



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

Ya. A. Suchikova, Features cluster formation on the surface of semiconductor crystals of the group  $A_3B_5$ ,  
*Comp. nanotechnol.*, 2016, Issue 1, 40–44

<https://www.mathnet.ru/eng/cn61>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.172

May 21, 2025, 23:41:33



## 2.2. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КЛАСТЕРОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ ГРУППЫ АЗВ5

*Сычикова Яна Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент. Бердянский государственный педагогический университет. E-mail: yanasuchikova@mail.ru*

Аннотация: в работе рассмотрены особенности образования кластеров на поверхности полупроводников группы АЗВ5 при электрохимической обработке. Механизм данного явления описан с точки зрения когерентных явлений в стохастических системах.

Ключевые слова: полупроводники, электрохимическое травление, кластеры, поры, стохастические системы, когерентные явления.

## 2.2. FEATURES CLUSTER FORMATION ON THE SURFACE OF SEMICONDUCTOR CRYSTALS OF THE GROUP АЗВ5

*Suchikova Yana Alexandrovna, PhD in Physics and Mathematics, Associate professor. Berdyansk State Pedagogical University. E-mail: yanasuchikova@mail.ru*

Abstract: The paper discusses the characteristics of cluster formation on the surface of semiconductors АЗВ5 in electrochemical processing. The mechanism of this phenomenon is described in terms of coherent phenomena in stochastic systems.

Index terms: Semiconductors, electrochemical etching, clusters, voids, stochastic systems, coherent phenomena.

---

### ВВЕДЕНИЕ.

Результаты исследования когерентных явлений в стохастических системах представляют интерес с точки зрения применения их в различных физических областях. При определенных условиях в стохастических системах явления когерентности характеризуются образованием кластеров [1]. Кластеризация возникает в рамках различных моделей. Одной из проблем, связанных с образованием кластеров, является модель формирования наноструктурированного пространства в различных полупроводниковых кристаллах. Порообразование наблюдается на поверхности кремния, германия, а также полупроводников типа АЗВ5.

В последнее время значительно вырос интерес к исследованиям структур с пониженной размерностью, проявляющих ряд необычных свойств, которыми не обладал исходный полупроводниковый кристалл. Простейшими возможностями создания такого материала является электрохимическая обработка в специальных растворах, приводящая к формированию пористого пространства. Подобная модификация структурных характеристик поверхности приводит к суще-

ственным изменениям физико-химических свойств исходного материала.

Исследование порообразования в полупроводниковых кристаллах является объектом многих исследований. Количество работ, проводимых в данном направлении, с каждым годом растет. Это объясняется перспективностью использования пористых полупроводников в микроэлектронике и оптоэлектронике.

Более полное понимание взаимосвязи параметров процесса электролитического растворения с характеристиками наноструктур позволит определить условия формирования материала со строго заданными, воспроизводимым физическими свойствами, что усилит его прикладной потенциал, а также позволит развить теоретические представления о механизме порообразования в полупроводниках.

В рамках данной работы рассматриваются особенности образования нанокластеров на поверхности полупроводников группы АЗВ5 при электрохимической обработке. Механизм данного явления описан с точки зрения когерентных явлений в стохастических системах.

## **ЭКСПЕРИМЕНТ**

Наноструктурированные поверхности формировались методом электрохимического травления. Для эксперимента были выбраны полупроводники типа АЗВ5, в качестве электролита использовались растворы кислот. Плотность тока выбиралась в диапазоне от 20 до 200 мА/см<sup>2</sup>, время травления – от 5 до 50 минут.

Перед экспериментом образцы тщательно очищались. Ниже приведены основные этапы технологического маршрута очистки полупроводниковых пластин:

- 1) шлифовка образцов алмазным порошком;
- 2) очищение пластин толуолом, этанолом и изопропанолом;
- 3) обезжиривание в горячем (75-80°C) перекисно-аммиачном растворе;
- 4) промывание в проточной деионизированной воде (удаление продуктов реакции предыдущей обработки);
- 5) обработка в горячей (90-100°C) концентрированной азотной кислоте (удаление ионов металлов);
- 6) гидродинамическая обработка пластин беличьими кистями в струе деионизированной воды;
- 7) сушка пластин с помощью центрифуги в струе очищенного сухого воздуха.
- 8) химическое или электрохимическое травление (химическая полировка пластин,
- 9) сульфидирование поверхности кристалла (пассивация).

Такая тщательная очистка полупроводниковых пластин необходима для исключения влияния состояния поверхности на ход эксперимента.

В электролитическую ячейку, приготовленную из фторопласта, помещают образец и электроды. Катодом служит пластина платины. Потенциостат используется для регулирования условий травления (плотность тока, напряжение, режимы импульсной подачи тока и т.д.).

Ванна заполняется электролитом. Следует учитывать, что установка может иметь более сложный вид при использовании дополнительных режимов: перемешивание электролита, подсветка образцов, дополнительная подача электролита (во избежание его обеднения во время травления).

Кроме того, образцы можно размещать параллельно дну ячейки (на поверхности электролита). Это особенно актуально, если на обратную сторону пластин напыляется контакт. Тогда, в случае подсветки образцов (режим фотоэлектрохимического травления) источник света необходимо размещать под ванной, которая должна быть приготовлена из светопропускающего материала (например, кварц). Катод (платина) припаивается ко дну ячейки. В этом случае линии тока направлены перпендикулярно поверхности образца, что благоприятно отражается на качестве получаемых пористых слоев.

В результате эксперимента на поверхности кристаллов были сформированы различные типы наноструктур. В зависимости от условий анодирования и исходных характеристик кристалла, структуры представляли собой следующие классы: пористые слои, сверхрешетки, текстурированные поверхности, нанокластеры, домены, квантовые точки. Факторы, наиболее влияющие на тип структуры следующие: состав и концентрация электролита, плотность тока, время анодирования, освещение образцов и обработка магнитным полем. Кроме того, важным является тип проводимости кристалла, ориентация поверхности, дефектность образцов. Различная комбинация этих условий дает многообразие низкоразмерных структур, которые могут быть сформированы на поверхности полупроводника (рис. 1).

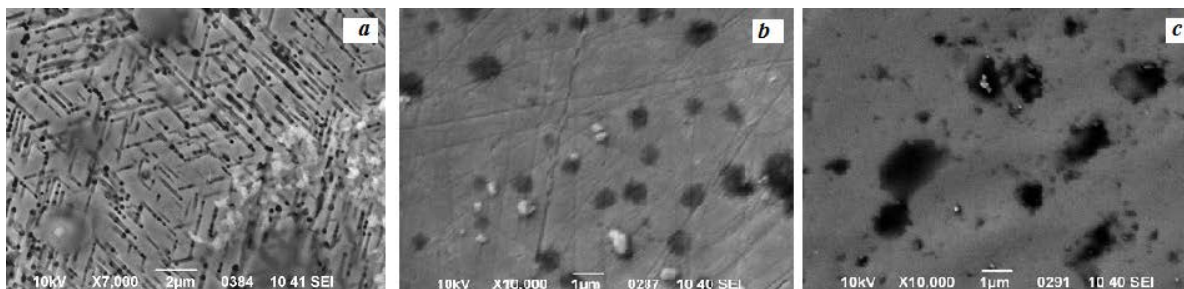


Рис. 1. Наноструктуры на поверхности полупроводников:

а) InP,  $j = 80 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t = 10 \text{ мин}$ ; б) GaAs,  $j = 60 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t = 15 \text{ мин}$ ; в) GaP,  $j = 100 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t = 5 \text{ мин}$

Эффекты порообразования наблюдались при травлении кристаллов n-типа проводимости в широких интервалах времени травления и при различных плотностях тока. При аналогичных условиях кристаллы p-типа травились без образования пор. В данном случае наблюдалось растравливание поверхности с образованием трещин и кластеров [2].

Компонентный состав электролитов, в которых становится возможным образование пор и нанокристаллитов, достаточно широк. Наиболее благоприятными являются травители на основе плавиковой, соляной, бромистой кислот. При использовании этих кислот удается получить упорядоченный ансамбль наноструктур на поверхности кристалла [3].

Во время травления кластеризация может не происходить или рост кластеров/наноструктур может прекращаться, если с повышением анодного потенциала возникают альтернативные электрохимические процессы, активизация которых не связана с требованием пространственной локализации фронта реакции: травление с полным или частичным растворением продуктов, образование сплошных неразстворимых пленок и т.д. [1 – 4].

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основной задачей исследователей является описание особенностей процесса электрохимического растворения кристалла с последующим образованием кластеров на его поверхности и в объеме.

Физические процессы происходят в сложных средах. Параметры среды можно рассматривать как некоторые реализации хао-

тических полей в пространстве и во времени [5]. Очевидным является невозможность решения динамических задач для различных параметров среды. Поэтому основным приоритетом становится разработка и создание модели порообразования, которая базируется на математическом аппарате случайных процессов и полей для реализации отдельных исследуемых процессов при рассмотрении статистических средних по всему спектру возможных реализаций.

Статистическое усреднение по всем реализациям делает поле средней концентрации пассивной примеси в случайном поле скоростей все более насыщенным, в то время как каждая его отдельная реализация за счет перемешивания областей с различной концентрацией стремится стать все более изрезанной в пространстве [6].

Таким образом, усреднение по параметрам позволяет характеризовать глобальные пространственно-временные масштабы областей [7]. Однако подобные приближения не могут дать представления о процессах, происходящих локально внутри области.

Примем образование кластера в точке области за единицу. Однако при этом имеет место расхождение частиц в пространстве и времени.

Процессы, происходящие с вероятностью единица, являются когерентными. В данном случае имеет место самоорганизация сложной динамической системы. Поэтому становится возможным выделение статистически устойчивых характеристик процессов системы, про-

являющих синергизм во взаимодействии и поведении ее элементов.

Перед учеными встает задача описания полной статистики, содержащей всю информацию о динамической системе. Однако на практике удается описать лишь некоторые простейшие статистические характеристики.

Для анализа когерентных явлений в простейших динамических системах используются основные идеи статистической топографии случайных процессов и полей [8].

Частица в поле случайных скоростей в простейшем случае описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка [5]:

$$\frac{d}{dt}r(t) = U(r, t), \quad r(t_0) = r_0 \quad (1),$$

где  $U(r, t) = u_0(r, t) + u(r, t)$ ,  $u_0(r, t)$  – детерминированные трехмерные поля скоростей (средний поток), а  $u(r, t)$  – случайная трехмерность.

Данная система уравнений также описывает динамику частицы в поле случайных внешних сил  $f(r, t)$ .

В простейшем случае динамика частицы при наличии линейного трения описывается системой дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{d}{dt}r(t) = v(t), \quad \frac{d}{dt}v(t) = -\lambda v(t) + f(r, t) \quad (2),$$

$$r(0) = r_0, \quad v(0) = v_0.$$

При отсутствии внешних возмущений и трения решение задачи также соответствует прямолинейному движению частицы:

$$r(t) = r_0 + v_0 t, \quad v(t) = v_0.$$

Для случая потенциального поля скоростей ( $\text{div } u(r, t) \neq 0$ ) частицы, равномерно расположенные в квадрате в начальный момент времени, в процессе временной эволюции образуют кластерные области (компактные области повышенной концентрации частиц, расположенные в большей степени в разреженных зонах) [6].

Однако лишь для небольшого числа конкретных динамических систем удается полу-

чить конечные результаты в общем виде. Более продуктивным оказывается использование асимптотического метода, основанного на разложении статистических характеристик решений динамических задач по малому параметру [9]. Такой параметр можно понимать как отношение времени корреляции случайного воздействия ко времени наблюдения или другим характерным временным масштабам задачи. При этом в ряде случаев масштабы можно выбирать не временные, а пространственные [10].

Формирование кластеров на одной из плоских границ прямоугольной области, покрытой квадратной сеткой, возможно в случае, когда между противоположными плоскими границами прикладывается потенциал. Зарождение вертикальных, обособленных кластеров наблюдается на начальном этапе электрохимического растворения кристалла, который можно рассматривать как случайное блуждание частиц в постоянном потенциальном поле нескольких запалов и закономерности локализации кластера на первоначальных запалах в условиях влияния потенциального поля, которое создано этими запалами, и полем самого кластера.

При этом на движение частицы влияет детерминированная и стохастическая составляющая. Детерминированный компонент определяет поле, созданное игольчатыми запалами, а стохастическая компонента движения частицы, приводит к случайным блужданиям по квадратной сетке. Вероятность перемещения в соседнее положение определяется через градиент потенциала в соответствующих окрестных точках, таким образом, что вероятность скачка в сторону состояния с более высоким потенциалом выше.

Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута верхняя граница или пока частица не достигнет до формирующегося кластера. Для этого необходимо, чтобы отношение числа точек кластера в радиусе  $R_{\text{хар}}$  к числу ближайших ячеек, имеющих общие вершины, было больше некоторой фиксированной величины  $\eta$  (коэффициента прилипания). От величины этого коэффициента зависит,

насколько глубоко частица проникнет вглубь кластера, а так же, какой окажется внутренняя структура кластера. Остановленная доля формирует кластерную структуру. Расстояние, на котором растущий кластер влияет на долю, определяется параметром  $R_{хар}$ . Все точки кластера, попавшие в окружность радиусом  $R_{хар}$ , вносят соответствующий вклад в статический потенциал, созданный для каждой ячейки ближайшей окрестности.

Очевидным является необходимость использования функционального систематического подхода для описания синергетических процессов, происходящих на поверхности полупроводника во время зарождения на его поверхности наноструктур и нанокластеров.

### ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены особенности образования кластеров на поверхности полупроводников группы АЗВ5 при электрохимической обработке. Механизм данного явления описан с точки зрения когерентных явлений в стохастических системах. Показана возможность разработки и создания модели кластерообразования, которая базируется на математическом аппарате случайных процессов и полей для реализации отдельных исследуемых процессов при рассмотрении статистических средних по всему спектру возможных реализаций.

### Список литературы:

1. Новиков Е. А. Функционалы и метод случайных сил в теории турбулентности // ЖЭТФ. – 1964. Т. 47, № 5. – С. 1919–1926.
2. Сычикова Я.А. Влияние состава электролита на величину порогового напряжения начала порообразования фосфида индия // Физическая инженерия поверхности. – 2010. – Т.8, №3. – С. 259 – 264.
3. Сичікова Я.О., Кідалов В.В., Балан О.С., Сукач Г.О. Тестування поверхні фосфіду індію // Журнал нанотехнологічної фізики. – 2010, №1. – С. 84 – 88.
4. Сичікова Я.О., Кідалов В.В., Сукач Г.О., Кірілаш О.І. Методика отримання та дослідження морфології поруватих шарів р-InP та р-GaAs // Електроніка та зв'язок. – 2010. – Т. 4, № 57. – С. 34 – 36.
5. Кляцкин В. И. Стохастические уравнения глазами физика. Основные положения, точные результаты и асимптотические приближения. – М.: Физматлит, 2001.
6. Кляцкин В., Гурарий Д. Когерентные явления в стохастических динамических системах // УФН. – 1999. Т. 169, № 2. – С. 171 – 207.
7. Nicolis G., Prigogin I. Exploring Complexity, an Introduction — N. Y.: W. H. Freeman and Company, 1989.
8. Isichenko M. B. Percolation, statistical topography, and transport in random media // Rev. Modern Phys. – 1992. V. 64, № 4. – P. 961 – 1043
9. Ареф Х. Развитие хаотической адвекции // Нелинейная динамика. – 2006. Т. 2, № 1. – С. 111 – 133.
10. Михайлов А. С., Упоров И. В. Критические явления в средах с разложением, распадом и диффузией // УФН. – 1984. Т. 144, № 3. – С. 79 – 112.

### ОТЗЫВ

на статью кандидата физико-математических наук, доцента Сычиковой Яны Александровны «Особенности формирования кластеров на поверхности полупроводниковых кристаллов группы АЗВ5»

Статья Сычиковой Я. А. «Особенности формирования кластеров на поверхности полупроводниковых кристаллов группы АЗВ5» посвящена технологии формирования кластеров на полупроводниковых пластинах. В работе рассмотрены особенности кластеризации на поверхности полупроводников группы АЗВ5 при электрохимической обработке. Механизм данного явления описан с точки зрения когерентных явлений в стохастических системах. Многообразие использованных методов и статистическая обработка результатов обеспечивают достоверность проведенных исследований.

Выводы соответствуют поставленной задаче исследования, которая заключалась в установлении природы видимой фотолюминесценции пористого фосфида индия. Автором показана возможность разработки и создания модели кластерообразования, которая базируется на математическом аппарате случайных процессов и полей для реализации отдельных исследуемых процессов при рассмотрении статистических средних по всему спектру возможных реализаций. Полученные результаты имеют огромное практическое значение.

Список библиографии содержит 10 источников, состоит из статей исследований ведущих специалистов в области нанотехнологии. Исследование автора соответствует последним достижениям науки.

Таким образом, статья написана научным языком, доказательна, приведенная аргументация и эмпирические данные не вызывают сомнений. В ней четко обозначен личный вклад автора в решение заявленной научной проблемы.

Статья рекомендуется к публикации в журнале «Вычислительные нанотехнологии».

Рецензент:

Глава ученого совета  
факультета физико-математического  
и технологического образования БГПУ,  
декан факультета ФМТО,  
кандидат педагогических наук, доцент

А.А. Малыхин