

## 2. Анализ распределения температуры в твердосплавной прессовке

Расчеты, проведенные по функции (6), показывают, что при использовании медного электрода твердосплавная головка биметаллического зубка остается неспеченной на глубину 2,5 мм (см. рис. 2), несмотря на увеличение времени МТФ, что подтверждается экспериментально.

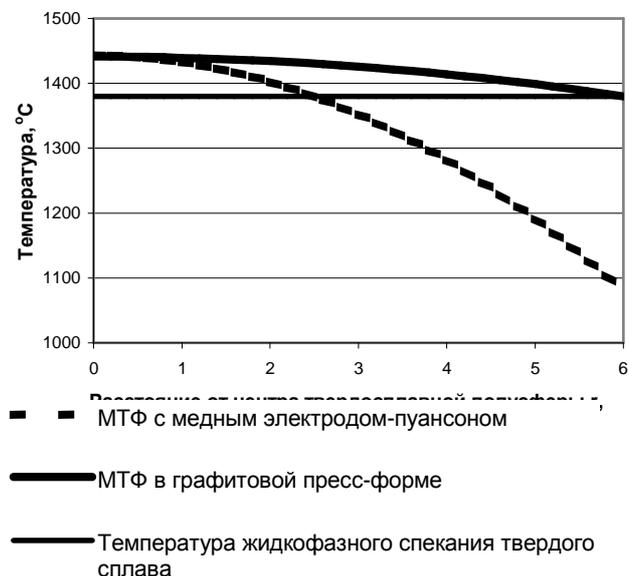


Рис. 2. Распределение температуры в твердосплавной прессовке биметаллического зубка.

Из выражения (6) следует, что при длительном процессе МТФ температура поверхности слоев твердого сплава будет равна температуре электрода, с которым он контактирует. С продвижением к центру твердосплавной прессовки температура будет возрастать. Для спекания твердого сплава по всему объему необходимо, чтобы температура поверхности электрода или пресс-формы была равна температуре жидкофазного спекания твердого сплава, что можно достичь, используя графитовый электрод или пресс-форму. Графит имеет более высокое удельное сопротивление и низкую теплопроводность по сравнению с медью. При проведении МТФ графит нагревается до температуры, превышающей 1400 °C [3].

Рассмотрим распределение температуры в твердосплавной прессовке при проведении процесса МТФ в графитовой

пресс-форме в течение 60 ... 200 секунд с плотностью тока 4 - 5 А/мм<sup>2</sup> (см. рис. 1, б). Для этого используем функцию (6), полагая, что температура внутренней поверхности пресс-формы при МТФ равна температуре жидкофазного спекания твердого сплава, т.е.  $U_0 = 1$ , а удельная мощность  $q$  внутреннего источника тепла уменьшается в 4...16 раз из-за снижения плотности тока, проходящего через твердосплавную прессовку.

Анализ распределения температуры показывает, что при проведении одностадийного МТФ в графитовой пресс-форме во всем объеме твердосплавной прессовки будет происходить жидкофазное спекание (см. рис. 2), что должно обеспечить требуемое качество твердого сплава биметаллического зубка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что для обеспечения жидкофазного спекания твердого сплава по всему объему необходимо проведение одностадийного МТФ в графитовой пресс-форме со следующими параметрами: плотность тока 4 - 5 А/мм<sup>2</sup>, длительность процесса от 60 до 200 с. Полученные результаты были подтверждены экспериментальными исследованиями. Физико-механические свойства и микроструктура твердого сплава биметаллических зубков формы Г26, изготовленных по предложенной технологии, соответствуют ГОСТ 3882 - 74.

Данная технология может быть рекомендована для изготовления биметаллических (твердый сплав - сталь) изделий сложной формы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Долговечность шарошечных долот/ Н. А. Жидовцев, В. Я. Кершенбаум, Э. С. Гинзбург и др. - М.: Недра, 1992. - 271 с.
2. Кершенбаум В. Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. - М.: Машиностроение, 1987. - 232 с.
3. Барило И. Г. Повышение износостойкости долот за счет использования комбинированных твердосплавных зубков: Автореферат дис. ... к. т. н., - М., 1975. - 20 с.
4. Резник Л. А. Износостойкость твердосплавного вооружения породоразрушающего инструмента при абразивном изнашивании и разработка метода её оценки на основе энергетического критерия: Дисс. ... канд. техн. наук. - М., 1988. - 113 с.
5. Тихонов А. Н., Самарский Т. И. Уравнения математической физики. - М.: Наука, 1977 - 735 с.

УДК 621.382.049.77

Раткевич А.В., Дереченник С.С.

## ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

### ВВЕДЕНИЕ

Тонкие пленки и структуры на их основе находят широкое применение в различных областях науки и техники, и, в первую очередь, в микро- и нанoeлектронике. Среди важнейших задач твердотельной электроники, решаемых пленочным материаловедением - разработка новых материалов с необходимыми качественными и количественными свойствами, а также методов синтеза многослойных систем, позволяющих

эффективно управлять их структурными и электрофизическими характеристиками.

Тонкие пленки - это особый вид состояния конденсированного вещества. По своей структуре и свойствам они существенно отличаются от своих массивных аналогов. Это обусловлено, в том числе, спецификой процесса их формирования: конденсация молекулярных потоков вещества при различных термодинамических условиях из паровой, газовой или

Раткевич Алексей Васильевич, аспирант кафедры «ЭВМ и системы» Брестского государственного технического университета, e-mail: [bcntiilexus@yandex.ru](mailto:bcntiilexus@yandex.ru).

Дереченник Станислав Станиславович, к.т.н., доцент, зав. каф. «ЭВМ и системы» Брестского государственного технического университета, e-mail: [chief.cm@bstu.by](mailto:chief.cm@bstu.by)  
Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

жидкой фазы на поверхности твердого тела является неравновесным термодинамическим процессом в сложной многофазной системе. Этот процесс состоит из процессов-компонентов: адсорбции, образования зародышей новой фазы, их роста, коалесценции и т.д. Кинетика каждого из них по-своему влияет на структуру тонких пленок, а свойства пленок являются производными их морфологии, атомной структуры, кристалличности и степени совершенства. Поэтому получение пленочных систем с заданными свойствами связано с проблемой управления такими процессами.

Толщина пленок, применяемых в современной микроэлектронике, не превышает нескольких десятков нанометров (а, зачастую, и десятков монослоев материала), что значительно затрудняет исследование и описание структуры образующихся поверхностей. При анализе подобных структур было выявлено, что они обладают свойствами фрактальных объектов (фрактальных поверхностей) [1-3].

Важнейшей характеристикой фрактального объекта является фрактальная размерность, нечувствительная, по определению, к масштабным изменениям его измерений. Фрактальная размерность не связана жестко, например, с шероховатостью поверхности (хотя и имеет с ней слабую корреляцию), а отражает, скорее, особенности атомно-молекулярной динамики образования структуры (не описывая эту структуру детально). Так, известно, что при увеличении скорости роста поликристаллической пленки заметно возрастает ее зернистость, что, в свою очередь, вызовет не только увеличение шероховатости поверхности, но и большую «изрезанность» и сложность профиля (увеличение фрактальной размерности). При этом обнаружено, что фрактальная размерность, по сравнению с шероховатостью, является параметром, более чувствительным к изменениям физических механизмов процессов роста пленки (например, механизма зародышеобразования).

Таким образом, для исследования тонкопленочных структур целесообразно привлечение соответствующего аппарата фрактальной геометрии, позволяющего вполне адекватно описать параметры строения и связать их с электрофизическими свойствами структуры.

Представляется, что разработка методов и средств реализации фрактальных подходов в данной предметной области должна вестись в трех основных направлениях:

- методы экспериментального определения структурных и морфологических свойств (получения топографических и профильных образов) исследуемых объектов;
- эффективные методы (вычислительные алгоритмы) оценки фрактальной размерности поверхностей и профилей по их топографическим образам;
- средства физико-математического и компьютерного моделирования процессов формирования (роста) пленочных структур с фрактальными особенностями строения.

#### **Аппаратурные средства контроля структурно-морфологических свойств полупроводниковых микроструктур**

Для научных исследований и технологического контроля твердотельных полупроводниковых структур в настоящее время используют ряд производительных высокоточных методов измерения параметров, критичных для качества структур [4,5]. Часть из них может эффективно использоваться для изучения поверхностной топографии, профилей (рельефа) поверхностей, а также особенностей структуры и фазового состава исследуемых объектов.

*Растровая электронная микроскопия* характеризуется высокой разрешающей способностью (менее 10 нм) и достаточной глубиной резкости (до 2...4 мкм). Возможность варьиро-

вания увеличения (в 100...100 000 раз) и регистрация результатов на фотопластинке (либо непосредственная передача данных в компьютер) позволяют фиксировать морфологические особенности наблюдаемых поверхностей в достаточном для фрактального анализа масштабном диапазоне.

*Просвечивающая электронная микроскопия* обеспечивает еще большее пространственное разрешение (до 0,2 нм) и широкий диапазон измерений (0,02...10 мкм) при увеличении вплоть до 1 000 000 раз. Возможны измерения микро- и субмикрорельефа, размера и расположения зерен поликристаллического слоя, а также (в дифракционном режиме) параметров текстуры и кристаллического состояния (например, типа и ориентации кристаллической решетки) исследуемого образца. Достоинством метода является также возможность визуального наблюдения информации (результаты также могут регистрироваться на фотопластинке либо сохраняться в компьютерный файл), недостатком – необходимость предварительной подготовки (препарирования) образца в виде тонкой (менее 100 нм) фольги.

*Эмиссионная микроскопия с автоэлектронной эмиссией*, а также *микроскопия с автоионной эмиссией* способны обеспечить еще лучшее разрешение (вплоть до 1...0,1 нм – практически до молекулярно-атомного уровня), но менее пригодны для обсуждаемых целей ввиду малой площади измерений, а также необходимости специальной (весьма сложной) подготовки образцов.

*Акустическая растровая микроскопия* является достаточно эффективным средством неразрушающего контроля профилей поверхностей и скрытых объемных дефектов в приповерхностных слоях. При частоте ультразвука порядка 2 ГГц удается добиться линейного разрешения 0,6 мкм при глубине проникновения до 1,5 мкм с шагом 0,1 мкм. Диапазон увеличений метода составляет 100...2 000 раз, что ограничивает его применение, в основном, измерениями шероховатости поверхности, контролем профиля межслойных границ раздела, а также внутриобъемных структурных нарушений.

*Метод поперечных микрошлифов* позволяет исследовать не только поверхностный рельеф, но также и геометрию твердотельной структуры в ее сечении (в том числе толщину слоев и профили границ их раздела). Обычно применяют косяк и сферический шлифы со строго заданными малыми углами наклона. Поверхность шлифа химически полируют до высокого класса чистоты, а для лучшего визуального наблюдения используют химическое декорирование (окрашивание) слоев специальными травящими составами. Ввиду малости угла наклона сечения шлифа, особенности микроструктуры образца можно наблюдать не только методом электронной (растровой) микроскопии, но и с помощью сравнительно простых оптических микроскопов – например, интерференционного (конечно, со сравнительно меньшей разрешающей способностью). Важной особенностью метода является то, что в плоскости косого поперечного шлифа проецируются не только геометрия границы (профиля) раздела слоев, но также и включения обоих слоев в виде разновеликих «островков среза», расположенных вдоль границы по обе ее стороны. По таким данным можно оценивать фрактальную размерность не только одномерных геометрических объектов (профилей), но и непосредственно – двухмерной поверхности раздела слоев.

Перечисленные методы являются достаточно изученными и универсальными (так, например, некоторые из них позволяют одновременно исследовать элементный состав материала, а также его распределение по поверхности и по толщине образца). В связи с этим, в контексте изучения фрактальных свойств различных микроструктур, предметом исследований может являться адаптация известных методик и выбор оптимальных режимов измерений. Представляет интерес также поиск новых

методов анализа, специально ориентированных на измерения фрактальных характеристик исследуемых объектов.

**Методы определения фрактальной размерности**

Поверхностный рельеф (топография) исследуемой структуры, полученный одним из перечисленных выше способов, может быть представлен в виде цифровой (дискретной) 3-мерной топографической модели, где две координаты  $x, y$  определяют положение точки на проективной плоскости, а координата  $z$  – высоту профиля. Так, например, яркость точек изображения, получаемого с растрового электронного микроскопа, пропорциональна относительной высоте точек исследуемой поверхности [4,6]. Подобная 3-мерная модель может быть сведена, например, к набору поперечных профилей (сечений) – 2-мерных моделей, в которых координата  $x$  характеризует положение точки по длине проекции профиля, а координата  $z$  – высоту профиля. Поскольку при сечении любой структуры плоскостью ее размерность уменьшается на 1, то и вычисленную фрактальную размерность профиля необходимо, применительно к поверхности, увеличивать на единицу. Информацию о геометрии двухмерного объекта (профиля сечения поверхности или границы раздела) можно получить и непосредственно из эксперимента – если использовать, например, микроскопию поперечных шлифов.

Принцип определения фрактальной размерности  $D$  поверхности некоторой структуры или профиля ее поперечного сечения основан на степенной зависимости площади поверхности или длины профиля ( $S \propto l^{2-D}$  или  $L \propto l^{1-D}$ ) от величины выбранной меры – единицы измерения  $l$  [1,7]. Во втором случае, для повышения надежности результата, требуется исследование набора поперечных сечений с последующим усреднением результата.

В некоторых случаях наиболее удобно применять *методы прямого определения* фрактальной размерности. Так, профиль можно аппроксимировать ломаной линией, изменяя размер звена (отрезка) и вычисляя каждый раз ее суммарную длину (фактически – количество звеньев). Если кривая является фрактальной, то длина аппроксимирующей ломаной с уменьшением масштаба звена будет возрастать по указанному степенному закону.

Кривая профиля обычно задана дискретным множеством точек, отстоящих друг от друга (в декартовой плоскости) на различном расстоянии, поэтому выполнять ее аппроксимацию ломаной линией, состоящей из звеньев (отрезков) одинаковой длины, не очень удобно. Но, поскольку координаты точек профиля регистрируются с определенным шагом по одной из координат (длине проекции профиля), этот шаг дискретизации можно принять за характерный размер  $l$  (аналогичный размеру отрезка или ячейки), а общую длину профиля  $L$  определять, суммируя вычисленные по координатам точек длины каждого из получающихся звеньев. После вычисления  $L$  при некотором значении  $l$ , профиль следует «огрубить», уменьшив число рассматриваемых точек, например, в 2 раза (значение  $l$  при этом увеличится во столько же раз), назначая высоту профиля в каждой «новой» точке равной усредненному значению высот двух соседних «прежних» точек профиля. Повторяя такую операцию, можно получить искомую зависимость  $L(l)$ , а из нее – искомую фрактальную размерность  $D$  (близкую к клеточной размерности) [3].

В случае анализа поверхностей можно обойтись и без разбиения ее на профили – вычислить зависимость площади поверхности  $S$  от размера покрывающих ячеек (при одинаковом их размере), либо от шага дискретизации координат точек поверхности (характерного размера  $l$ ). Для вычисления пло-

щади можно использовать, например, триангуляцию исследуемой поверхности (приближение неплоских четырехугольниками, составляющих поверхность, двумя плоскими треугольниками). Увеличение характерного размера (размера ячеек) и усреднение высот точек профиля выполняются аналогично случаю анализа размерности фрактальной кривой профиля [6].

Известен также ряд методов (алгоритмов) косвенного определения фрактальной размерности, что позволяет вычислить различные ее «виды»: клеточную / кубическую, информационную, корреляционную размерности [1,2,7].

*Метод подсчета ячеек* заключается в том, что исследуемый профиль поверхности покрывается элементарными 2-мерными ячейками с длиной ребра  $l$  и производится подсчет их числа  $N(l)$ . Фрактальная размерность определяется затем из соотношения  $N(l) \propto l^{-D}$ . Для этого в двойных логарифмических координатах строится зависимость  $N(l)$  от  $l$ , по наклону которой (тангенсу угла наклона) определяется квадратная фрактальная размерность:  $D_{box} = -\Delta(\ln N) / \Delta(\ln l)$ . Аналогично вычисляются кубическая либо сферическая размерности – в случае покрытия поверхности кубическими ячейками либо сферами с изменяющимся характерным размером (длиной ребра, диаметром).

*Модифицированный метод подсчета ячеек* позволяет вычислить информационную размерность. В методе учитывается частотность элементов множества (локальное свойство точек множества – свойство принадлежности к соседям), т.е. «вес» каждой ячейки, в которую попадает некоторое количество точек профиля.

Так же, как и для квадратной размерности, профиль покрывают квадратными ячейками с длиной ребра  $l$ , однако дальнейший расчет осуществляется по соотношению:

$$D_{inf} = -\Delta I(l) / \Delta(\ln l), \text{ где } I(l) = -\sum P(l,i) \log P(l,i),$$

$P(l,i) = N(l,i) / \|S\|$  – частотность появления точки множества в ячейке,  $N(l,i)$  – количество точек, попавших в  $i$ -ю ячейку,  $\|S\|$  – мощность множества точек изображения, а суммирование выполняется по всем ячейкам размера  $l$ , покрывающих изображение.

*Метод подсчета пар* оперирует с корреляционной размерностью, вычисляемой по соотношению, учитывающему дистанцию  $s$  между каждой парой  $(i, j)$  точек фрактального множества  $S$ :

$$D_{cor} = \lim_{r \rightarrow 0} [\log C(r) / \log r], \text{ где}$$

$$C(r) = (\text{кол-во пар } (i, j), \text{ где } s(i, j) < r) / \|S\|^2.$$

В таблице приведены значения размерностей различных «видов», вычисленные перечисленными выше способами, для объектов с теоретически известной фрактальной размерностью: стандартных фрактальных кривых (Киссвetterа, Кох) и так называемой «гауссовой» поверхности. Приведенные данные обнаруживают некоторые отличия для различных способов вычислений, обусловленные различными методическими погрешностями расчетных схем, применяемых к приближенной цифровой (дискретной) модели поверхности.

**Таблица.** Сравнение различных способов вычисления фрактальной размерности

Объект	$D_{теоретич}$	$D_{box}$	$D_{inf}$	$D_{cor}$
Кривая Киссвetterа	=1,5	~1,463	~1,478	~1,481
Кривая Кох	=1,5	~1,531	~1,510	~1,513
Гауссова поверхность	=2,5	~2,528	~2,517	~2,512

Дальнейшим развитием метода вычисления корреляционной размерности следует считать *Фурье-анализ профилей* поверхности. Статистические геометрические свойства неровностей любого профиля однозначно описываются Фурье-спектром пространственных частот  $f$ , а спектр «мощности» профиля (квадрата высот неровностей) с фрактальной размерностью  $D$  будет иметь также зависимость фрактального характера  $G(f) \propto f^{2D-5}$ .

Перспективными представляются исследования возможности непосредственного анализа фрактальных поверхностей (без разбиения на профили) по их двумерным спектрам пространственных частот, вычисляемых с помощью эффективных вычислительных алгоритмов частотных преобразований: быстрых преобразований Фурье и Адамара, вэйвлет-преобразования и др.

Метод «островов среза» основан на анализе очертаний фигур, образующихся в горизонтальном сечении поверхности. Так, известно, что для евклидовых фигур постоянным (независящим от размера фигуры) является соотношение периметра к квадратному корню площади. Для фрактальных же фигур – «островов среза», получающихся в сечении фрактальной поверхности, и длина их береговой линии (периметр)  $P$ , и охватываемая площадь  $S$  зависят от единицы измерения  $l$ , что дает следующую зависимость:

$$P(l) \propto l^{1-D} [S(l)]^{D/2}.$$

С другой стороны, исследуя распределение образующихся островов по их величине, можно прийти к соотношению, определяющему число островов, площадь которых превышает задаваемое число  $a$ :

$$Nr(S > a) \propto a^{-D/2}.$$

Очевидно, что вычисляемое значение размерности, применительно к рассматриваемой поверхности, как и в случае анализа вертикальных сечений, следует увеличивать на единицу.

Нашими исследованиями установлено [8], что фрактальная размерность, вычисляемая методом островов среза, нелинейно зависит от высоты расположения секущей плоскости. Так, для гауссовой поверхности (с известной размерностью  $D = 2,5$ ) вычисленные этим методом значения находились в диапазоне 2,26...2,68, причем наибольшие значения соответствовали срединному положению секущей (на уровне математического ожидания высоты неровностей), а наименьшие – ее крайним по высоте положениям.

Таким образом, можно предположить, что аналогичные (но не идентичные!) соотношения периметр / площадь, а также распределение островов среза по их величине будут обнаружены и для наклонных сечений поверхности – например, при использовании описанных выше экспериментальных методов анализа: косых или сферических шлифов. Установление конкретного вида таких соотношений является, в связи с изложенным, предметом необходимых дальнейших исследований.

### Методы и средства моделирования фрактальных структур

Известные методы моделирования поверхностей, имеющих фрактальные свойства, можно разделить на две основных группы: математические и физико-математические. Первую группу составляют методы построения поверхностей с заданными характеристиками шероховатости (высотой неровностей) и фрактальной размерности [1,7].

Метод *поверхностей случайного переноса* имеет, в качестве исходной, некоторую кривую  $z(x)$ , где  $z$  – вертикальная, а  $x$  – горизонтальная координаты. Выполняют перенос (скольжение) данной кривой вдоль другой горизонтальной

координаты  $y$ , с одновременным поворотом ее в плоскости  $xy$  на некоторый угол  $\varphi$ , выбираемый случайным образом из интервала  $[0; 2\pi]$ . Для каждого  $n$ -го этапа построения вертикальную координату  $z$  кривой необходимо умножить на задаваемый множитель  $h_n = 1/\sqrt{n}$ , а конечная высота профиля точки поверхности определяется суммой вертикальных координат всех профилей:  $Z(x, y) = \sum_n h_n z(x, y | \varphi)$ .

Поверхность, генерируемая данным методом, получается фрактальной даже в случае, если исходная кривая нефрактальна (размерность в этом случае строго известна  $D = 5/2$ , а поверхность называют броуновской, или гауссовой), но необходимое число шагов (итераций) при этом весьма велико. Меньшее количество шагов требуется в случае использования, в качестве исходных, случайных профилей с фрактальными свойствами – например, набора осциллирующих функций вида  $z(x) = C_f \sin(xf)$ . Необходимый дискретный

спектр задается соотношением:  $f_j = f_{j-1}^\alpha$ , амплитуды

разложения Фурье:  $C_f = f^{-\beta}$  (коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  выбирают в зависимости от необходимых свойств шероховатости и фрактальной размерности), получаемая кривая имеет

$$\text{вид: } z(x) = \text{Re} \left[ \sum_j C_f \exp(2\pi i f_j x) \right].$$

Метод *последовательного случайного сложения* моделирует обобщенное броуновское движение и может применяться для генерации фрактальных объектов – как профилей, так и поверхностей. На начальном этапе задают высоту  $Z$  в нескольких точках (например, в четырех углах сетки в плоскости  $xy$ ). На каждом шаге построения в расчетную схему добавляют новые точки, лежащие посередине сторон имеющихся ячеек (определяемых четырьмя ближайшими точками), а также на пересечении их диагоналей. Начальная высота в новых точках определяется интерполяцией известных значений высоты в ближайших точках. На каждом шаге к значениям высоты всех точек добавляют независимые случайные значения  $\xi$ , генерируемые с нулевым средним и дисперсией, уменьшающейся с каждым  $n$ -м шагом:

$$\langle \xi_n^2 \rangle = \langle \xi_{n-1}^2 \rangle r^{2(3-D)}, \quad \langle \xi_0^2 \rangle = 1.$$

Коэффициент  $r < 1$  задает масштабный диапазон генерируемой поверхности, а параметр  $D$  – ее фрактальную размерность.

Процессы первой группы хорошо разработаны с алгоритмической точки зрения, но не учитывают физические эффекты, происходящие в конкретных технологических процессах (и условиях!) получения тонкопленочных структур. Тем не менее, они вполне пригодны для генерации поверхностей с варьируемыми свойствами, например, при исследованиях методов оценки (вычисления) фрактальных размерностей сложных поверхностей.

Во вторую группу методов следует отнести разнообразные физико-математические модели, имитирующие различные технологические процессы и их физические компоненты, имеющие место при формировании и модификации пленочных структур. Так, например, хорошо разработаны методы компьютерного моделирования геометрии пленочных покрытий, формируемых плазменными методами [9], но они, одна-

ко, практически не учитывают фрактальных особенностей строения моделируемых объектов. Попытка построения стохастических имитационных моделей образования тонкопленочных покрытий, основанная на генерации случайных процессов формирования потока частиц материала, их переноса к подложке и последующей адсорбции позволяет, в простейшем случае, получить лишь объекты, близкие к гауссовым (броуновским) поверхностям [8].

Очевидно, что негауссовы поверхности можно строить лишь при учете в моделях термодинамических особенностей зародышеобразования, сложных процессов кластеризации частиц, образования и коалесценции зародышей, перекристаллизации и т.п. Предлагаются, например, различные подходы к моделированию механизмов кластеризации и роста кристаллитов [10,11], или к моделированию процессов диффузии в виде процесса перколяции (протекания) в кристаллических решетках [1,12]. В целом, однако, это направление нельзя считать разработанным хотя бы в удовлетворительной степени, что представляет широкий простор для дальнейших исследований. Практически полезным результатом исследований в этом направлении должны явиться не только методы и средства моделирования процессов формирования микроструктур (в том числе – пленочных), но и выявленные закономерности, связывающие геометрические особенности структур (в том числе – фрактальную размерность), с одной стороны, с технологическими параметрами отдельных процессов, с другой – с достигаемыми электрофизическими характеристиками.

### ВЫВОДЫ

При выполнении экспериментальных и теоретических исследований твердотельных тонкопленочных структур целесообразно привлечение фрактальных подходов, что может повысить адекватность описания параметров строения и связывания их с электрофизическими свойствами изучаемых объектов.

Некоторые известные экспериментальные методы исследования структурно-морфологических характеристик твердотельных объектов вполне применимы и для изучения их фрактальных свойств. Для повышения надежности получаемых результатов необходимо выполнить соответствующую адаптацию этих методов, а также разработать оригинальные специализированные методики измерений.

Необходима разработка новых, эффективных в вычислительном отношении методов и алгоритмов определения фрактальных размерностей поверхностей: алгоритмов, использующих различные двумерные частотные преобразования, а также методов определения размерности по косым и сферическим шлифам микроструктур. Для проверки и сравнительной оценки этих методов полезно использовать модельные поверхности с требуемыми фрактальными свойствами, сгенерированные известными способами.

УДК 681.324

**Головко Вл.А., Головко Вал.А.**

## ПАРАДИГМЫ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

### Введение

Проблема создания искусственных систем, способных к обучению, самоорганизации и адаптации не является новой. Ее пытались решить еще на начальном этапе становления вычислительной техники [1,2]. В данных работах исследовались в

Наиболее обширной областью перспективных исследований является разработка методов и средств моделирования различных физических процессов, происходящих при формировании и модификации пленочных микроструктур и существенно влияющих на их структурные и электрофизические характеристики. В первую очередь, речь идет о процессах кластеризации частиц в переносимых потоках вещества, их адсорбции и миграции на подложке, зародышеобразования, роста и коалесценции зародышей, перекристаллизации пленок в результате термообработок и межфазных реакций. Представляется, что привлечение фрактальных подходов к рассмотрению упомянутых процессов существенно повысит адекватность моделирования тонкопленочных структур.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 262 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. Дереченник С.С., Мороз О.В. Стохастическое моделирование процесса формирования тонкопленочных структур металл-кремний // Вестник БГТУ: Серия «Машиностроение, автоматизация, ЭВМ». – 2001, № 4(10). – С. 68-72.
4. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. – М.: Мир, 1985. – 496 с.
5. Аппаратные средства контроля параметров твердотельных структур в производстве СБИС / В.А. Емельянов, В.В. Баранов, Т.В. Петлицкая и др.; Под ред. А.П. Достанко. – Мн.: НПО «Интеграл», 1997. – 71 с.
6. Дереченник В.С., Дереченник С.С. Оценка фрактальной размерности поверхностей по их цифровым топографическим образам // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002, № 1(13)/2. – С. 42-45.
7. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
8. Дереченник С.С., Мороз О.В., Дереченник В.С. Стохастическое трехмерное моделирование микрорельефа тонкопленочных покрытий в металл-кремниевых структурах / Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы II Международной НТК (15-17 Мая 2002, Новополоцк). – Новополоцк: ПГУ, 2002. – Т. II. – С. 249-252.
9. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т. Том 1 / А.П. Достанко, С.П. Кундас, М.Н. Босьяков и др.; Под общ. ред. А.П. Достанко. – Мн.: ФУАинформ, 2000. – 424 с.
10. Vicsek T. Fractal Growth Phenomena. – N.Y.: World Scientific Pub. Co, 1992. – 488 p.
11. Gaylord R.J., Tyndall W. Diffusion-Limited Aggregation // Mathematica in Education. – 1992, Vol.1. – P. 6-10.
12. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. – М.: Наука, 1982. – 264 с.

**Головко Владимир Адамович**, д.т.н., профессор, зав. каф. интеллектуальных информационных технологий Брестского государственного технического университета

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

**Головко Валерий Адамович**, к.п.н., доцент каф. германской филологии Вильнюсского университета.