

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КЛАСТЕРОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ ГРУППЫ АЗВ5

Я. А. Сычикова

*Бердянский государственный педагогический университет,
г. Бердянск, Запорожская обл., Украина*

Поступила в редакцию 29.03.2015

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.

МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ КЛАСТЕРІВ НА ПОВЕРХНІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ ГРУПИ АЗВ5

Я. А. Сичікова

В роботі розглянуті особливості утворення кластерів на поверхні напівпровідників групи АЗВ5 при електрохімічній обробці. Механізм цього явища описаний з погляду когерентних явищ в стохастичних системах.

Ключові слова: напівпровідники, електрохімічне травлення, кластери, пори, стохастичні системи, когерентні явища.

MODEL CLUSTER FORMATION ON THE SURFACE OF SEMICONDUCTOR CRYSTALS OF THE GROUP АЗВ5

Y. A. Suchikova

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.

Keywords: 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 существенным 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 работе рассмотрены квантовые когерентные явления в наноструктурированных полупроводниках, показана возможность описания кластеризации с помощью статистических средних по всему спектру возможных реализаций.

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/см², 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 °С) перекисно-аммиачном растворе;
- 4) промывание в проточной деионизированной воде (удаление продуктов реакции предыдущей обработки);
- 5) обработка в горячей (90–100 °С) концентрированной азотной кислоте (удаление ионов металлов);
- 6) гидродинамическая обработка пластин бельчими 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 были получены наноструктуры (рис. 1), которые представляют собой поры, кластеры, трещины, текстуры, нанокристаллиты и т. д.

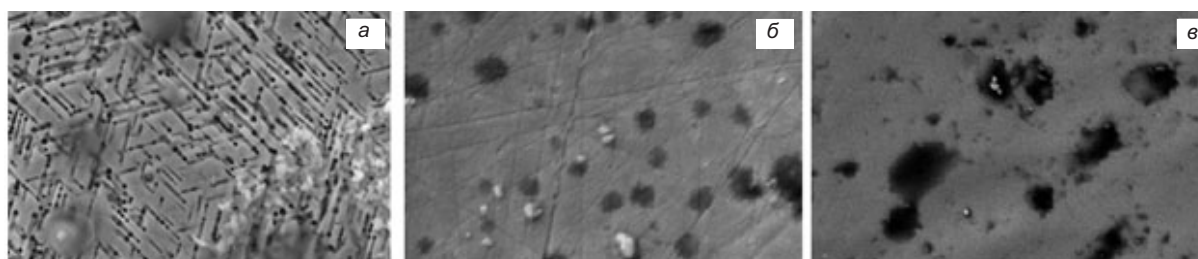


Рис. 1. Наноструктуры на поверхности полупроводников: *а* — InP, $j = 80$ мА/см², $t = 10$ мин; *б* — GaAs, $j = 60$ мА/см², $t = 15$ мин; *в* — GaP, $j = 100$ мА/см², $t = 5$ мин

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 нерастворимых пленок и т. д. [1–4].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основной задачей исследователей является создание модели 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 хаотических 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, проявляющих синергизм во взаимодействии и поведении ее элементов.

Перед учеными встает задача описания полной статистики, содержащей всю информацию о динамической системе. Однако на практике удастся 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]:

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

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 $f(r, t)$.

Для случая потенциального поля скоростей ($\operatorname{div} u(r, t) \neq 0$) 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 получить 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].

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков Е. А. Функционалы и метод случайных сил в теории турбулентности // ЖЭТФ. — 1964. — Т. 47, № 5. — С. 1919–1926.
2. Сычкова Я. А. Влияние состава электролита на величину порогового напряжения начала порообразования фосфида индия // Физическая инженерия поверхности. — 2010. — Т. 8, № 3. — С. 259–264.
3. Сичикова Я. О., Кидалов В. В., Балан О. С.,

Сукач Г. О. Тестування поверхні фосфіду індію // Журнал нано- і електронної фізики. — 2010. — № 1. — С. 84–88.

4. Сичикова Я. О., Кидалов В. В., Сукач Г. О., Кірілаш О. І. Методика отримання та дослідження морфології поруватих шарів p -InP та p -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 topology, and transport in random media // Rev. Modern Phys. — 1992. — Vol. 64, No. 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.

LITERATURA

1. Novikov E. A. Funkcionaly i metod sluchajnyh sil v teorii turbulentsnosti // ZhETF. — 1964. — Vol. 47, No. 5. — P. 1919–1926.
2. Sychikova Ya. A. Vliyanie sostava elektrolita na velichinu porogovogo napryazheniya nachala poroobrazovaniya fosfida indiya // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. — 2010. — Vol. 8, No. 3. — P. 259–264.
3. Sychikova Ya. O., Kidalov V. V., Balan O. S., Sukach G. O. Testuruvannya poverhni fosfidu indiyu // Zhurnal nano- i elektronoi fiziki. — 2010. — No. 1. — P. 84–88.
4. Sychikova Ya. O., Kidalov V. V., Sukach G. O., Kirilash O. I. Metodika otrimannya ta doslidzhennya morfologii poruvatih shariv p -InP ta p -GaAs // Elektronika ta zv'yazok. — 2010. — Vol. 4, No. 57. — P. 34–36.
5. Klyackin V. I. Stohasticheskie uravneniya glazami fizika. Osnovnye polozheniya, tochnye

- rezul'taty i asimptoticheskie priblizheniya. — M.: Fizmatlit, 2001.
6. Klyackin V., Gurarij D. Kogerentnye yavleniya v stohasticheskix dinamicheskix sistemah // UFN. — 1999. — Vol. 169, No. 2. — P. 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 topology, and transport in random media // Rev. Modern Phys. — 1992. — Vol. 64, No. 4. — P. 961–1043.
 9. Aref H. Razvitie haoticheskoy advekcii // Nelinejnaya dinamika. — 2006. — Vol. 2, No. 1. — P. 111–133.
 10. Mihajlov A. S., Uporov I. V. Kriticheskie yavleniya v sredah s razlozheniem, raspadom i difuziej // UFN. — 1984. — Vol. 144, No. 3. — P. 79–112.