УДК 539.2

МИГРАЦИЯ ПРИМЕСЕЙ В ДВУМЕРНОЙ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОТЯЖЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

А. С. Долгов, Ю. Л. Жабчик,
Национальный Аэрокосмический Университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

Поступила в редакцию 3. 02. 2014

Рассматриваются закономерности миграции примесных атомов в двумерной структуре с гексагональной симметрией. В условиях наличия протяженных искажений для варианта Hollow-позиционирования субъектов миграции записываются уравнения кинетики перескоков мигрирующих атомов и изучаются свойства решений этих уравнений. Находится изменение главных моментов функций распределения частиц в процессе эволюции первоначального распределения. Показывается, что линейная неоднородность параметров структуры, обусловленная неоднородным нагревом, сохраняет форму зависимости среднего квадрата смещений от времени, характерную для чисто диффузионного процесса. Однако, искажение деформационной природы может существенно модифицировать названную зависимость, приближая рассматриваемый процесс к свойствам аномальной диффузии. Оба вида воздействия могут рассматриваться как средство перестроек распределений примесных атомов и, следовательно, соответствующего изменения характеристик объекта.

Ключевые слова: графен, примеси, миграция, производящая функция, неоднородность.

МІГРАЦІЯ ДОМІШОК В ДВОВИМІРНІЙ ГЕКСАГОНАЛЬНІЙ СТРУКТУРІ ПРИ НАЯВНОСТІ ПРОТЯЖНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ

А. С. Долгов, Ю. Л. Жабчик

Розглядаються закономірності міграції домішкових атомів в двовимірній структурі з гексагональною симетрією. В умовах наявності протяжних неоднородностей для варіанту Hollow-позиціонування суб'єктів міграції записуються рівняння кінетики перескоків мігруючих атомів і вивчаються властивості рішень цих рівнянь. Знаходиться зміна головних моментів функцій розподілення часток в процесі еволюції первісного розподілення. Показується, що лінійна неоднорідність параметрів структури, обумовлена неоднорідним нагрівом, зберігає форму залежності середнього квадрата зміщень від часу, характерну для чисто дифузійного процесу. Однак, неоднорідність деформаційної природи може істотно модифікувати названу залежність, наближаючи процес, що розглядається, до властивостей аномальної дифузії. Обидва види впливу можуть розглядатися як засіб перебудов розподілень домішкових атомів і, отже, відповідної зміни характеристик об'єкта.

Ключові слова: графен, домішки, міграція, генеруючи функція, неоднорідність.

IMPURITIES MIGRATION IN TWO-DIMENSIONAL HEXAGONAL STRUCTURE WITH EXTENSIVE DISTORTIONS

A. S. Dolgov, Yu. L. Zhabchyk

Regularities of impurity atoms migration in two-dimensional structure with hexagonal symmetry are considered. On conditions that extensive distortions exist the kinetics equations of migrating atoms' jumps for version of migration subjects' Hollow-positioning are written and characteristics of these equations solutions are studied. The change of the main moments of functions for particles distribution in the course of evolution of initial distribution is found. There is shown that linear irregularity of structure parameters, which is caused by non-uniform heating, saves a form of dependence of shifts mean square on time, which is characteristic for diffusive process. However, distortion of the deformation nature can significantly modify the called dependence by means of considered process approaching to properties of abnormal diffusion. Both types of influence can be considered as means of restructuring of impurity atoms' distributions and therefore as corresponding change of object characteristics.

Keywords: graphene, impurities, migration, generating function, distortion.

ВВЕДЕНИЕ

Миграция атомов в твердом теле и по его поверхности — важная составляющая большого числа явлений более общего вида, существенно влияющая на наблюдаемые свойства как всего образца, так и его поверхности [1, 2].

Ясно, что механизм миграции обусловлен особенностями кристаллической структуры образца. В то же время, ряд исследований переноса атомов по поверхности, ориентированных на отыскание макрохарактеристик процессов, оставляет вне обсуждения микроскопические особенности картины миграции, полагая достаточным использование некоторых осредненных характеристик явлений.

Во многих случаях такой подход обеспечивает потребности трактовок важных особенностей процессов. С другой стороны, игнорирование или искажение микроскопической структуры миграционных процессов оставляет ощущение незавершенности анализа, чреватого утратой существенных сторон процессов.

Одним из ярких, хотя и косвенных свидетельств, в пользу высказанного элементарного соображения является открытие графена [3, 4], что стимулировало появление большого числа работ по изучению как самого графена, так и родственных объектов (например, [5]) и, в качестве побочного эффекта, сформировало обостренный интерес к двумерным гексагональным структурам.

К таковым относится не только графен как таковой, но и поверхности трехмерных гексагональных кристаллов, «правильно» ориентированных относительно кристаллографических плоскостей, и моноатомные поверхностные покрытия некоторых видов (свойства графитовых пленок на поверхностях других материалов изучались задолго до обнаружения графена ([6] и др.)).

Серьезного внимания, в частности, требует вопрос о существовании и особенностях примесей на поверхности. Об актуальности такой проблемы свидетельствует, например, экспериментально зафиксированное значительное изменение наблюдаемых характеристик графена при весьма умеренном уровне примесного загрязнения [7—9].

Появилось немалое число теоретических работ, где изучается эффект адсорбции примесей на графене (например, [10, 11]), а также новое значение приобрели некоторые более ранние разработки, относящиеся либо применимые к углеродным наноструктурам [12, 13].

Не вызывает сомнения, что роль наличия примесей в тех или иных проявлениях связана не только с общим количеством дефектов, но и с их пространственным распределением, как в макроскопических масштабах, так и на уровне микрокорреляций.

Тем самым возникает потребность анализа закономерностей перераспределения атомов примеси по поверхности структуры. Эффект миграции предопределяется равноправием возможных позиций примесных атомов, что в объектах с совершенной структурой приобретает особое значение.

Как установлено [14—15], строгий учет геометрии размещения дефектов относительно гексагональной сетки определяет ряд особенностей общей картины миграции не только на микроскопическом, но и на макроскопическом уровне и задает несколько вариантов диффузионного процесса, связанных с характером позиционирования атомов примеси относительно узлов матрицы.

В настоящей работе на основе схемы микроперескоков рассматривается миграция в структуре с протяженными искажениями, которые могут быть созданы макроскопическими воздействиями различной природы.

Проводимые построения могут быть отнесены к разным гексагональным объектам. При этом, разумеется, обсуждаемые поверхностные эффекты приобретают наибольшее значение для наноструктур малых размеров.

Графен, в этом смысле, — эталонная структура. В постановочном плане работа сближается с направлением исследований авторов недавних работ [16, 17].

СХЕМА АНАЛИЗА

К изучению принят вариант миграции примесных атомов, когда номинальные позиции примесных атомов связываются с центрами гексагонов структуры.

Разумеется, это не единственный способ размещения, согласующийся с особенностями гексагональной симметрии, но, по-видимому, наиболее простой, причем общее число разрешенных позиций здесь минимально.

Миграцию по набору таких позиций можно квалифицировать как «ячеечную» (также употребляется термин Hollow-позиция).

Целью расчетов является предсказание эволюций распределения атомов в данной структуре.

Ограничиваемся случаем невысокой плотности примесной компоненты, что позволяет исключить из обсуждения взаимодействие между субъектами миграции.

Положение каждой позиции задается двумя целыми числами m, n, причем направление «m» нормально сторонам шестиугольников, а направление «n» к нему ортогонально.

Перескоки в соседнюю позицию (другое не обсуждается) соответствуют либо изменению на единицу каждого из двух индексов, либо сдвигу одного «m» на две единицы.

Макроскопические неоднородности связаны с протяженными и достаточно медленными изменениями вероятностей перескоков в пространстве.

Эти пространственные зависимости считаются линейными, что охватывает хотя бы приблизительно потребности анализа широкого круга реальных ситуаций, причем в рамках предположения о линейном изменении возможны неидентичные варианты уравнений и поведения миграционной компоненты, рассмотренные ниже особо.

Уравнения миграции содержат величины φ_{mn} — вероятности заполнения соответствующих позиций. Используемая ниже техника построений содержит операции с функциями вида (производящие функции).

$$G(s_1, s_2, t) \equiv \sum_{m,n} \varphi_{mn} e^{i(ms_1 + ns_2)}. \qquad (1)$$

Отыскание явного вида таких функций позволяет достаточно простыми операциями возвратиться к точечным вероятностям φ и, что не менее важно, дает возможность непосредственно определить макроскопические характеристики перераспределения частиц (моменты функции распределения) по правилам

$$\overline{m} = -i \frac{\partial G}{\partial s_1}(0, 0, t), \qquad (2)$$

$$\overline{n} = -i \frac{\partial G}{\partial s_2}(0, 0, t), \qquad (3)$$

$$\overline{m^2} = -i \frac{\partial^2 G}{\partial s_1^2}(0, 0, t) \qquad (4)$$

и т. д. Ввиду того, что согласно (2—4) определение средних характеристик предполагает процедуры в близкой окрестности значений $s_1 = 0$, $s_2 = 0$, использование асимптотических форм G достаточно для точного определения указанных величин.

Техника анализа близка к той, что применялась [14—15] для изучения миграции в неискаженной структуре.

НЕОДНОРОДНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ

Если в рассматриваемой области температура изменяется только в направлении «m», то вероятность перескока в расчете на единицу времени аппроксимируется выражением

$$\omega(m, n) = \omega_0 + \alpha m, \quad \alpha \ll \omega_0. \qquad (5)$$

Форма (5) вводит медленное пространственное изменение индивидуальной подвижности без изменения свойств матрицы. Уравнения кинетики миграции при этом таковы

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{mn}}{dt} &= \left(\omega_0 + \alpha(m-2)\right)\varphi_{m-2,n} + \\ &+ \left(\omega_0 + \alpha(m+2)\right)\varphi_{m+2,n} + \\ &+ \left(\omega_0 + \alpha(m-1)\right)\left(\varphi_{m-1,n-1} + \varphi_{m-1,n+1}\right) + \\ &+ \left(\omega_0 + \alpha(m+1)\right)\left(\varphi_{m+1,n-1} + \varphi_{m+1,n+1}\right) - \\ &- 6\left(\omega_0 + \alpha m\right)\varphi_{mn}. \end{aligned} \qquad (6)$$

Умножая каждое из равенств (6) на $expi(ms_1 + ns_2)$ и суммируя, получаем уравнение для функции G (1)

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \omega_0 f - iaf\,\frac{\partial G}{\partial s_1}, \tag{7}$$

причем

$$f\left(s_1, s_2\right) = 4\cos^2 s_1 + 4\cos s_1 \cos s_2 - 8\,. \tag{8}$$

Уравнению (7) удовлетворяет выражение

$$G = e^{-i\frac{\omega_0}{\alpha}s_1} R\left(u + i\alpha t\right), \tag{9}$$

где R — символ произвольной дифференцируемой функции

$$u \equiv -\int^{s_1} \frac{ds_1}{f\left(s_1, s_2\right)}\,. \tag{10}$$

Функция R должна быть такой, чтобы удовлетворялось начальное условие для G. Приняв для определенности, что в начальный момент частица локализуется в ячейке (0,0), получаем требование

$$R\left(u\right) = e^{i\frac{\omega_0}{\alpha}s_1}. \tag{11}$$

Упростить выражение для переменной u (10) не удается, что, в свою очередь, не позволяет записать точное выражение для R и G (9, 11). Однако, как указывалось выше, для определения средних характеристик можно воспользоваться выражениями для u, R редуцированными к виду, достаточному для выполнения операций вида (2—4).

Интересуясь величинами $\overline{m}$, $\overline{m^2}$ и т. д., следует представить функцию $f(s)$ в виде, справедливом для малых значений s_1. При этом величину s_2 нет необходимости отличать от нуля. С учетом требования (11) получается

$$G = \exp\left(-\frac{6\omega_0 s_1^2 t}{1 - 6i\alpha s_1 t}\right). \tag{12}$$

Выражение (12) обращается в единицу, как при $t = 0$, что соответствует строгой локализации в узле (0, 0), так и для произвольных t при $s_1 \to 0$, что согласно определению (1) есть отражение неизменности числа частиц во всем пространстве. Применяя операцию (2), находим, что $\overline{m} = 0$.

Это значит, что линейное изменение вероятностей перескоков не разрушает баланс общего числа переходов в двух направлениях («вперед» и «назад»).

Средний квадрат смещения — главная характеристика хаотического расползания вдоль направления «m» — в соответствии с правилом (4) оказывается таким

$$\overline{m^2} = 12\omega_0 t,$$

что не зависит от α и, значит, не отличается от такой же величины в отсутствие искажения. Однако, величина

$$\overline{m^3} = i\frac{\partial^3 G}{\partial s_1^3}\left(0, 0, t\right) = 216\omega_0 \alpha t^2,$$

прямо следует масштабу искажения. Отличие $\overline{m^3}$ от нуля свидетельствует о нарастающей со временем асимметрии распределения, соответствующей преобладанию уровней заполнения в зоне больших положительных значений m над такими же величинами в удаленной отрицательной области.

Для отыскания средних характеристик диффузионного распределения, связанных с ориентацией в направлении «n», следует воспользоваться редуцированными формами выражения (8), где не требуется отличать от нуля уже s_1.

После соответствующих выкладок получается

$$G = \exp\left(-2\omega_0 s_2^2 t\right). \tag{13}$$

Выражение (13) обладает теми же предельными характеристиками, что оговорены выше в отношении формулы (12). Отсутствие зависимости от α свидетельствует об обособлении закономерностей диффузионного перераспределения для двух взаимноортогональных направлений.

Нетрудно установить, что

$$\overline{n} = 0,\ \overline{n^2} = 4\omega_0 t,\ \overline{n^3} = 0, \ldots$$

Отличие значения $\overline{n^2}$ от величины $\overline{m^2}$ связано с различием ступеней индексации в двух направлениях: тройное различие записанных величин соответствует макроскопическому равноправию направлений.

ДЕФОРМАЦИОННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ

При деформациях разных видов изменяются удаления между равновесными позициями мигрирующих атомов, и происходит соответствующая модификация формы потенциального рельефа поверхности.

Таким образом, искажения вероятностей перескоков связываются с межпозиционными промежутками, а не с самими позициями, как имеет место при неоднородном температурном воздействии.

Впрочем, если принять во внимание тепловое расширение, то и температурная неоднородность должна включать в себя эффект межпозиционных искажений как поправочный. Уравнения кинетики перескоков при линейной (линеаризованной) неоднородности таковы

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi_{mn}}{dt} = \omega_0\big(&\varphi_{m-2,n}+\varphi_{m+2,n}+\varphi_{m-1,n-1}+\varphi_{m-1,n+1}+\\ &+\varphi_{m+1,n-1}+\varphi_{m+1,n+1}-6\varphi_{mn}\big)+\\ &+\alpha(m-1)\left(\varphi_{m-2,n}-\varphi_{mn}\right)+\\ &+\alpha(m+1)\left(\varphi_{m+2,n}-\varphi_{mn}\right)+\\ &+\alpha\left(m-\tfrac{1}{2}\right)\left(\varphi_{m-1,n-1}+\varphi_{m-1,n+1}-2\varphi_{mn}\right)+\\ &+\alpha\left(m+\tfrac{1}{2}\right)\left(\varphi_{m+1,n-1}+\varphi_{m+1,n+1}-2\varphi_{mn}\right).\end{aligned} \tag{14}$$

Математическим эквивалентом неограниченной совокупности уравнений (14) является соотношение

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \omega_0 fG - i\alpha\left(\frac{1}{2}\frac{\partial f}{\partial s_1}G + f\frac{\partial G}{\partial s_1}\right). \tag{15}$$

Общая форма решения уравнения (15) такова

$$G = e^{-i\frac{\omega_0}{\alpha}s_1} f^{-\frac{1}{2}}\left(s_1,s_2\right)R\left(u+i\alpha t\right), \tag{16}$$

где смысл функции R и выражений для f и обозначены выше (8—10). Упрощенная форма (16), сохраняющая возможность точного вычисления средних по «m» характеристик, имеет вид

$$G = \frac{e^{-\frac{6\omega_0 s_1^2 t}{1-6i\alpha s_1 t}}}{1-6i\alpha s_1 t}. \tag{17}$$

Применяя к выражению (17) операции вида (2, 4), получаем

$$\overline{m} = 6\alpha t, \tag{18}$$

$$\overline{m^2} = 12\omega_0 t + 72\alpha^2 t^2. \tag{19}$$

Выражения (18—19) определяют качественное отличие случая деформационного искажения от варианта температурной неоднородности. Согласно (18) средняя координата «центр тяжести» распределения равномерно смещается в сторону возрастания эффективной частоты перескоков. Разумеется, при реальных масштабах внешнего деформационного воздействия скорость дрейфа не может быть высокой.

Преобладающим фактором остается ненаправленное хаотическое расползание, количественная мера которого (19) представлена двумя слагаемыми, где первое не отличается от указанного в предшествующем пункте, а второе соответствует усилению интегрального эффекта в результате увеличения интенсивности перескоков в области больших положительных значений m. Роль второго слагаемого (19) растет со временем.

Вследствие того, что линейная аппроксимация вероятностей перескоков может быть использована на участках пространства, общая длина которых в поузельном исчислении заведомо уступает отношению констант ω_0/α, возникает временное ограничение применимости формул (18, 19)

$$t \ll \frac{\omega_0}{\alpha^2},$$

что приблизительно соответствует требованию малости изменения частоты перескоков на участке дрейфа центра тяжести диффузионного распределения.

Заметим, что в последние годы внимание ряда исследователей привлекают усложненные формы кинетических процессов, квалифицируемые как «субдиффузия», «квазидиффузия», «аномальная диффузия», «супердиффузия» ([18—20] и др).

Одним из отличительных признаков этих вариантов является нарушение диффузионного правила

$$\overline{x^2} \sim t.$$

Как видим, в рассматриваемом случае эта зависимость также нарушена (19). Таким образом, обсуждаемый вариант миграционных процессов, существенно отличный от механизмов указанных форм диффузии, тем не менее, обнаруживает признаки сходства с последними. Кроме того, можно видеть, что искажение матрицы влечет за собой проявления, сходные с тем, что обусловлено взаимодействием между субъектами миграции [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное рассмотрение выявляет влияние простейших форм внешних воздействий на особенности миграции примесей в двумерной гексагональной структуре. Показано, что в определенных случаях (линейная температурная неоднородность) влияние искажений, даже достаточно сильных, слабо изменяет общую картину диффузионного распределения, сохраняя главные моменты функции распределения.

Деформационное искажение структуры сопоставимого масштаба приводит к более значительным изменениям, продуцируя дрейф в сторону повышенных значений вероятностей перескоков и общее усиление ненаправленного перемещения.

Все построения выполнены в предположении об одноосной линейной неоднородности, что, разумеется, содержит ограничения возможностей количественного сопоставления результатов работы с экспериментальными наблюдениями. С другой стороны, принятые к изучению особенности искажения свойств структуры хотя бы на ограниченных участках аппроксимационно присутствуют в широком круге разнообразных ситуаций, включая самые вычурные, что существенно расширяет сферу возможного применения наблюдений качественного характера. Таким образом, деформационные воздействия, включая искривления, свертывание в трубки, локальные растяжения-сжатия должны наряду с другими эффектами рассматриваться и в качестве инструмента перераспределения ассоциированной с наноструктурой примесной компоненты.

Тепловое воздействие — фактор ускорения диффузионных перестроек, а температурная неоднородность — дополнительное средство управления этими перестройками.

Быстрое охлаждение структуры — способ замораживания распределений, созданных при более высоких температурах или иными средствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Старк Дж. Диффузия в твердых телах. — Пер. с англ. М.: «Энергия», 1980. — 239 с.
2. Гегузин Я. Е., Кагановский Ю. С. Диффузионные процессы на поверхности кристалла. — М.: «Энергоатомиздат», 1984. — 124 с.
3. Geim A. K., Novoselov K. S. The rise of grapheme // Nat. Mater. — 2007. — Vol. 6, No. 3. — P. 183—191.
4. Елецкий А. В., Искандарова И. М., Книжник А. А., Красиков Д. Н. Графен: методы получения и теплофизические свойства // УФН. — 2011. — Т. 181, Вып. 3. — С. 233—268.
5. Сорокин П. Б., Чернозатонский Л. А. Полупроводниковые наноструктуры на основе графена // УФН. — 2013. — Т. 183, Вып. 2. — С. 113—132.
6. Shelton J. C., Patil H. R., Blakely J. M. Equilibrium segregation of carbon to a nickel (111) surface: a surface phase transition // Surf. Sci. — 1974. — Vol. 43, No. 2. — P. 493—520.
7. Huang B., Li Z. Y., Liu Z. R., Zhou G., Hao S. G., Wu J., Gu B. L., Duan W. H. Adsorption of gas molecules on graphene nanoribbons and its implication for nanoscale molecule sensor // J. Phys. Chem. C — 2008. — Vol. 112. — P. 13442—13446.
8. Chen J. H., Jang C., Adam S., Williams E. D., Fuhrer M. S., Ishigami M. Charged-impurity scattering in graphene // Nat. Phys. — 2008. — Vol. 4, No. 5. — P. 377—381.
9. Каверин М. В., Krause-Rehberg R., Береснев В. М., Постольный Б. А., Колесников Д. А., Якущенко И. В., Билокур М. А., Жоллыбеков Б. Р. Влияние дефектов и примесных атомов на физико-механические свойства наноструктурных покрытий в области границ раздела // ФИП. — 2013. — Т. 11, Вып. 2. — С. 160—184.
10. Castro Neto A. H., Guinea F., Peres N. M. R., Novoselov K. S., Geim A. K. The electronic

properties of graphene // Rev. Mod. Phys. — 2009. — Vol. 81, No. 1. — P. 109—162.
11. Давыдов С. Ю., Сабирова Г. И. Модель адсорбции на графене // ФТТ. — 2011. — Т. 53, Вып. 3. — С. 608—616.
12. Браун О. М., Медведев В. К. Взаимодействие между частицами, адсорбированными на поверхности металлов // УФН. — 1989. — Т. 157, Вып. 4. — С. 631—666.
13. Нечаев Ю. С., Алексеева О. К. Методологический, прикладной и термодинамический аспекты сорбции водорода графитом и родственными углеродными наноструктурами // Усп. хим. — 2004. — Т. 73. Вып. 12. — С. 1308—1337.
14. Долгов А. С., Жабчик Ю. Л. Миграция примесей в структуре графена // Ж. Нано-Электрон. Физ. — 2012. — Т. 4, Вып. 3. — С. 03021 (5).
15. Долгов А. С., Жабчик Ю. Л. К вопросу о миграции примесных атомов в графене // Ж. Нано- Электрон. Физ. — 2013. — Т. 5, Вып. 3. — С. 03039(4).
16. Израилева Л. К., Руманов Э. Н. Кинетика процессов в системе «внедренные атомы — кристалл» с учетом протяженных дефектов // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. — 2010. — Т. 2. — С. 83—84.
17. Магомедов М. Н. О самодиффузии и поверхностной энергии при сжатии или растяжении кристалла железа // ЖТФ. — 2013. — Т. 83, Вып. 3. — С. 71—78.
18. Учайкин В. В. Автомодельная аномальная диффузия и устойчивые законы // УФН. — 2003. — Т. 173, Вып. 8. — С. 847—876.
19. Шкилев В. П. Описание бимолекулярной субдиффузионно-контролируемой реакции на макроскопическом уровне // ЖТЭФ. — 2009. — Т. 136, Вып. 5. — С. 984—992.
20. Дворецкая О. А., Кондратенко П. С., Матвеев Л. В. Аномальная диффузия в обобщенной модели Дыхне // ЖЭТФ. — 2010. — Т. 137, Вып. 1. — С. 67—76.
21. Долгов А. С., Валуйская А. В. Миграция взаимодействующих атомов в поверхностном монослое // ФИП. — 2013. — Т. 11, Вып. 2. — С. 144—153.

LITERATURA

1. Stark Dzh. Diffuziya v tverdyh telah. — Per. s angl. M.: «Energiya», 1980. — 239 p.
2. Geguzin Ya. E., Kaganovskij Yu. S. Diffuzionnye processy na poverhnosti kristalla. — M.: «Energoatomizdat», 1984. — 124 p.
3. Geim A. K., Novoselov K. S. The rise of grapheme // Nat. Mater. — 2007. — Vol. 6, No. 3. — P. 183—191.
4. Eleckij A. V., Iskandarova I. M., Knizhnik A. A., Krasikov D. N. Grafen: metody polucheniya i teplofizicheskie svojstva // UFN. — 2011. — Vol. 181, Vyp. 3. — P. 233—268.
5. Sorokin P. B., Chernozatonskij L. A. Poluprovodnikovye nanostruktury na osnove grafena // UFN. — 2013. — Vol. 183, Vyp. 2. — P. 113—132.
6. Shelton J. C., Patil H. R., Blakely J. M. Equilibrium segregation of carbon to a nickel (111) surface: a surface phase transition // Surf. Sci. — 1974. — Vol. 43, No. 2. — P. 493—520.
7. Huang B., Li Z. Y., Liu Z. R., Zhou G., Hao S. G.,Wu J., Gu B. L., Duan W. H. Adsorption of gas molecules on graphene nanoribbons and its implication for nanoscale molecule sensor // J. Phys. Chem. S — 2008. — Vol. 112. — P. 13442—13446.
8. Chen J. H., Jang C., Adam S., Williams E. D., Fuhrer M. S., Ishigami M. Charged-impurity scattering in graphene // Nat. Phys. — 2008. — Vol. 4, No. 5. — P. 377—381.
9. Kaverin M. V., Krause-Rehberg R., Beresnev V. M., Postol'nyj B. A., Kolesnikov D. A., Yakuschenko I. V., Bilokur M. A., Zhollybekov B. R. Vliyanie defektov i primesnyh atomov na fiziko-mehanicheskie svojstva nanostrukturnyh pokrytij v oblasti granic ih razdela // FIP. — 2013. — Vol. 11, Vyp. 2. — P. 160—184.
10. Castro Neto A. H., Guinea F., Peres N. M. R., Novoselov K. S., Geim A. K. The electronic properties of graphene // Rev. Mod. Phys. — 2009. — Vol. 81, No. 1. — P. 109—162.
11. Davydov S. Yu., Sabirova G. I. Model' adsorbcii na grafene // FTT. — 2011. — Vol. 53, Vyp. 3. — P. 608—616.
12. Braun O. M., Medvedev V. K. Vzaimodejstvie mezhdu chasticami, adsorbirovannymi na poverhnosti metallov // UFN. — 1989. — Vol. 157, Vyp. 4. — P. 631—666.
13. Nechaev Yu. S., Alekseeva O. K. Metodologicheskij, prikladnoj i termodinamicheskij aspekty sorbcii vodoroda grafitom i rodstvennymi uglerodnymi nanostrukturami // Usp. him. — 2004. — Vol. 73. Vyp. 12. — P. 1308—1337.
14. Dolgov A. S., Zhabchik Yu. L. Migraciya primesej v strukture grafena // Zh. Nano- Elektron. Fiz. — 2012. — Vol. 4, Vyp. 3. — P. 03021 (5).
15. Dolgov A. S., Zhabchik Yu. L. K voprosu o migracii primesnyh atomov v grafene // Zh. Nano- Elektron. Fiz. — 2013. — Vol. 5, Vyp. 3. — P. 03039(4).

16. Izraileva L. K., Rumanov E. N. Kinetika processov v sisteme «vnedrennye atomy-kristall» s uchetom protyazhennyh defektov // Poverhnost'. Rentgen., sinhrotr. i nejtron. issled. — 2010. — Vol. 2. — P. 83—84.
17. Magomedov M. N. O samodiffuzii i poverhnostnoj energii pri szhatiiili rastyazhenii kristalla zheleza // ZhTF. — 2013. — Vol. 83, Vyp. 3. — P. 71—78.
18. Uchajkin V. V. Avtomodel'naya anomal'naya diffuziya i ustojchivye zakony // UFN. — 2003. — Vol. 173, Vyp. 8. — P. 847—876.
19. Shkilev V. P. Opisanie bimolekulyarnoj subdiffuzionno-kontroliruemoj reakcii na makroskopicheskom urovne // ZhTEF. — 2009. — Vol. 136, Vyp. 5. — P. 984—992.
20. Dvoreckaya O. A., Kondratenko P. S., Matveev L. V. Anomal'naya diffuziya v obobschennoj modeli Dyhne // ZhETF. — 2010. — Vol. 137, Vyp. 1. — P. 67—76.
21. Dolgov A. S., Valujskaya A. V. Migraciya vzaimodejstvuyuschih atomov v poverhnostnom monosloe // FIP. — 2013. — Vol. 11, Vyp. 2. — P. 144—153.