian).

2. Hu K., Ivanov P. C., Chen Z. etc. Effect of trends on detrended fluctuation analysis // Physical Review E. 2001. Vol. 64. 011114.

3. Gu G.-F., Zhou W.-X. Detrended fluctuation analysis for fractals and multifractals in higher dimensions // Physical Review E. 2006. Vol. 74. 061104.

4. Vikhrov S. P., Avacheva T. G., Bodyagin N. V., Grishankina N. V., Avachev A. P. Ustanovlenie stepeni uporyadocheniya strukturyi materialov na osnove rascheta informatsionno-korrelyatsionnyih harakteristik // Fizika i tehnika poluprovodnikov, vol. 46, no. 4, 2012. pp. 433-438. (In Russian).

5. Alpatov A. V., Vikhrov S. P., Grishankina N. V., Mursalov S. M. Issledovanie strukturnoy slozhnosti profilya poverhnosti materialov s primeneniem metoda 2D fluktuatsionnogo analiza s isklyuchennyim trendom // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta. no 4 chast 2, 2012. pp. 12-20. (In Russian).

6. Alpatov A. V., Vikhrov S. P., Grishankina N. V. Vyiyavlenie korrelyatsiy poverhnostnogo interfeysa ple-

nok a-Si:H metodom dvumernogo fluktuatsionnogo analiza // FTP, 2013, vol. 47, no. 3. pp. 340-347. (In Russian).

7. Alpatov A. V., Vikhrov S. P., Rybina N. V. Issledovanie korrelyatsionnyih parametrov strukturyi poverhnosti neuporyadochennyih poluprovodnikov s pomoschyu metodov dvumernogo DFA i sredney vzaimnoy informatsii // FTP, 2015, vol. 49, no. 4. pp. 467-471. (In Russian).

8. Alpatov A. V., Vikhrov S. P., Vishnyakov N. V., Mursalov S. M., Rybin N. B., Rybina N. V. Kompleksnyy metod issledovaniya korrelyatsionnykh parametrov samoorganizovannykh struktur// FTP vol. 50 no 1, 2016. pp. 23-29. (In Russian).

9. Alpatov A. V., Vikhrov S. P., Kazanskii A. G., Lyaskovskii V. L., Rybin N. B., Rybina N. V., Forsh P. A. Issledovanie korrelyatsionnyih svoystv strukturyi poverhnosti plenok nc-Si/a-Si:H s razlichnoy doley kristallicheskoy fazyi // FTP, vol. 50, no. 5, 2016. pp. 600-606. (In Russian).

10. Lunyakov A. E., Rybina N. V., Rybin N. B. Issledovanie zavisimosti korrelyatsionnyih svoystv nanostrukturirovannyih poverhnostey ot parametrov ih relefa // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta. no 4, 2016. pp. 153-158. (In Russian).