

ИНВАРИАНТНОСТЬ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫХ СПЕКТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАНОФОРМ НА ПОВЕРХНОСТИ ГЕТЕРОСТРУКТУР $Zn_xCd_{1-x}Te$ — Si, СИНТЕЗИРОВАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Д. ф.-м. н. П. П. Москвин¹, д. т. н. А. И. Казаков², к. ф.-м. н. В. А. Рудницкий³,
Л. В. Рашковецкий³, Г. В. Шаповалов²

¹Житомирский государственный технологический университет;

²Одесский национальный политехнический университет;

³Институт физики полупроводников НАНУ, г. Киев

Украина

¹moskvin_pp@mail.ru; ²shapovalov@opu.ua; ³org.rva@gmail.com

Для описания площади поверхности и объемов пространственных форм, формирующих рельеф на поверхности структур твердого раствора « $Zn_xCd_{1-x}Te$ — подложка Si (111)», которые синтезированы методом анодного вакуумного напыления, применен мультифрактальный анализ. Входной информацией служили АСМ-изображения поверхности пленки. Выполнено сравнение параметров мультифрактального рельефа поверхности слоев, полученных методом анодного вакуумного напыления и методом горячей стенки при одинаковых температурах и скоростях роста. Показано, что в рамках погрешности определения мультифрактальных параметров эти величины оказываются практически одинаковыми для сравниваемых методов синтеза.

Ключевые слова: поверхность гетероструктур, тонкие пленки, полупроводниковые твердые растворы класса A^2B^6 , мультифрактальный анализ.

Создание высокоэффективных приборов современной электроники на основе сверхтонких полупроводниковых слоев предполагает наличие количественной информации о кристаллографическом совершенстве их поверхности. В [1, 2] для описания состояния площади поверхности и объемов рельефообразующих наночастиц, формирующихся на поверхности гетерокомпозиции « $Zn_xCd_{1-x}Te$ — подложка Si», был применен метод мультифрактального (МФ) анализа. Именно такой математический подход позволил количественно описать геометрические параметры самоподобных состояний элементов поверхности пленок, которые наблюдаются на наномасштабе и характеризуются своими сложными геометрическими формами. Располагая количественным математическим методом описания геометрии наночастиц, появляется возможность проследить за изменениями МФ-спектров для поверхностных характеристик слоев, которые синтезируются различными методами. По своей сути такой анализ предполагает получение ответа на вопрос о воспроизведении (и, в некоторой степени, инвариантности) кристаллической поверхностью своих фрактальных характеристик или, по сути, своей морфологии вне зависимости от методов синтеза слоя при обеспечении одинаковых (или очень близких) термодинамических условий проведения процесса фазообразования.

Целью настоящей работы является выполнение сравнительного анализа МФ спектров распределения значений площади поверхности и объема рельефообразующих пространственных форм, формирующихся на поверхности пленок, синтезированных разными вакуумными технологиями в одинаковых термодинамических условиях проведения процессов, по данным АСМ-изображений поверхности слоев гетероструктур $Zn_xCd_{1-x}Te$ — Si.

В работе получены и исследованы МФ-спектры значений площади и объема наночастиц, формирующихся на поверхности слоев твердого раствора $Zn_xCd_{1-x}Te$, осажденного методом вакуумного анодного напыления. Термодинамические условия проведения технологического процесса формирования гетероструктуры $Zn_xCd_{1-x}Te$ — Si были выбраны такими же, как и в [1—3]: использовался ме-

тод горячей стенки, синтез проводился при той же температуре подложки из исходной шихты того же состава, что и в указанных работах. Такой подход обеспечивал проведение процесса фазообразования в одинаковых термодинамических условиях, а совпадение кинетических условий роста обеспечивалось максимально возможным совпадением скорости роста слоев в сравниваемых методах вакуумной кристаллизации.

Эксперименты по синтезу слоев твердого раствора $Zn_xCd_{1-x}Te$ проводились на модернизированной установке вакуумного напыления УРМ 3.279.014, где поток атомов к подложке создается распылением источника, расположенного на аноде в активной зоне реактора. Режим работы источника в этом методе контролируется током накала катода, величиной ускоряющего напряжения между анодом и катодом, а также анодным током.

В использованной установке, изменяя расположение источника, можно проводить бомбардирование ускоренными электронами как непосредственно поверхности распыляемого вещества (порошок твердого раствора или кусочки монокристаллов), так и поверхности молибденового тигля, в котором находится исходная шихта. В последнем случае бомбардировка поверхности тигля приводила к разогреву всей испарительной ячейки, и именно термический разогрев стимулировал испарение материала. В такой ситуации ячейка обеспечивала квазиравновесные условия испарения и по своей сути работала как ячейка Кнудсена. Подробно технологический процесс синтеза структур методом анодного напыления описан в [4].

Толщину полученных пленок измеряли при помощи механического профилометра ALPHA STEP 100 (Tencor Instruments). Морфологию структур исследовали методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) (использован микроскоп Nanoscope Dimension 3000, фирма Digital Instruments) в режиме периодического контакта. Разработанное вычислительное обеспечение [1, 2] применялось для анализа параметров МФ-распределения значений площади поверхности и объема пространственных наночастиц в структурах пленок « $Zn_xCd_{1-x}Te$ ($x \approx 0,05$ мол. дол.) — подложка Si(111)», которые синтезированы в настоящей работе. В качестве МФ-параметров, описывающих структуру поверхности, в соответствии с рекомендациями [1] были выбраны число Реньи D_0 и параметр упорядоченности $\Delta_{q \rightarrow \infty} = D_1 - D_{q \rightarrow \infty}$ (степень нарушения фрактальной симметрии).

Полученные количественные данные о МФ-параметрах для распределения значений объема и площади поверхностей наночастиц позволяют провести сопоставительный количественный анализ состояния поверхности пленок $Zn_xCd_{1-x}Te$, выращенных различными вакуумными методами. Совокупность таких взаимосвязей между числами Реньи D_{S0} , D_{V0} , параметрами упорядоченности Δ_S , Δ_V и температурой подложки представлена на рис. 1 для одинакового времени процесса синтеза. Данные об МФ-параметрах распределения значений площади и объема наночастиц, формирующихся на поверхности пленок, выращенных методом горячей стенки, заимствованы из работ [1, 2].

Данные, приведенные на рис. 1, демонстрируют устойчивые взаимосвязи между МФ-параметрами и условиями проведения процесса синтеза методом анодного напыления как для распределения площади поверхности наночастиц, так и для их объемов. Это позволяет утверждать, что именно с помощью МФ-параметров удалось количественно отследить и описать различия в структуре поверхности между образцами одного и того же состава, но которые были выращены при разных температурах подложки и различных способах подвода вещества к фронтам роста.

На рис. 1, а показана зависимость чисел Реньи для площади поверхностных форм от температуры подложки при синтезе пленок твердого раствора $Zn_xCd_{1-x}Te$ методом анодного напыления и методом горячей стенки, рис. 1, б дополняет представленные данные соответствующими результатами только для изменения размерностей объемов рельефообразующих поверхностных форм для тех же условий синтеза. Укажем, что на рисунках все прямые линии проведены через полученные значения МФ-параметров при использовании метода наименьших квадратов.

При постановке задач данной работы высказывалось предположение, что при обеспечении одинаковых термодинамических и кинетических условий фазообразования удастся получить одинаковые МФ-параметры для обоих сравниваемых процессов, однако точного совпадения величин чисел Реньи добиться не удалось. В то же время, с учетом того, что погрешности определения величин МФ-параметров все же достаточно велики, можно утверждать, что найденные параметры как для площади поверхности, так и объема пространственных форм, оказываются достаточно близкими. Обращает на себя внимание и тот факт, что линии, описывающие изменение чисел D_0 с температурой подложки для каждого из методов синтеза, идут практически параллельно друг другу. Последнее означает, что

согласно полученным данным при изменении температуры рассматриваемые параметры изменяются одинаковым образом. Такая ситуация все же позволяет высказать предположение, что отсутствие точного совпадения чисел Реньи для поверхностных параметров слоев, выращенных разными методами, обусловлены невысокой точностью обеспечения и поддержания заданной мгновенной скорости роста слоев в методе анодного вакуумного напыления из-за особенностей функционирования испарительной системы.

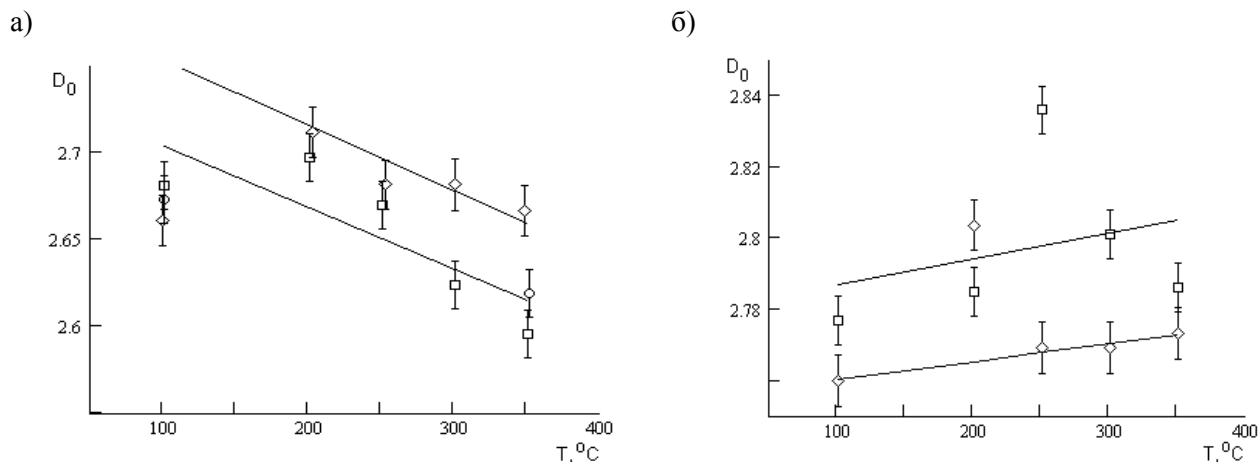


Рис. 1. Зависимость числа Реньи от площади поверхности (а) и объема (б) наночастиц, синтезированных методом анодного напыления (нижние линии) и методом горячей стенки (верхние) от температуры подложки

Таким образом, проведенное исследование показало, что числа Реньи и параметры разупорядочения для объемов и площадей поверхности наночастиц, формирующихся на поверхности слоев, для слоев, синтезированных указанными методами, близки по величине и их изменение с вариацией температуры подложки происходит одинаковым образом. Последнее свидетельствует о возможности получения слоев с практически одинаковой морфологией поверхности разными технологическими приемами, но при обеспечении одинаковых термодинамических условий протекания процесса.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Moskvina P., Kryzhanivskyy V., Rashkovetskiy L. et al. Multifractal analysis of areas of spatial forms on surface of $Zn_xCd_{1-x}Te - Si$ (111) heterocompositions // Cryst. Growth.— 2014.— Vol. 404.— P. 204–209.
2. Moskvina P., Kryzhanivskyy V., Rashkovetskiy L., Lytvyn P. Multifractal spectrums for volumes of spatial forms on surface of $Zn_xCd_{1-x}Te - Si$ (111) heterostructures and estimation of the fractal // J. Crystal Growth.— 2016.— Vol. 450.— P. 28–33.
3. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
4. Moskvina P., Rudnitskiy V. Features of synthesis of structures on the basis of $ZnCdTe$ solid solutions by a method of vacuum anode deposition // Visnyk Zhitomir State Technological University (Ukraine). Series: Technical Science.— 2014.— № 4.— P. 106–112.

P. P. Moskvina, V. A. Rudnitskiy, L. V. Rashkovetskiy, G. V. Shapovalov

Invariance of multifractal spectrums from the areas and volumes of spatial forms on the surface of the $Zn_xCd_{1-x}Te - Si$ heterocompositions synthesized by different vacuum technologies

Multifractal (MF) analysis is applied to the description of the area of a surface and volumes of spatial forms which form a relief on a surface of heterostructures of $Zn_xCd_{1-x}Te$ solid solution — substrate Si (111) synthesized by the method of the electron beam with the evaporating anode. The input data for the MF analysis were the AFM (atomic force microscopy) images of the surface of layers. Comparison of parameters of MF spectrums for different geometries of the surface relief of the layers obtained at identical temperatures and approximately identical growth rates by the above mentioned method of growth and the method of hot wall epitaxy has been performed. It was shown that within the error limits of maintaining of identical conditions for synthesis of layers for compared techniques, MF spectrums for the areas and volumes of spatial nanoforms for heterostructures $Zn_xCd_{1-x}Te - Si$ remained very similar.

Keywords: heterostructures surface, thin films, the multifractal analysis. II-VI semiconductor materials.