

УДК 539.21; 541.182; 548.5; 620.18; 681.586

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПИСАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГЕТЕРОСТРУКТУР $Zn_xCd_{1-x}Te - Si$

Д. ф.-м. н. П. П. Москвин¹, к. ф.-м. н. В. Б. Крыжановский¹, Л. В. Рашковецкий²,
к. ф.-м. н. П. М. Литвин², к. ф.-м. н. Н. В. Вуйчик²

¹Житомирский государственный технологический университет, г. Житомир;

²Институт физики полупроводников НАНУ, г. Киев

Украина

moskvin@us.ztu.edu.ua

Разработан метод мультифрактального анализа распределения площади объемных форм на поверхности тонких пленок. Метод применен к обработке АФМ-изображений поверхности слоя твердого раствора $ZnCdTe$, осажденного на подложке из $Si(111)$. Рассчитаны и проанализированы мультифрактальные спектры площади объемных геометрических форм, формирующихся на поверхности указанной структуры. Обнаружены количественные взаимосвязи между параметрами мультифрактального спектра поверхности пленок и условиями ее осаждения.

Ключевые слова: поверхность гетероструктур, тонкие пленки, мультифрактальный анализ.

Создание высокоэффективных приборов современной электроники на основе сверхтонких полупроводниковых слоев предполагает наличие количественной информации о кристаллографическом совершенстве их поверхности. Для количественного описания состояния поверхности таких пленок и выполнения сравнительного анализа их кристаллографического качества в работе используется мультифрактальный (МФ) анализ [1].

МФ-анализ использовался в работе [2] для получения количественных характеристик состояния поверхности полупроводниковых пленок. Такой подход позволил рассчитать параметры состояния поверхности полупроводниковых гетероструктур на основе нитридов соединений A^3B^5 , сформированных методами нанотехнологий. Последнее, по своей сути, означало осуществление так называемой МФ-параметризации (расчет параметров МФ-структуры) поверхности слоев [1, 2]. Полученные таким образом данные позволили найти взаимосвязь между ними и электрофизическими и кристаллографическими свойствами структур. В то же время МФ-параметризация была выполнена применительно только к анализу двумерных изображений поверхности структуры и не принимала во внимание всю ее пространственную картину. В настоящей работе сообщается о разработке программного обеспечения МФ-анализа и результатах его применения для описания распределения площади объемных форм по поверхности пленок твердого раствора $Zn_xCd_{1-x}Te$. Тонкие слои этих твердых растворов были синтезированы методом горячей стенки на подложках из кремния.

В рамках МФ-представлений исследуемый объект моделируется набором взаимопроникающих степенных множеств, каждое из которых имеет свою размерность. Среди возможных геометрических параметров системы, поиск которых соответствует цели расчета поверхностной энергии системы, была выбрана площадь поверхности пленки. Именно этот физический параметр системы подвергается МФ-параметризации в данной работе. Входная информация для реализации МФ-анализа площади поверхности пленки была получена из АФМ-изображений. Аппроксимация формы поверхности и расчет ее площади осуществлялся на основе данных о цветовых характеристиках каждого из пикселей в цифровом изображении поверхности. Реализация метода огрубленных разбиений [1] достигалась разбиением всего пространства, охватывающего поверхность пленки, на кубы. Основные параметры МФ-спектра площади поверхности рассчитывалась по типовой для этого метода анализа процедуре [1].

Разработанное вычислительное программное обеспечение применяется для анализа параметров МФ-распределения площади в поликристаллических структурах пленок $Zn_xCd_{1-x}Te$ ($x \approx 0,05$ мол. долей), выращенных на подложке Si (111), которые синтезированы в настоящей работе. На рис.1 показана типичная фотография микроструктуры поверхности тонкой пленки CdZnTe, выращенной методом «горячей стенки» за 10 мин процесса и температуре подложки 100°C.

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). Так, для изображения на рис. 1 расчеты показали следующее значение этих параметров: $D_0 = 2,237$ и $\Delta = 0,196$.

Полученные количественные данные о МФ-параметрах поверхности позволяют осуществить поиск их взаимосвязей с условиями синтеза пленок. Так, на рис. 2 показана зависимость числа Реньи от температуры на подложке при синтезе пленок твердого раствора ZnCdTe. Из рис. 2 следует, что с увеличением температуры подложки размерность поликристаллической поверхности пленки (число D_0) уменьшается. Последнее описывает эволюцию термодинамического состояния системы в направлении формирования сплошной плоской поверхности. Данные рис. 2 по зависимости параметра упорядоченности также показывают устойчивую тенденцию системы к уменьшению ширины своего МФ-спектра, что свидетельствует о появлении в системе тенденции к формированию монофрактальной структуры.

Найденные устойчивые взаимосвязи между МФ-параметрами и условиями проведения синтеза позволяют утверждать, что именно величины МФ-параметров количественно отследили и численно описали различия в структуре поверхности между образцами одного и того же состава, но выращенными в разных условиях.

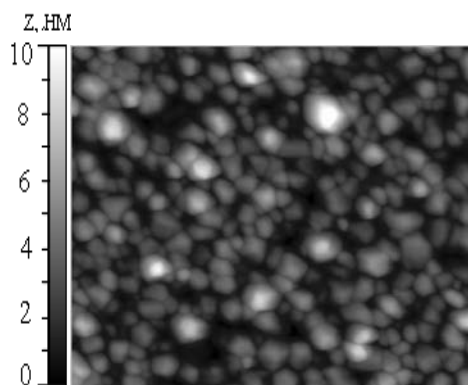


Рис. 1. AFM-изображение поверхности пленок $Zn_xCd_{1-x}Te$, выращенных на подложках Si (111), за 10 мин при температуре подложки 100°C

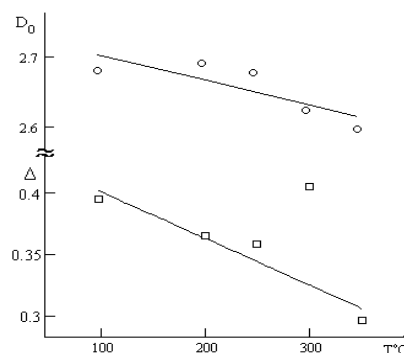


Рис. 2. Зависимость параметров D_0 и Δ от температуры синтеза слоев $Zn_xCd_{1-x}Te$ на подложках Si (111) за 30 мин: о, □ — данные настоящей работы для D_0 и Δ

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
2. Шмидт Н.М. Полупроводниковые самоорганизованные наноматериалы – нелинейные системы с фрактальной размерностью / Автореф. дис... д. ф.-м. н.— ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург.– 2009.

P. P. Moskvina, V. B. Kryzhanivskyy, L. V. Rashkovetskyi, P. M. Litvin, N. V. Vuichyk

Application of the multifractal analysis for the quantitative description of the geometric conditions on the surface of $Zn_xCd_{1-x}Te$ – Si heterostructures.

The method of multifractal analysis of distribution of the area of bulk forms on the surface of thin films is developed. The method is applied to processing AFM images of surface of solid solution ZnCdTe layers grown on a Si (111) substrate. Multifractal spectra of the area of geometrical forms formed on a surface of the specified structure has been calculated and analyzed. Quantitative interrelations between parameters of multifractal spectrums of surface of the films and conditions of their synthesis are found out.

Keywords: *heterostructure surface, thin films, multifractal analysis.*