

Рындин Евгений Адальбертович – Южный федеральный университет; e-mail: earyndin@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634361374; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; профессор.

Аль-Саман Амгад Али Хасан – email: amgadalsaman1989@gmail.com; аспирант.

Ryndin Evgeniy Adalbertovich – Southern Federal University; email: earyndin@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634361374; the department of electronic apparatuses design; dr. of eng. sc.; professor.

Al-Saman Amgad Ali Hasan – e-mail: amgadalsaman1989@gmail.com; postgraduate student.

УДК 51–74

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-94-104

М.Н. Григорьев, Н.К. Плуготаренко, Т.А. Бедная

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛЕГИРОВАННЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК КРЕМНИЙ – УГЛЕРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ*

Проведено моделирование процесса роста легированных кремний – углеродных пленок. В основу моделирования была положена модель образования структуры тонких пленок кремний - углеродных соединений фрактальной природы. Для моделирования исследуемых структур использовались: метод Монте-Карло, алгоритм Ванга–Ландау, диффузионно-лимитируемая модель Виттена-Сэндера, модель «кластер-кластерной» агрегации, метод Хошена-Копельмана для определения характеристик перколяционного кластера. Метод Монте – Карло применялся для реализации процесса случайного блуждания, необходимого для образования структуры полученных фракталов из кремний – углеродных соединений. В процессе моделирования также учитывался pH среды. Моделирование структуры проводилось в программной среде MatLab. Используя стандартные средства MatLab, был создан удобный интерфейс для ввода необходимых данных и отображения получаемой структуры, легированных кремний – углеродных пленок. С помощью созданной программы в MatLab были получены структуры с различной размерностью подложки, различным числом частиц в исходной матрице и различным числом частиц легирующего компонента. Основываясь на алгоритме Хошена-Копельмана, был определен момент возникновения перколяционного перехода и установлен порог протекания. Установлена зависимость структуры фрактальных кластеров и зависимость наступления перколяции от pH среды. Выявлено, что при одном и том же количестве частиц фрактальная размерность кластеров больше в идеальных условиях, чем у фрактальных структур полученных моделированием с учетом фактора pH. Определено, что концентрация легирующего компонента 0,2 мольных % достаточна для образования перколяционного кластера. Полученные с помощью моделирования данные можно использовать при проведении процессов легирования кремний – углеродных пленок.

Кремний – углеродные пленки; метод Монте–Карло; нанокмозиты; фрактальные кластеры.

M.N. Grigoryev, N.K. Plugotarenko, T.A. Bednaya

MODELING THE STRUCTURE OF THE SILICON-CARBON COMPOUNDS DOPED THIN FILMS

The simulation of the growth process of doped silicon-carbon films was described herein. Existing models of the structure of thin films of silicon-carbon compounds are considered. Modeling was based on a fractal clusters model of silicon-carbon compounds. Monte Carlo method, the algorithm Wang-Landau model, the diffusion-limited Witten-Sander model, the "cluster-cluster" aggregation mod-

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, Соглашение №14.575.21.0126 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57517X0126).

el, the Hoshen-Kopelman method for determining the percolation cluster characteristic have been used for modeling the reasech structures. The Monte Carlo method was used to implement a random walk process describing the structure of the obtained fractals of silicon-carbon compounds. pH of the medium was considered during the modeling. Modeling of the structure was carried out in the MatLab software environment. Convenient interface for input the necessary data and display the resulting structure of doped silicon-carbon films was created with using the standard MatLab tools. Structures with different substrate dimensions, a different number of particles in the initial matrix, and a different number of particles of the doping component was obtained with the help of the created program in MatLab. Moment of the percolation transition and the percolation threshold was determined by algorithm of Hoshen-Kopelman. The dependence of the structure of fractal clusters and the dependence of the onset of percolation on the pH of the medium are established. It is found that for the same number of particles, the cluster size is larger under ideal conditions than in fractal structures obtained by modeling with the pH factor in mind. It is determined that the concentration of the alloying component of 0.2 mol% is sufficient to form a percolation cluster. The data obtained with the help of modeling can be used for processes of doping of silicon-carbon films.

Silicon - carbon films; the Monte Carlo method; nanocomposites; fractal clusters.

Введение. Кремний – углеродные пленки являются весьма перспективным материалом для микро- и нанoeлектроники, они обладают стойкостью к химическим и температурным воздействиям, имеют высокую теплопроводность и твердость. Легируя кремний – углеродные пленки атомами металлов можно создавать наноконпозиты с заданными электрофизическими свойствами, оптическими, механическими. Концентрация атомов металлов в пленках по объему может достигать десятков процентов. Варьируя состав и концентрацию атомов металлов, можно задавать значения электропроводности в пленках в диапазоне 10^{-4} - 10^{14} Ом см [1, 2].

Одна из первых моделей металлсодержащего композита на основе кремний-углеродной плёнки, описывающая его структуру, принадлежит В. Дорфману [3]. Согласно этой модели при малой концентрации металл распределён в матрице в виде либо обособленных атомов, либо обособленных разупорядоченных сеток. При увеличении концентрации металла происходит соединение металлических сеток, появление проводящих каналов и металлической проводимости (первая структурная перколяция). Все три сетки соединены друг с другом слабыми химическими связями. При дальнейшем увеличении концентрации металла начинается разрушение кремний-углеродной матрицы и формируется аморфный металл, стабилизированный углеродом, а-Ме:С (вторая структурная перколяция) [4].

В работах [5–6] с помощью АСМ – исследований было установлено, что рост кремний – углеродных структур происходит в виде фрактальных кластеров в зависимости от концентрации легирующих добавок. Таким образом, общая модель структуры кремний – углеродных наноконпозитов основывается на представлении их в виде сетчатых структур, обладающих фрактальными свойствами.

Механизм формирования полимерных материалов, к которым относится кремний-углеродная структура на начальном этапе синтеза, определяется двумя взаимосвязанными процессами: химическим – это рост макромолекул полимера и физическим – самосборкой растущих цепей в сложные надмолекулярные структуры. В результате на подложке формируется определенным образом упорядоченный слой полимера прочно сорбированного на поверхность [7–9].

Цель исследования выявить концентрацию легирующей добавки, необходимую для получения перколяционного эффекта в кремний-углеродной пленке.

Методика моделирования. Для моделирования роста структуры кремний – углеродной матрицы использовались модель диффузионно-лимитируемой агрегации Виттена–Сэндера и модель RLCA («кластер – кластерная» агрегация, ограниченная химически) с учетом возможности вращения кластеров относительно

точки их соприкосновения и движения агрегата [10–11]. Механизм, реализующий модель Виттена–Сэндера предполагает наличие центра агрегации и свободной частицы, которая совершает броуновское движение из бесконечности и при столкновении с центром агрегации прилипает к нему. После чего из бесконечности начинает двигаться другая частица и при столкновении с первыми двумя прилипает к ним. Процесс повторяется многократно, в результате чего образуется фрактальный агрегат [12].

В основу моделирования был принят метод Монте-Карло [13–14] для реализации алгоритма Ванга–Ландау [15]. Этот алгоритм основан на том, что совершается случайное блуждание в пространстве энергий с вероятностями перехода, пропорциональными обратной плотности состояний $1/\Omega(E)$, получается равномерное посещение всех энергетических состояний, если подобрать вероятности перехода такими, что посещение всех энергетических состояний стало бы равномерным, можно получить изначально неизвестную плотность состояний $\Omega(E)$. Случайное блуждание есть случайный процесс, а именно последовательность так называемых случайных величин v_0, v_1, v_2, \dots . Каждое v_i – некоторая вершина, при этом $v_0 = 0$ и $P(v_{n+1} = v^*n) = 1/4$. То есть, находясь в вершине v_n в момент времени n , мы можем попасть в одну из четырех соседних вершин с одинаковыми вероятностями. Исследование случайного блуждания проводится не на всей плоскости, а в некоторой ограниченной подобласти [16].

Легирующие атомы металлов, которые находятся в структуре кремний – углеродных пленок могут образовывать перколяционный кластер. В работе поиск перколяционного кластера реализован методом Хошена-Копельмана [17, 18]. Алгоритм Хошена-Копельмана заключается в следующем: последовательно обходят все ячейки решетки по строкам, начиная с первой. Ячейка называется свободной, если в ней находится вытесняемая «жидкость», и занятой, если в ней находится вытесняющая «жидкость». Производится поиск и маркировка свободных ячеек. Необходимо ввести дополнительный массив «правильных» меток, k -й элемент этого массива будет равен k , если k -я метка – «правильная», и равен i ($i < k$), если все ячейки, помеченные номером k , на самом деле принадлежат кластеру с меткой i . Начинаем присваивать ячейкам кластерные метки, начиная с единицы. Для каждой свободной ячейки существует четыре возможных варианта [19].

Моделирование образования перколяционного кластера даёт возможность определить порог протекания, т.е. минимальную концентрацию, при которой наступает протекание [20].

Моделирование структур пленок проводилось в программной среде MatLab. В работе для моделирования использовалась квадратная четырехсвязная решетка, с количеством исходных частиц до 10^6 . Было задано определенное количество свободных узлов, которые случайно распределены по заданной ограниченной поверхности. Среди свободных достижимых узлов формировалось некоторое начальное множество. Для каждого из начальных узлов выделялось множество соседних (периметр множества) и те узлы, которые являлись достижимыми и не принадлежащими к какому-либо другому множеству, присоединялись кначальному. Затем выполнялось построение периметра для нового начального множества, и процесс повторялся до исчерпания свободных узлов или до момента достижения какого-либо узла из заданного множества. Каждая исходная частица была промаркирована как металлсодержащая или содержащая только полимерную основу. Соотношение таких частиц выбиралось исходя из экспериментальных возможностей. Также, для учета влияния химически агрессивной среды был задан pH среды в виде так называемых «мешающих» точек.

Входными данными для созданной программы являются: размер подложки $n \times n$, количество частиц диэлектрической матрицы, концентрация легирующих примесей (атомов металлов).

Блок схема программы показана на рис. 1.



Рис. 1. Блок схема программы моделирования структур пленок

Результаты моделирования. С помощью созданной программы моделирования исследовалось влияние размерности подложки, количества частиц в кремний – углеродной матрице и количества легирующих частиц на структуры получаемых пленок. На рис. 2 представлены результаты моделирования для разных концентраций легирующих добавок. На нем наблюдается увеличение количества металлосодержащих частиц в матрице с увеличением мольной доли.

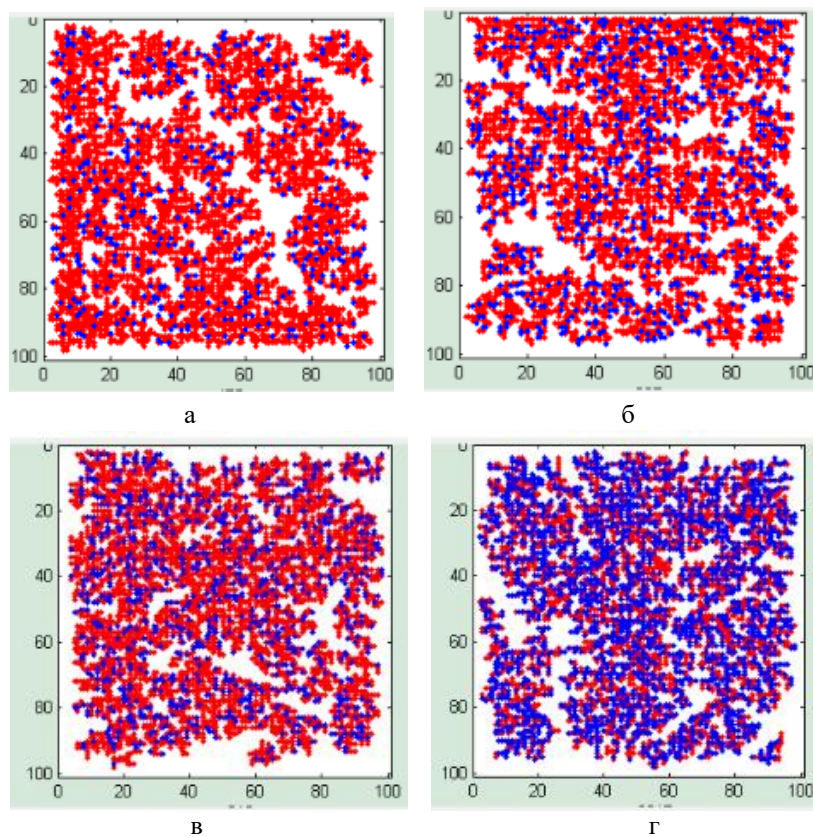


Рис. 2. Результаты моделирования для размерности подложки 100×100 , число частиц матрицы 7000, концентрация легирующей добавки: а – 0,1; б – 0,2; в – 0,3; г – 0,5

На рис. 3 представлены результаты моделирования для разного количества частиц кремний – углеродной матрицы. Очевидно что, с увеличением числа частиц, образующих матрицу происходит «зарастание» подложки.

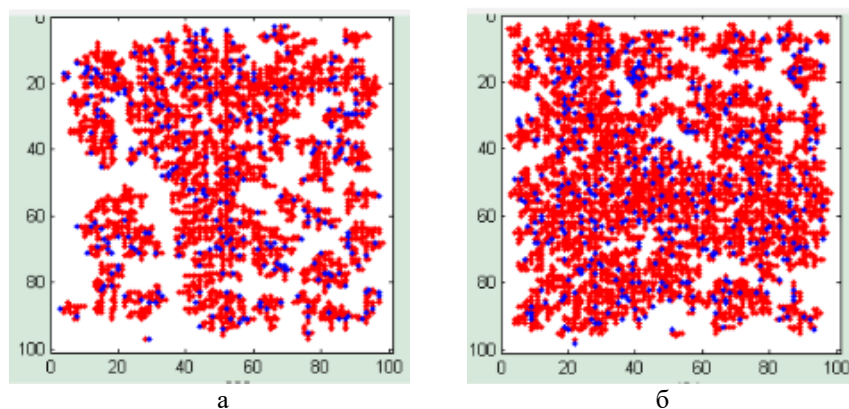


Рис. 3. Результаты моделирования для размерности подложки 100×100 , при концентрации легирующей добавки 0,1, число частиц матрицы: а – 4000; б – 6000

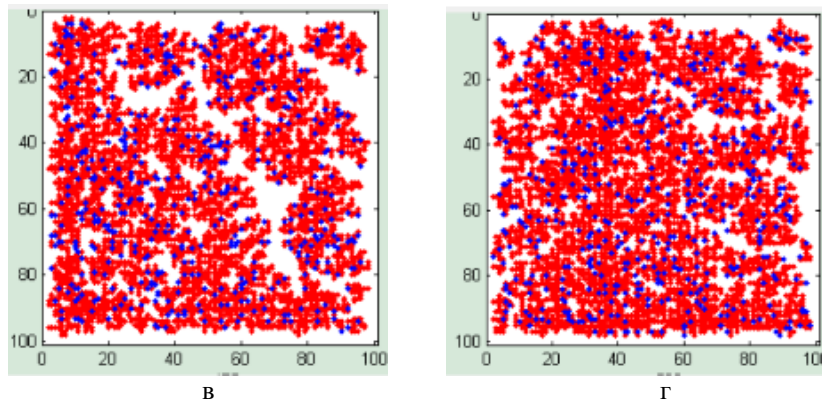


Рис. 3. Результаты моделирования для размерности подложки 100×100 , при концентрации легирующей добавки 0.1 , число частиц матрицы: $v - 7000$; $z - 8000$

На рис. 4 представлены результаты моделирования для разной размерности подложки. Данные результаты показывают, что при увеличении размерности подложки размывается зрительное восприятие структуры материала, она воспринимается как сплошная пленка, детали не просматриваются.

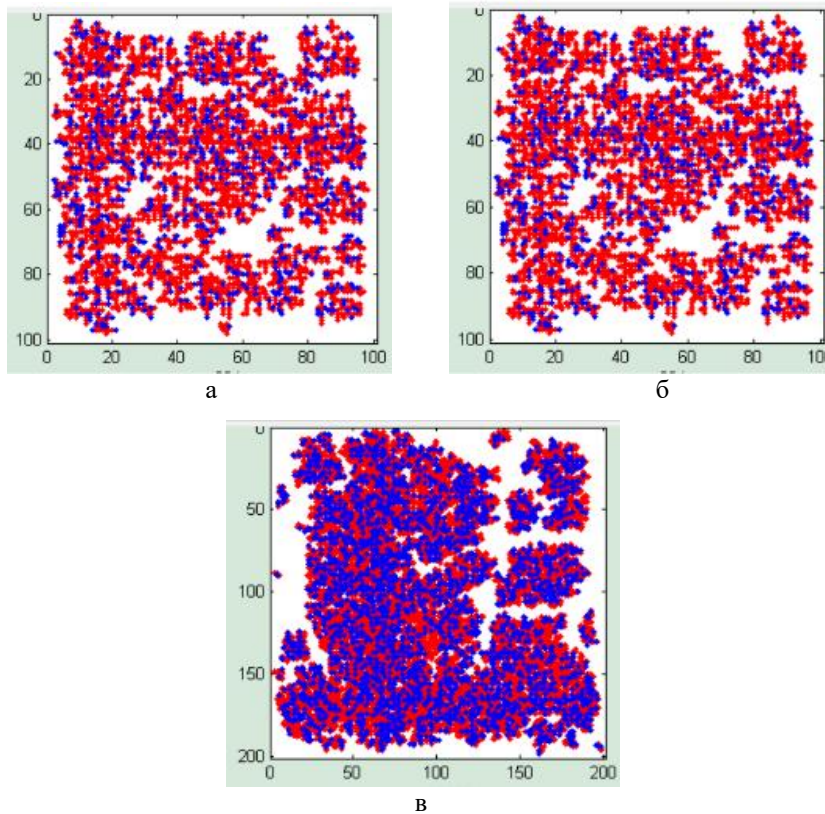


Рис. 4. Результаты моделирования для концентрации легирующей добавки 0.2 , размерность подложки: $а - 100 \times 100$; $б - 150 \times 150$; $в - 200 \times 200$

На рис. 5 приведены результаты моделирования структуры с учетом влияния рН среды и без учета. Полученные данные позволяют утверждать, что при учете рН среды кластеры образуются более компактно.

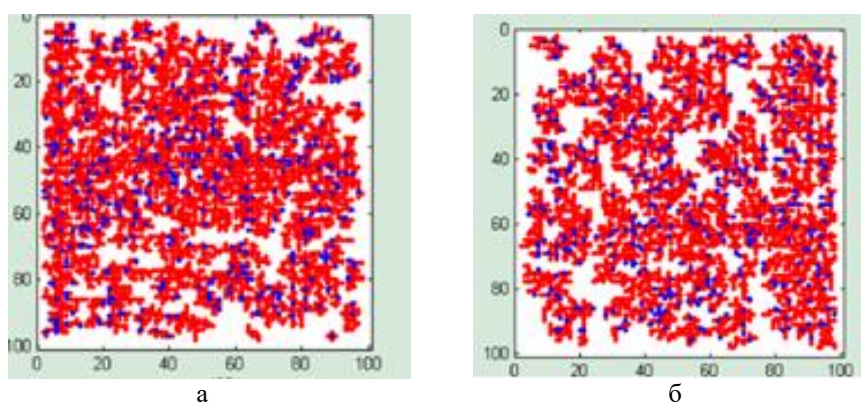


Рис. 5. Результаты моделирования структуры: а – с учетом и б – без учета влияния среды

В зависимости от рН среды происходит изменение структуры кластеров. При появлении частиц, учитывающих рН среды был проведен расчет фрактальной размерности. Выявлено, что при одном и том же количестве частиц размерность кластеров больше в идеальных условиях, чем у фрактальных структур полученных моделированием с учетом фактора рН. Полученная зависимость массовой фрактальной размерности от числа частиц матрицы с учетом фактора рН и без представлена на рис. 6

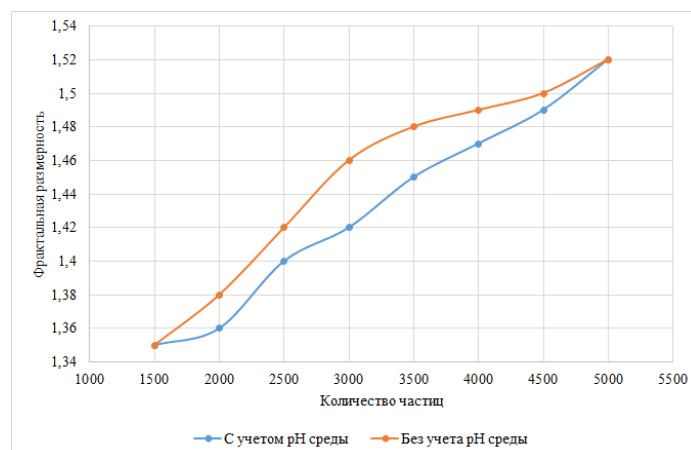


Рис. 6. Зависимость массовой фрактальной размерности от числа частиц матрицы

Результаты моделирование для четырехсвязной решетки размером $n \times n$, при $n = 100$, $n = 150$ и $n = 200$ представлены на рис. 7. Выявлено, что при количестве частиц, равном 2500 наступает порог перколяции. Это значит, что в этой точке перколяция наступает в 50 % случаев и более, независимо от площади области заполнения.

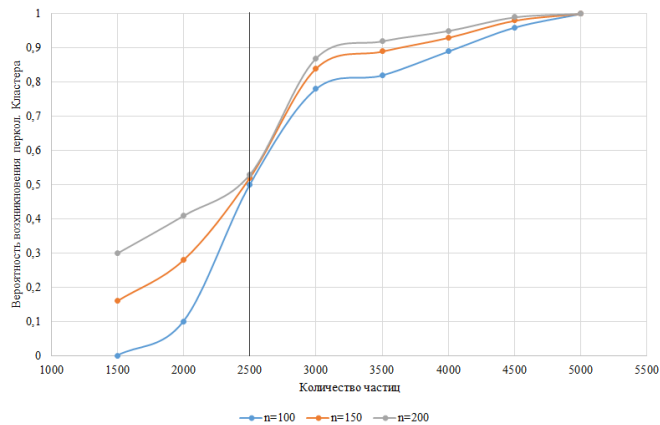


Рис. 7. Зависимость вероятности протекания w от u и количества частиц n и размера решетки $n \times n$

Также проведено моделирование с учетом трех различных концентраций кластеров ионов мешающих росту («мешающие точки»). Полученные данные позволяют говорить о зависимости наступления перколяции, т.е. вероятности образования кластера, от количества частиц при различной концентрации «мешающих точек». По данным эксперимента можно сделать вывод, что чем больше количество «мешающих точек», тем раньше наблюдается момент насыщения, т.е. значение со 100 % наступает при меньшем количестве частиц. После так называемого, момента насыщения вероятность образования перколяционного кластера не зависит от числа частиц и равна=1. Как видно из рис. 8, при количестве 2500 наблюдается точка перегиба независимо от числа мешающих росту ионов.

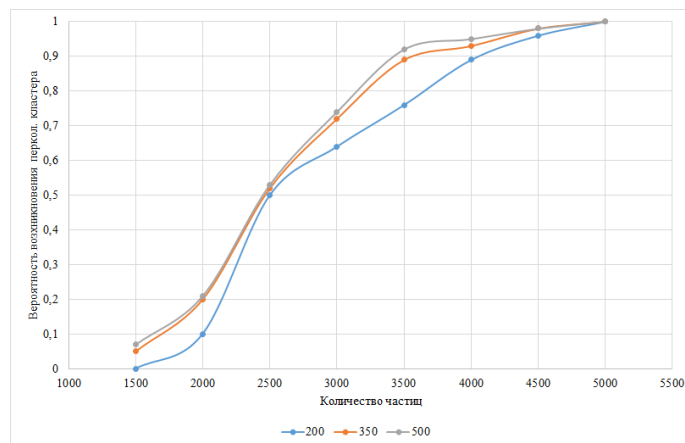


Рис. 8. Зависимость вероятности возникновения перколяции от концентрации «мешающих точек»

Также в ходе моделирования перколяционных кластеров на основе алгоритма Хошена-Копельмана стало известно, что порог протекания устанавливается при заполнении подложки на 85 %.

Заключение. На основе стандартных моделей и алгоритмов для определения фрактальных и перколяционных кластеров в программной среде MatLab была создана программа для исследования зависимости структуры легированных кремний

– углеродных пленок от размерности подложки, количества частиц в матрице и количества атомов металлов. Определено влияние входных данных на итоговую структуру пленок. Также было установлено, что pH среды значительно влияет на плотность структуры пленок, рост перколяционного кластера и фрактальную размерность. Определено, что концентрация легирующего компонента 0,2 мольных % достаточна для образования перколяционного кластера.

Программа позволяет наблюдать распределение легирующей добавки и образование перколяционного кластера. Данные результаты могут быть полезными для отработки технологии легирования кремний – углеродных пленок атомами металлов, а также разработке устройств на их основе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чаплыгин Ю.А.* Нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2004. – 448 с.
2. *Малинкович М.Д.* Структура поверхности нанокомпозитов на основе кремний–углеродной матрицы, выявленная методами сканирующей зондовой микроскопии // *Материалы электронной техники.* – 2010. – № 1. – С. 41-45.
3. *Dorfman V.F.* Diamond-like nanocomposites (DLN) // *Thin Solid Films.* – 1992. – Vol. 212. – P. 267-273.
4. *Ibrahim F., Wilson J.I.B., John P., Fitzgerald A.G., Cook A.* Structural analysis of amorphous hydrogenated silicon-carbon thin films from silane/propane mixtures // *Journal of Non-Crystalline Solids.* – 1994. – Vol. 175, No. 2-3. – P. 195-203.
5. *Музафаров А.М., Горбачевич О.Б., Ребров Е.А. и др.* Кремнийорганические дендримеры. Объемнорастущие полиаллилкарбосиланы // *Высокомолекулярные соединения.* – 1993. – Т. 35, № 11. – С. 1867-1872.
6. *Шкунов С.Л., Курлов В.Н.* Получение композиционных материалов на основе карбида кремния силицированием углеродных матриц // *Журнал технической физики.* – 2017. – Т. 87, № 12. – С. 1871-1878.
7. *Шишов М.А.* Самоорганизующиеся слои полианилина и их применение в электронике // *Молодой ученый.* – 2012. – №11. – С. 4-13.
8. *Бахмацкая А.И., Плуготаренко Н.К.* Исследование влияния технологических параметров на рост фрактальных структур нанокомпозитных материалов методами математического моделирования // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2015. – № 8 (169). – С. 175-184.
9. *Бахмацкая А.И., Плуготаренко Н.К.* Моделирование роста фрактальных структур нанокомпозитных материалов для сенсоров газов // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2014. – № 9 (158). – С. 118-124.
10. *Witten T.A., Sander L.M.* Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon // *Physical Review Letters.* – 1981, – Vol. 47 (19). – P. 1400-1403.
11. *Miyazima S., Stanley H.E., Hasegawa Y., Bunde A.A.* Generalized Diffusion-Limited Aggregation where Aggregate Sites Have a Finite Radical Time // *Journal of the Physical Society of Japan.* – 1988. – Vol. 57 – № 10. – P. 3376-3380.
12. *Moruzzi R.B., de Oliveira A.L., da Conceição F.T., Gregory J., Campos L.C.* Fractal dimension of large aggregates under different flocculation conditions // *Science of the Total Environment.* – 2017. – Vol. 609. – P. 807-814.
13. *Song Y., Zheng, Q.* Concepts and conflicts in nanoparticles reinforcement to polymers beyond hydrodynamics // *Progress in Materials Science.* – 2016. – Vol. 84. – P. 1-58.
14. *Shilov I.Y.* Molecular dynamics simulation of dielectric constant and cluster structure of liquid methanol: The role of cluster-cluster dipole correlations // *Molecular Physics.* – 2015. – Vol. 113. – № 6. – P. 570-576.
15. *Lyubartsev, A.P., Martsinovski A.A., Shevkunov S.V., Vorontsov-Velyaminov P.N.* New approach to Monte Carlo calculation of the free energy: Method of expanded ensembles // *J. Chem. Phys.* – 1992. – Vol. 96. – P. 1776-1783.
16. *Шефер Д., Кефер К.* Структура случайных силикатов: полимеры, коллоиды и пористые твердые тела // *Сб. Фракталы в физике.* – М.: Мир, 2008. – С. 62-71.

17. Deng Y., Blöte H.W.J. Monte Carlo study of the site-percolation model in two and three dimensions // *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. – 2005. – Vol. 72, No. 1. – N.A. 016126.
18. Tiggemann D. Simulation of percolation on massively-parallel computers // *International Journal of Modern Physics C*. – 2001. – Vol. 12, No. 6. – P. 871-878.
19. Поздеев Е.В., Воронова Л.И. Моделирование эффекта перколяции методом многократной маркировки кластеров // *Международный журнал: Программные продукты и системы*. – 2011. – № 4. – С. 75-79.
20. Shojaee S.A., Wang Y.Q., Mehner A., Lucca D.A. Microstructural evolution of ion-irradiated sol-gel-derived thin films // *Journal of Materials Science*. – 2017. – Vol. 52, No. 20. – P. 12109-12120.

REFERENCES

1. Chaplygin Yu.A. *Nanotekhnologii v ehlektronike [Nanotechnology in electronics]*. Moscow: Tekhnosfera, 2004, 448 p.
2. Malinkovich M.D. Struktura poverhnosti nanokompozitov na osnove kremniy-uglerodnoy matricy, vyyavlenaya metodami skaniruyushchey zondovoy mikroskopii [Surface structure of nanocomposites based on silicon-carbon matrix revealed by scanning probe microscopy], *Materialy ehlektronnoy tekhniki [Materials of electronic technology]*, 2010, No. 1, pp. 41-45.
3. Dorfman V.F. Diamond-like nanocomposites (DLN), *Thin Solid Films*, 1992, Vol. 212, pp. 267-273.
4. Ibrahim F., Wilson J.I.B., John P., Fitzgerald A.G., Cook A. Structural analysis of amorphous hydrogenated silicon-carbon thin films from silane/propane mixtures, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1994, Vol. 175, No. 2-3, pp. 195-203.
5. Muzafarov A.M., Gorbacevich O.B., Rebrov E.A. i dr. Kremniyorganicheskie dendrimery. Ob'emnorastushchie poliallilkarbosilany [Organosilicon dendrimers. Voluminous polyallylcarbosilanes], *Vysokomolekulyarnye soedineniya [High molecular weight compounds]*, 1993, Vol. 35, No. 11, pp. 1867-1872.
6. Shikunov S.L., Kurlov V.N. Poluchenie kompozicionnykh materialov na osnove karbida kremniya silicirovaniem uglerodnykh matric [Obtaining composite materials based on silicon carbide by carbon matrix silencing], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of technical physics]*, 2017, Vol. 87, No. 12, pp. 1871-1878.
7. Shishov M.A. Samoorganizuyushchiesya sloi polianilina i ikh primeneniye v ehlektronike [Self-organizing layers of polyaniline and their application in electronics], *Molodoy uchenyy [Young scientist]*, 2012, No. 11, pp. 4-13.
8. Bakhmatskaya A.I., Plugotarenko N.K. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh parametrov na rost fraktal'nykh struktur nanokompozitnykh materialov metodami matematicheskogo modelirovaniya [Investigation of the influence of technological parameters on the growth of fractal structures of nanocomposite materials by methods of mathematical modeling], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFU. Technical science]*, 2015, No. 8 (169), pp. 175-184.
9. Bakhmatskaya A.I., Plugotarenko N.K. Modelirovaniye rosta fraktal'nykh struktur nanokompozitnykh materialov dlya sensorov gazov [Modeling the growth of fractal structures of nanocomposite materials for gas sensors], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFU. Technical science]*, 2014, No. 9 (158), pp. 118-124.
10. Witten T.A., Sander L.M. Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon, *Physical Review Letters*, 1981, Vol. 47 (19), pp. 1400-1403.
11. Miyazima S., Stanley H.E., Hasegawa Y., Bunde A.A. Generalized Diffusion-Limited Aggregation where Aggregate Sites Have a Finite Radical Time, *Journal of the Physical Society of Japan*, 1988, Vol. 57, No. 10, pp. 3376-3380.
12. Moruzzi R.B., de Oliveira A.L., da Conceição F.T., Gregory J., Campos L.C. Fractal dimension of large aggregates under different flocculation conditions, *Science of the Total Environment*, 2017, Vol. 609, pp. 807-814.
13. Song Y., Zheng, Q. Concepts and conflicts in nanoparticles reinforcement to polymers beyond hydrodynamics, *Progress in Materials Science*, 2016, Vol. 84, pp. 1-58.
14. Shilov I.Y. Molecular dynamics simulation of dielectric constant and cluster structure of liquid methanol: The role of cluster-cluster dipole correlations, *Molecular Physics*, 2015, Vol. 113, No. 6, pp. 570-576.

15. Lyubartsev, A.P., Martsinovski A.A., Shevkunov S.V., Vorontsov-Velyaminov P.N. New approach to Monte Carlo calculation of the free energy: Method of expanded ensembles, *J. Chem. Phys.*, 1992, Vol. 96, pp. 1776-1783.
16. Shefer D., Kefer K. Структура случайных силикатов: полимеры, коллоиды и пористые твердые тела [Structure of random silicates: polymers, colloids and porous solids], *Sb. Fraktaly v fizike* [Fractals in physics]. Moscow: Mir, 2008, pp. 62-71.
17. Deng Y., Blöte H.W.J. Monte Carlo study of the site-percolation model in two and three dimensions, *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, Vol. 72, No. 1, N.A. 016126.
18. Tiggemann D. Simulation of percolation on massively-parallel computers, *International Journal of Modern Physics C*, 2001, Vol. 12, No. 6, pp. 871-878.
19. Pozdeev E.V, Voronova L.I. Modelirovanie effekta perkolyatsii metodom mnogokratnoy markirovki klasterov [Modeling of the percolation effect by the method of multiple marking of clusters], *Mezhdunarodnyy zhurnal: Programmye produkty i sistemy* [International Journal: Software products and systems], 2011, No. 4, pp. 75-79.
20. Shojaee S.A., Wang Y.Q., Mehner A., Lucca D.A. Microstructural evolution of ion-irradiated sol-gel-derived thin films, *Journal of Materials Science*, 2017, Vol. 52, No. 20, pp. 12109-12120.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

Григорьев Михаил Николаевич – АО «ТНИИС»; e-mail: gregoryevmikhail@mail.ru; 347913, г. Таганрог, ул. Седова, 3; инженер.

Плуготаренко Нина Константиновна – Южный федеральный университет; e-mail: plugotarenkonk@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел. 88634371635; к.т.н.; доцент; зав. кафедрой техносферной безопасности и химии.

Бедная Татьяна Алексеевна – Политехнический институт (филиал) Донского государственного технического университета в городе Таганроге; e-mail: bednayat@mail.ru; 347904, Таганрог, ул. Петровская, 109а; тел.: +79289561532; доцент.

Grigoryev Mikhail Nikolaevich – АО «ТНИИС»; e-mail: gregoryevmikhail@mail.ru; 3, Sedova street, Taganrog, 347913, Russia; engineer.

Plugotarenko Nina Konstantinovna – Southern Federal University; e-mail: plugotarenkonk@sfedu.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371635; cand. of eng. sc.; head of the department of technosphere security and chemistry.

Bednaya Tatiana Alekseevna – Polytechnic Institute (branch) of the Don State Technical University in Taganrog; e-mail: bednayat@mail.ru; 109 a, Petrovskaya street, 347904, Russia; phone: +79289561532; associate professor.