

Процессы роста неупорядоченных полупроводников с позиций теории самоорганизации

© С.П. Вихров[¶], Н.В. Бодягин, Т.Г. Ларина, С.М. Мурсалов

Рязанская государственная радиотехническая академия,
390024 Рязань, Россия

(Получена 27 декабря 2004 г. Принята к печати 10 января 2005 г.)

Обоснована возможность применения идей и методов теории самоорганизации при рассмотрении процессов роста неупорядоченных полупроводников. Описан основной метод анализа динамики сложных систем. Рассмотрены инварианты хаотической динамики применительно к процессам роста материалов. Определены новые принципы построения технологических систем.

1. Введение

Разработка все более сложных устройств микро- и нанoeлектроники, а также необходимость значительно увеличения скорости роста пленок при сохранении их приборных характеристик требуют более глубокого изучения закономерностей формирования структуры и свойств неупорядоченных материалов и их эволюции. Необходимо решение ряда проблем технологий материалов, среди которых главными остаются невозможность воспроизводимости структуры и свойств, термодинамическая метастабильность структуры, несовершенство алгоритмов оптимизации технологий.

Эти проблемы связаны между собой и обусловлены тем, что процессы образования твердотельного состояния рассматриваются с позиций равновесной термодинамики и не соответствуют сложным внутренним динамическим процессам в веществе во время синтеза, которые по своей сути есть не что иное, как сложное поведение, т.е. самоорганизация [1–4]. Процессы в этих веществах характеризуются следующими основными признаками самоорганизующихся систем: термодинамическая открытость, сильная неравновесность, нарушение симметрии, скачкообразный характер изменения физических характеристик. Поэтому необходим иной подход в рассмотрении процессов роста неупорядоченных материалов, который бы открыл новые возможности моделирования строения аморфных полупроводников и управления в технологиях микро- и наноструктур.

На наш взгляд, таким направлением является использование идей и методов теории сложных систем (самоорганизации, нелинейных процессов) и развиваемых в ее рамках представлений о детерминированном хаосе как о сверхсложном упорядоченном поведении динамических систем, структура которого не обнаруживает себя при использовании „классических“ методов исследования порядка (например, метода Фурье).

Следует отметить, что сама теория сложных систем находится на этапе становления, а применяемые ею методы пока далеки от совершенства. Однако даже использование только философии и методологии этой теории позволяет критически переосмыслить многие

устоявшиеся положения физики твердого тела и существенно продвинуться в понимании сложных процессов, протекающих при формировании твердотельной структуры, и управления ими.

2. Методологический подход к изучению процессов образования неупорядоченных полупроводников с точки зрения теории самоорганизации

Идея о самоорганизации появилась как вариант объяснения возникновения упорядоченных структур в неупорядоченных средах. Именно возникновение когерентности в исходно хаотической среде считается главным атрибутом самоорганизации. Система называется самоорганизующейся, если она без специфического воздействия извне, т.е. спонтанно, обретает какую-то пространственную, временную или функциональную структуру [1]. В результате самоорганизации система приобретает новые коллективные свойства, которыми изначально не обладают ее элементы. Эти свойства проявляются в виде корреляций, т.е. создаются и поддерживаются воспроизводимые взаимоотношения между удаленными частями системы. В кристаллах корреляции проявляются в виде среднего и дальнего порядка, структуры с фрактальной размерностью системы уравнений, описывающей ее, и др. В неупорядоченных материалах они существуют в виде небольшого (относительно числа атомов) множества мод — гармоник, формирующих хаотическую динамику.

С точки зрения теории сложных систем в результате самоорганизации у системы остается небольшое число параметров порядка, которые определяют ее поведение. На этом базируется главная идея экспериментального изучения этих систем, т.е. нет необходимости исследовать динамику всего исходного бесконечномерного фазового пространства. Вполне достаточно наблюдать аттрактор системы, размерность которого при математическом ее описании во многих исследованиях оказалась довольно малой — например, 3, 5 или около того [5]. Аттрактор в теории нелинейных систем характеризует

[¶] E-mail: mel@rgta.ryazan.ru

состояние системы, которого она достигает при времени процесса эволюции, стремящемся к бесконечности, и которое определяется небольшим числом параметров порядка [6].

Основным способом анализа динамики сложных систем является метод вложения Такенса. Его суть состоит в том, что поведение системы может быть расшифровано по любой динамической или пространственной характеристике, так как любой сигнал от системы содержит в себе информацию обо всех процессах внутри нее, поскольку все части динамической системы взаимосвязаны и могут быть рассмотрены как единое целое. Таким образом, исследовать динамику системы можно, измеряя любую из динамических переменных в одной точке через равные промежутки времени. Полученная последовательность данных обычно обрабатывается по алгоритму Грассбергера–Прокачиа. При этом определяются вид и размерность аттрактора, число степеней свободы, показатели Ляпунова и другие параметры динамики. Этот метод, первоначально разработанный для исследования поведения систем, изменяющих свое состояние во времени, был адаптирован для изучения пространственно-распределенных систем, какими, например, являются поверхности материалов [7,8].

Для доказательства факта, что структура некристаллических материалов представляет собой „замороженный“ детерминированный хаос [4,8–10], т.е. фактически не может быть представлена как случайная сетка атомов, была исследована структура поверхности аморфного гидрогенизированного кремния ($a\text{-Si:H}$) методами сканирующей туннельной микроскопии и атомной силовой микроскопии [11]. Экспериментальные исследования структуры поверхности различных материалов с помощью метода вложения Такенса проводились исходя из соображений, что поверхность является „замороженным“ снимком динамической картины процессов роста материалов, получаемых из газовой фазы, например $a\text{-Si:H}$, без учета релаксационных процессов, и, следовательно, в распределении вещества по поверхности содержится информация о пространственно-временной динамике роста. В качестве измеряемой переменной была выбрана высота профиля поверхности, отсчитываемая от некоторого уровня, принятого за нулевой, поскольку она однозначно характеризует распределение вещества по поверхности роста и отражает процессы пространственно-временной эволюции.

3. Топологические инварианты хаотической динамики роста материала

Для категоризации поведения систем удобной меткой является фрактальная размерность D соответствующего аттрактора, определяемая по алгоритму Грассбергера–Прокачиа [6,12]. Она позволяет отличать системы, характеризующиеся чрезвычайно сложным хаотическим,

но вместе с тем детерминированным поведением от систем с чисто случайным поведением. С помощью размерности аттрактора можно оценить число параметров порядка n , к которым подстраиваются все остальные степени свободы системы:

$$n > 2D + 1. \quad (1)$$

Как уже отмечалось, траекторию в p -мерном фазовом пространстве можно восстановить исходя из одной зависящей от времени (расстояния) переменной $X(t)$, выбирая в качестве координат величины $X(t)$, $X(t+T)$, $X(t+2T)$, ..., $X(t+(p-1)T)$, где T — надлежащим образом определенная временная задержка. Поскольку время t дискретизируется, то в результате получим серию p -мерных векторов (N), представляющих фазовую диаграмму динамической системы. Таким образом, устанавливается начало отсчета \mathbf{X}_i для всех имеющихся данных, и можно вычислить расстояние от этой точки до остающихся $N-1$ точек: $|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j|$. Это позволяет сосчитать число точек в фазовом пространстве, отстоящих от \mathbf{X}_i на расстоянии, не превышающем некоторую заданную величину r . Повторяя этот процесс для всех значений i , можно вычислить величину $C(r)$, называемую корреляционным интегралом:

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} [1/N^2] \sum_{i,j=1}^N \Theta(r - |\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j|), \quad (2)$$

где $\Theta(x)$ — функция Хевисайда, равная по определению единице при положительных x и нулю при остальных значениях x .

Зафиксируем некоторое малое ξ и воспользуемся им в качестве меры для зондирования структуры аттрактора. Если последний представляет собой линию, то, очевидно, число пробных точек, расстояние от которых до заданной точки не превышает r , должно быть пропорционально r/ξ . Если аттрактор представляет собой поверхность, то число таких точек должно быть пропорционально $(r/\xi)^2$. В более общем случае, если аттрактор представляет собой D -мерное многообразие, число точек должно быть пропорционально $(r/\xi)^D$. Поэтому можно ожидать, что при сравнительно малых r функция $C(r)$ должна изменяться как

$$C(r) = r^D. \quad (3)$$

Таким образом, корреляционная размерность может быть определена из наклона зависимости $\ln C(r)$ от $\ln r$:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} [d \ln C(r, N) / d \ln r]. \quad (4)$$

Алгоритм для вычисления D можно представить следующим образом.

1) Исходя из данной временной (пространственной) последовательности строится корреляционная функция (2) при последовательно возрастающих значениях размерности фазового пространства n .

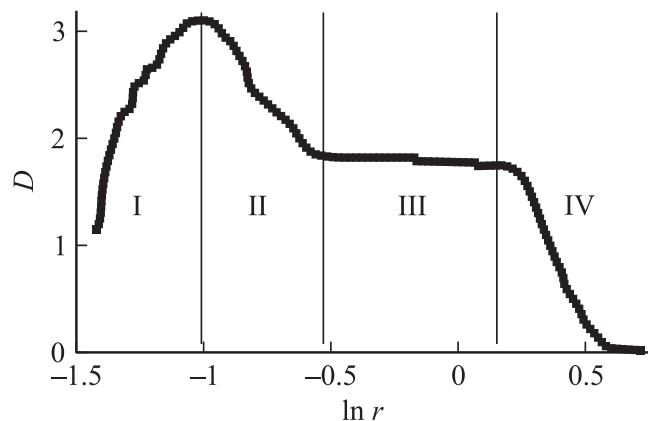


Рис. 1. Типичная зависимость $D = f(\ln r)$.

2) Определяется наклон D вблизи начала координат согласно (4) и рассматривается его зависимость от возрастающего значения n .

3) Если величина D в зависимости от n выходит на плато выше некоторого значения n , то представляемая данной временной (пространственной) последовательностью система должна иметь аттрактор. Величину D , определяемую по моменту насыщения, следует рассматривать как размерность аттрактора. Конечные нецелые значения D означают, что в системе наблюдается динамический хаос. Значение n , после которого происходит насыщение, определяет минимальное число переменных, необходимых для моделирования поведения, соответствующего данному аттрактору. Следует отметить, что для последовательности в виде случайного шума тенденция к насыщению не наблюдается, следовательно, величина D не определена [6].

В большинстве экспериментальных и численных исследований хаотических систем исследуется зависимость от $\ln r$ тангенса угла наклона $C(r)$ в двойных логарифмических координатах, т.е. $D = d[\ln C(r)]/d(\ln r)$, типичный вид которой приведен на рис. 1. На ней можно выделить четыре области.

Область I. В этом интервале масштабов размеры ячеек слишком малы. В каждую ячейку попадает всего несколько точек, они не позволяют оценивать истинные вероятности p_i того, что в некоторый момент времени точка на фазовой траектории находилась в ячейке с номером i .

Область II. В этой области выборка недостаточна, чтобы передать канторову структуру аттрактора. Кроме того, в ней обычно существенна погрешность эксперимента, или точность, с которой известны точки аттрактора.

Область III. Точки кривой в этом интервале характеризуют фрактальную размерность аттрактора. Чтобы расширить область III, можно увеличивать размер выборки, повышать точность эксперимента, наилучшим образом выбирать переменные, которые будут анализироваться.

Область IV. Размеры ячеек стремятся к размерам аттрактора и не характеризуют его канторову структуру.

При этом характерными признаками детерминированного хаоса в распределенных системах являются [11]:

— наличие линейного участка на зависимости D от $\ln r$ и, как следствие, наличие плато на зависимости $d[D(r, n)]/d(\ln r)$ от $\ln r$ в определенном интервале r ;

— насыщение величины $\Delta D = D(n) - D(n - 1)$ при больших n .

В результате измерений высоты профиля для образцов α -Si:H, которые проводились вдоль поверхности через дискретные интервалы, получилось трехмерное изображение квадратных участков поверхности. Измерения высоты профиля проводились в 12–15 тысячах точек. Как показано в [11,12], такое число точек является достаточным для выявления топологии этого аттрактора.

Образцы α -Si:H получали методом низкочастотного тлеющего разряда из 100%-го SiH₄ при мощности разряда 50 мВт/см², давлении 70 Па, скорости расхода силана 200 см³/с и температурах подложки 100, 225, 325°C [13]. Для этих образцов на рис. 2, 3, 4 соответственно приведены изображения поверхностей образцов, полученных с помощью атомно-силовой микроскопии, функции распределения высоты профиля h (ρ — плотность вероятности), зависимость D и $dD/d \ln r$ от n , $\ln r$ (см. кривые 1 и 2 соответственно).

При визуальном изучении изображения поверхности ясно, что при увеличении температуры подложки ее шероховатость уменьшается. При этом области выпуклостей увеличиваются, а остальная поверхность становится более гладкой. Соответствующий характер имеют изменения в функции распределения: дисперсия уменьшается, максимум смещается в область малых значений высоты профиля.

Зависимость $D = f(n, \ln r)$ от температуры подложки имеет сложный характер. Во всех случаях наблюдаются три различных участка в диапазонах: от 0 до -0.6, от -0.6 до -1.4, от -1.4 до -1.8. На этих участках существуют области с линейным наклоном, который насыщается при размерности вложения $n = 8$. Такое поведение свидетельствует о том, что исследуемое распределение имеет детерминированный хаотический характер. При увеличении температуры подложки эти участки становятся более выраженными. По-видимому, их существование означает, что рост определяется тремя различными механизмами.

Анализируя результаты проведенных экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы. Рельеф поверхности (α -Si:H), представляющий собой „замороженный“ мгновенный снимок процессов роста, структура поверхности материала могут быть описаны как „застывший“ динамический хаос [8,14]. Он проявляется как очень сложное нерегулярное поведение, внешне схожее с обычным тепловым хаосом, но принципиально отличающееся от него. В режиме динамического хаоса амплитуда отклонения от среднего сравнима с самим

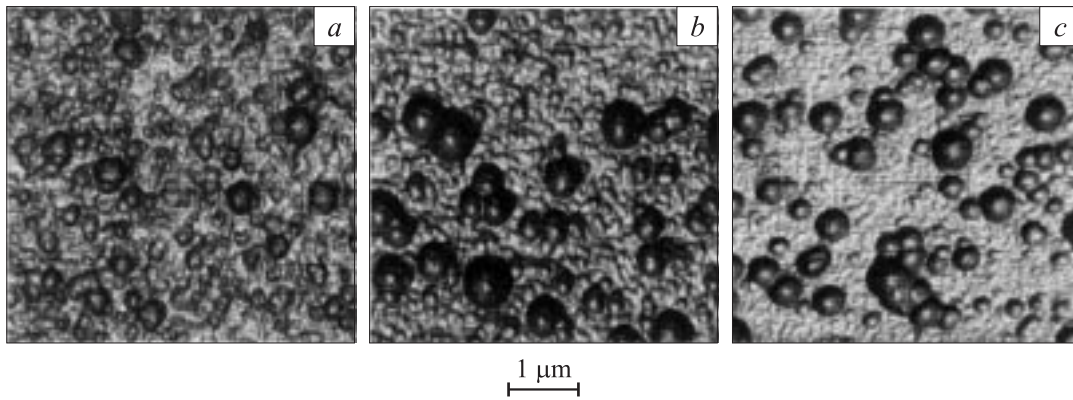


Рис. 2. Поверхности образцов $a\text{-Si:H}$, выращенных при температурах подложки 100 (a), 225 (b), 325°C (c) [11].

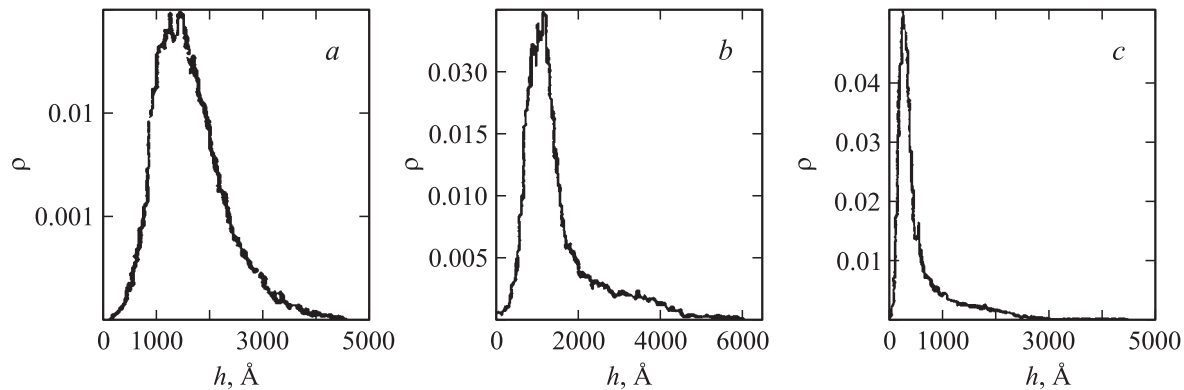


Рис. 3. Функции распределения высоты профиля для образцов $a\text{-Si:H}$, выращенных при температурах подложки 100 (a), 225 (b), 325°C (c) [11].

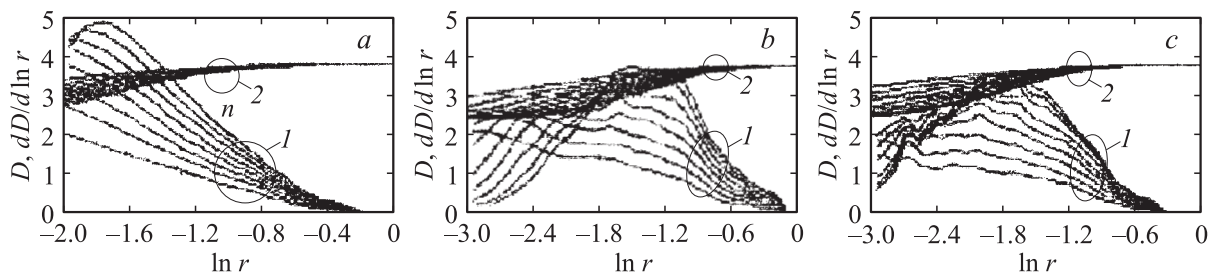


Рис. 4. Зависимости D (1) и $dD/d \ln r$ (2) от $\ln r$ для образцов $a\text{-Si:H}$, выращенных при температурах подложки 100 (a), 225 (b), 325°C (c) [11].

средним, но число пространственных и временных масштабов столь велико, что поведение системы кажется хаотическим. В тепловом хаосе все характерные масштабы — микроскопического порядка, а флуктуации вокруг среднего чрезвычайно малы.

Таким образом, фрактальная размерность позволяет определить размерность и вид динамики роста. Это удобная мера для идентификации систем. Однако она не очень полезна для практического применения (моделирования и управления). Большой интерес с позиций физиков и технологов, работающих над изучением процессов роста различных материалов и управлением

ими, представляют другие топологические инварианты, которые отражают геометрические свойства векторного поля, характеризующего динамику, а именно показатели Ляпунова.

Показатели Ляпунова являются в прямом смысле динамическими инвариантами и наиболее информативны. Рассмотрим их физический смысл и порядок расчета более подробно. Выберем две близкие точки $x'(0)$ и $x''(0)$, лежащие на аттракторе, и посмотрим, как меняется расстояние $d(t) = |x'(t) - x''(t)|$ между ними с течением времени. Здесь $x'(t)$ и $x''(t)$ — решения дифференциального уравнения n -го порядка, описывающего эволюцию

пространственно-временной системы с начальными данными $x'(0)$ и $x''(0)$. Если аттрактор — особая точка, то $d(t) = 0$. Если аттрактор — предельный цикл, то $d(t)$ будет периодической функцией времени. Для странного аттрактора $d(t) \propto \exp(\lambda_t t)$, $\lambda_t > 0$ (конечно, до тех пор, пока $x'(t)$ и $x''(t)$ достаточно близки) [15].

Величина λ_t называется ляпуновским показателем:

$$\lambda_t(x'(0), \omega) = \lim_{t \rightarrow \infty} \lim_{d(0) \rightarrow 0} \{(1/t) \ln d(t)/d(0)\}, \quad (5)$$

где ω — вектор от точки $x'(0)$ к точке $x''(0)$. Можно сказать, что ляпуновский показатель, если он положителен, характеризует среднюю скорость разбегания двух бесконечно близких траекторий (или сближения, если он отрицателен).

Показатели Ляпунова определяют время корреляций в системе τ_c . После истечения этого времени корреляционная связь между значениями процесса в соседние моменты времени ослабляется, и многомерные функции распределения распадаются на произведение одномерных.

В [11] предлагается оценивать λ_t на основе следующих соображений. Пусть две точки, изначально разделенные бесконечно малым расстоянием ε , спустя некоторое время будут удалены друг от друга на расстояние $\sim \varepsilon \exp(\lambda_t t)$. Время, через которое бесконечно малая разница в начальных условиях будет сравнима с характерными размерами аттрактора R , и является временем корреляций. Исходя из этих соображений для τ_c можно записать следующее выражение:

$$\tau_c = \frac{1}{\lambda_t} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \ln(R/\varepsilon). \quad (6)$$

Применительно к процессам роста наличие положительных временных показателей Ляпунова означает, что через некоторое время, пропорциональное времени корреляций, структура вышележащих слоев не будет повторять структуру нижележащих. Если рассматривать два различных технологических процесса, протекающих одновременно, то через время τ_c корреляция между структурами материалов, выращиваемых в них, будет равна нулю. Если оценивать τ_c по формуле (6), то ε определяется неточностью задания (флуктуациями) управляющих параметров технологического процесса Δp или флуктуациями окружающей среды f :

$$\varepsilon = \Delta p + f. \quad (7)$$

Обобщая формулы (4)–(6), для τ_c можно записать следующее выражение:

$$\tau_c = A/\lambda_t, \quad (8)$$

где A — константа, значение которой определяется в зависимости от выбора критерия степени корреляций.

По аналогии с системами, эволюционирующими во времени, для мгновенных снимков пространственно-временной системы можно ввести понятие пространственных показателей Ляпунова λ_r . Их число равно размерности пространства, в котором существует пространственный аттрактор.

Пространственные и временные показатели Ляпунова (λ_r и λ_t) с различных позиций характеризуют устойчивость пространственно-временной системы. По аналогии с λ_t можно предположить, что λ_r характеризует неустойчивость пространственного распределения или, другими словами, его чувствительность к различию в пространственных начальных условиях. Рассмотрим поперечное сечение поверхности материала, сформированной при определенных условиях. Зафиксируем точку с координатой x_0 , которой соответствует высота профиля h_1 . Предположим, что при таких же условиях была сформирована другая поверхность. Ее отличие от первой заключается только в отличии высоты профиля в точке x_0 , причем это отличие бесконечно мало. При условии, что хотя бы один пространственный ляпуновский показатель положителен, на расстояниях l_c от точки x_0 разность высот профилей поверхности δ будет сравнима со средней высотой профиля P . На расстоянии l_c от точки x_0 профили будут совершенно различными. По аналогии с τ_c величину l_c назовем длиной корреляций:

$$l_c = (1/\lambda_r) \lim_{\delta \rightarrow 0} \ln(P/\delta). \quad (9)$$

Аналогично формулам (5)–(8) выражение (9) можно переписать в следующем виде:

$$l_c = B/\lambda_r. \quad (10)$$

Наличие положительных показателей Ляпунова у системы уравнений, описывающей структуру материала, означает, что она не обладает трансляционной симметрией в пространстве, т.е. два участка материала, расположенные на расстоянии $l > l_c$ друг от друга, не связаны (некоррелированы) по структуре относительно друг друга. Если $l_c \ll L$ (L — размер системы), то в системе отсутствует дальний порядок и можно утверждать, что структура вещества некристаллическая. Если наблюдать участки материала, удаленные друг от друга более чем на корреляционную длину, то их структура и свойства не будут совпадать.

С позиции термодинамики λ_r является критерием неравновесности системы, т.е. мерой ее отклонения от глобально устойчивого состояния термодинамического равновесия. Так, если структура материала соответствует положению равновесия, то это означает, что вещество по пространству распределено случайно или идеально периодически. Для такого распределения не существует положительных показателей Ляпунова. Наличие же $\lambda_r > 0$ означает, что распределение отличается от равновесного. Поэтому после роста в структуре материала

будут происходить релаксационные процессы, переводящие ее в равновесное состояние — кристалл; это состояние может существовать значительное время, поскольку внешние условия не позволяют достичь равновесия. Для технологий важно, что показатели Ляпунова позволяют определять пределы предсказуемого (управляемого) роста структуры на разных пространственных и временных масштабах, т.е. фактически определять пределы воспроизводимости характеристик материалов.

Факт, что невоспроизводимость определяется неустойчивостью хаотической динамики, заставляет весьма скептически оценивать возможности использования традиционных приемов увеличения воспроизводимости через ужесточение точности задания управляющих параметров. Поэтому необходимы иные подходы к увеличению воспроизводимости, основанные на знании динамических процессов в веществе при отвердевании. На наш взгляд, должны быть изменены и принципы управления, применяемые в существующих технологиях, поскольку в них управление хаотической динамикой вещества осуществляется линейными методами, а управляющие воздействия не соответствуют свойствам вещества, возникающим в процессе отвердевания. В новых технологиях следует исходить из того, что их управляющие параметры должны быть согласованы с внутренними динамическими процессами в веществе. Рассмотрим принципы построения технологических систем, основанных на этом подходе [16].

4. Принципы построения технологических систем

Принцип совместимости отражает необходимость соответствия параметров управляющего воздействия внутренним свойствам вещества при отвердевании. Управляющая система должна понимать и воспроизводить язык, на котором говорит управляемая система. При этом достигается максимальная эффективность управления. Важны не столько интенсивность и продолжительность воздействия, сколько соответствие свойствам среды. Следует иметь в виду, что достичь эффективности 100% невозможно из-за всегда присутствующей неопределенности в поведении сложной системы. Это фундаментальное свойство. На основе экспериментальных данных вырабатываются соответствующие изменения управляющих параметров, которые позволяют решать две принципиально различные задачи:

— стабилизация периодических орбит хаотического режима, т.е. разрушение хаоса;

— стохатизация системы путем подключения к другой хаотической системе.

Выбор метода определяется целями технологий. Например, если требуется вырастить совершенную кристаллическую структуру или воспроизвести какую-либо структурную неоднородность, то необходимо быстро

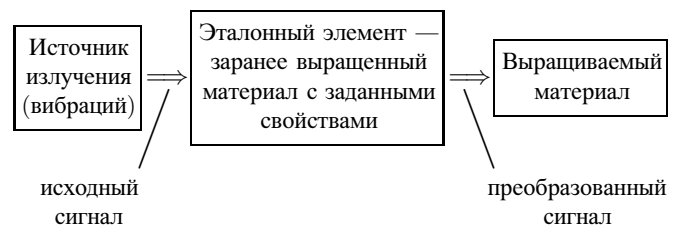
преодолеть стадию хаоса и стабилизировать периодическую динамику системы, например, методом Грибожди–Отто–Йорке, с помощью которого стабилизируются нестабильные орбиты хаотического аттрактора. Для синтеза аморфных материалов, напротив, полезным будет хаотический привод. Если ставится задача устранения макронеоднородностей, то необходимо разрушение нелинейной суперпозиции ограниченного числа мод. Во всех случаях характеристики этих управляющих воздействий должны формироваться на основе точного знания динамики вещества при отвердевании.

Принцип иерархии. Природа имеет иерархическое строение. Иерархичность строения — это предоставление относительной автономности различным уровням системы, подчиненным главному регулятору, но вместе с тем это и вынужденный отказ от контроля над всеми изменениями, происходящими в системе. Это означает, что управление тоже должно быть построено по иерархическому принципу. Поэтому при постановке задачи управления должно быть проведено расчленение системы на уровни и выбран уровень, ответственный за требуемые нам свойства.

Для технологий некристаллических материалов это означает, что для целей управления должен быть выбран определенный уровень: нано-, микро-, структурно-химических неоднородностей и т.д. Затем должна быть исследована динамика этого уровня и выработаны соответствующие управляющие воздействия. При этом возникает проблема неполного управления, т.е. управлять можно только некоторыми уровнями, ответственными за определенные свойства.

Принцип адекватности. Системы управления должны иметь, по-видимому, такой же порядок сложности, как и системы, которыми они управляют, т.е. набор возможных режимов поведения управляющей системы должен быть не менее богатым. Вообще говоря, нужно устройство для управления такой сложности, чтобы оно самостоятельно могло непрерывно искать связи, статистические корреляции и оптимизировать состояния определенных сторон управляемой системы.

Вполне вероятно, что динамика формирования некристаллической структуры окажется настолько сложной, что не сможет быть исследована и смоделирована. В этом случае в качестве черного ящика может быть использован заранее выращенный материал как некий эталонный элемент технологии. Возбуждая его с помощью соответствующих воздействий, мы можем передавать его собственные вибрации формирующейся структуре. Общая схема этого метода такова:



Принцип временной синхронизации. Временные масштабы управляющих воздействий должны совпадать с соответствующими процессами в управляемой системе.

Принцип локальности. Самоорганизация есть процесс, в течение которого системой можно управлять. Она имеет ограниченные пространственные и временные масштабы и протекает в локальной области пространства. Что касается процессов образования аморфной структуры, то они локализованы во вполне определенной области — промежуточном слое между газообразной или жидкой фазой, из которой идет рост, и уже сформированной твердотельной структурой. Воздействия в пространстве и времени должны быть локализованы, т.е. ориентированы в конечном итоге на поверхностные состояния.

Принцип неопределенности. В любом случае следует иметь в виду, что усилия, направленные на увеличение эффективности управления или воспроизводимости, не могут изменить вероятностного, случайного характера образования той или иной структуры [15].

5. Заключение

Применение теории сложных систем (самоорганизации) к описанию неупорядоченных материалов и закономерностей их формирования позволяет не только с новых позиций моделировать процессы синтеза неупорядоченного вещества, но прежде всего с ее помощью удастся прийти к пониманию физической природы ряда фундаментальных проблем, присущих этим материалам. Так, становится ясно, что процесс соответствует режиму самоорганизации, который может быть описан ограниченным числом степеней свободы; распределение вещества по поверхности, представляющей собой „замороженный“ мгновенный снимок процессов роста, имеет детерминированный хаотический характер. При этом определяющим фактором при синтезе вещества является наличие корреляций, т.е. воспроизводимых отношений между атомами (молекулами) в различных частях системы. Масштабы корреляций позволяют оценить воспроизводимость выращенной структуры.

Главный вывод состоит в том, что новый взгляд на процессы формирования некристаллической структуры как процессы самоорганизации позволяет переосмыслить в новых терминах принципы технологий этих материалов и открывает вполне реальные перспективы для существенного увеличения эффективности этих технологий. Развитие этого направления, вполне вероятно, приведет не только к улучшению воспроизводимости характеристик материалов или сделает существенно более быстрым процесс оптимизации технологий, но прежде всего позволит осмысленно синтезировать вещества с принципиально новыми свойствами.

Список литературы

- [1] А.А. Айвазов, Н.В. Бодягин, С.П. Вихров. Изв. вузов. Электроника, **1**, 39 (1997).
- [2] Н.В. Бодягин, С.П. Вихров, С.Н. Дьяков. В сб.: *Физика полупроводников и микроэлектроника* (Рязань, РГРТА, 1995) с. 92.
- [3] С.П. Вихров, А.А. Айвазов, Н.В. Бодягин. Вестн. РГРТА, **1**, 77 (1996).
- [4] С.П. Вихров, Н.В. Бодягин. В сб.: *Физика полупроводников и микроэлектроника* (Рязань, РГРТА, 1997) с. 3.
- [5] H.D.I. Ababrael, R. Rown, J.J. Sidorovich, L.S. Tsimiring. Rev. Mod. Phys., **65** (4), 1331 (1993).
- [6] Г. Николис, И. Пригожин. *Познание сложного* (М., Мир, 1990).
- [7] A.A. Aivazov, N.V. Bodyagin, S.P. Vikhrov, S.V. Petrov. J. Non-Cryst. Sol., **114**, 157 (1989).
- [8] Н.В. Бодягин, С.П. Вихров, А.А. Айвазов. Изв. вузов. Электроника, **3-4**, 7 (1997).
- [9] Н.В. Бодягин. Изв. вузов. Электроника, **2**, 31 (1997).
- [10] A.A. Aivazov, N.V. Bodyagin, S.P. Vikhrov. *Material Research Society* (Pittsburgh, USA, 1996) v. 420, p. 145.
- [11] Н.В. Бодягин, С.П. Вихров, Т.Г. Ларина, С.М. Мурсалов, В.Н. Тимофеев. *Природа невоспроизводимости структуры и свойств материалов для микро- и нанозлектроники* (Рязань, РГРТА, 2004).
- [12] Т.С. Ахромеева, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий, А.А. Самарский. *Нестационарные структуры и диффузионный хаос* (М., Наука, 1992).
- [13] Н.В. Бодягин, С.П. Вихров. *Управление процессами роста полупроводниковых материалов* (Рязань, РГРТА, 1997).
- [14] Н.В. Бодягин, С.П. Вихров. Письма ЖТФ, **23** (19), 77 (1997).
- [15] С.П. Вихров, Н.В. Бодягин. *Новый подход к построению технологических систем на примере роста слоев a-Si:H* (Рязань, РГРТА, 1994).
- [16] Н.В. Бодягин, С.П. Вихров, С.М. Мурсалов, И.В. Тарасов. Микроэлектроника, **31** (4), 307 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

Growth processes of noncrystalline semiconductors from positions of the self-organizing theory

S.P. Vikhrov, N.V. Bodyagin, T.G. Larina, S.M. Mursalov

The Ryazan State Radio Engineering Academy,
390024 Ryazan, Russia

Abstract Suggested is an opportunity of applying ideas and methods of the self-organizing theory by considering noncrystalline semiconductor growth processes. A basic method of the analysis of the complex system dynamics being described.