

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

На диссертацию Морозова Виталия Михайловича
“Нелинейные модели радиационно-стимулированной диффузии точечных дефектов
и роста когерентных структур в кристаллических средах”,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.3. Теоретическая физика

Исследования поведения материалов в условиях радиационных воздействий являются актуальными в силу высокой практической значимости для ядерной энергетики, космических приложений и др. Широкий спектр обнаруженных явлений требует как совершенствования моделей поведения конденсированных сред под облучением, так и развития теоретических подходов для описания этих явлений. Имеется множество теоретических работ, развивающих понимание механизмов перестройки материалов под облучением. Диссертация Морозова В. М. относится к таким теоретическим исследованиям и предлагает новые подходы к построению и исследованию процессов формирования упорядоченных структур под действием облучения. Работа развивает методы теоретической и математической физики в области нелинейных диффузионных процессов, протекающие в средах при внешних воздействиях. С этой точки зрения диссертационная работа Морозова В. М. является актуальной и обладает новизной полученных результатов.

Диссертационная работа Морозова В. М. содержит 5 глав, Введение, Заключение и Приложение, в котором представлены математические вычисления, использованные при построении моделей диффузии. Список литературы состоит из 266 ссылок на работы в российских и зарубежных научных изданиях. Иллюстративный материал представлен 20 рисунками и 5 таблицами.

Во Введении указаны цель и задачи диссертационной работы, а также сведения относительно ее апробации на научных конференциях, актуальности и новизны.

В первой главе приведен литературный обзор работ в области формирования различных структур под действием внешнего излучения. Обзор содержит анализ как экспериментальных работ в данной области исследований, так и теоретические исследования по построению и изучению моделей формирования различных структур в материалах под действием внешнего излучения. На основе анализа литературных источников обсуждаются некоторые существующие модели, описывающие формирование специфических структур.

Первым типом моделей, рассмотренных в диссертационной работе, которые представлены в Главе 2, являются модели на основе линейных уравнений диффузии. В

работе рассмотрена связь между диффузионными уравнениями с переменными коэффициентами с уравнениями гидродинамики и квазилинейными уравнениями первого порядка. Рассмотрены модели диффузионных процессов, которые позволяют описать образование структурных аномалий как возникновение многолистных решений рассматриваемых уравнений.

В Главе 3 рассмотрены модели с нелинейным коэффициентом диффузии и нелинейными источниками. Рассмотрены постоянный и нелинейный источники, имитирующие внешнее воздействие. В диссертационной работе предложен новый метод исследования таких моделей – метод функциональных подстановок. Решения, которые удалось обнаружить в решаемых уравнениях, относятся к волновым, в том числе периодическим структурам, возникающим в нелинейной диффузионной среде. Анализ модели с коэффициентом диффузии обратно пропорциональным концентрации n ($\sim n^{-1}$), демонстрирует появление периодических структур, перемещающихся в пространстве. В главе представлены и другие модели, допускающие формирование различного рода когерентных структур. Продемонстрирована эффективность метода функциональных подстановок при анализе представленных в данной работе моделей нелинейных диффузионных процессов.

Глава 4 посвящена методу анализа моделей нелинейных процессов диффузии, основанному на разложении решений в ряды возмущений. Такого рода подход многомасштабных разложений широко применяется в нелинейной динамике. В диссертации этот метод сводится к введению зависимости параметров среды от переменных с различными масштабами длины и времени, что позволяет нелинейные диффузионные уравнения общего вида привести к форме линейных уравнений диффузии, параметры которых зависят от интенсивности внешнего источника излучения. Это позволило вывести критерии возникновения периодических решений в системе рассматриваемых уравнений.

В Главе 5 представлена модель, в которой рассмотрена попытка учета взаимодействия излучения со средой и обратного влияния среды на поток внешнего излучения. В этой модели учитываются дефекты двух типов: междоузлия и вакансии, а их генерация и взаимодействие учитываются в нулевом порядке разложений концентраций по малому параметру. В эту модель дополнительно включены частицы внешнего излучения. Получены уравнения в первом порядке возмущений, которые описывают рост кластеров точечных дефектов под воздействием облучения. В этой главе продемонстрирована возможность получить приближенные решения для упорядоченного распределения

дефектов в пространстве, а также их эволюции со временем. Приведены оценки параметров возникающих структур при реальных параметрах среды.

Заключение содержит положения, выносимые на защиту и выводы, подтверждающие достижение поставленных во диссертационной работе.

В Приложении приведены математические соотношения, необходимые при выводе уравнений, и детали математических расчетов.

В качестве новых результатов, полученных в диссертационной работе, можно выделить следующее:

- в работе установлена связь линейных уравнений диффузии с квазилинейными уравнениями первого порядка, и получены общие решения этих уравнений. Этот результат важен в точки зрения общей теории диффузионных процессов, поскольку дает новую информацию о возможных процессах, которые могут приводить к образованию волнообразных структур.

- результаты, полученные с помощью метода функциональных подстановок, дают возможность анализировать свойства моделей с помощью точных решений нелинейных диффузионных уравнений. Кроме этого, такой подход указывает на возможность формирования структур в средах с нелинейной диффузией в форме волн концентрации, перемещающихся в пространстве со временем.

- особый интерес представляет общий класс моделей “быстрая” релаксация – медленная диффузия. Как показано в диссертационной работе, этот подход к описанию возникновения сверхрешеток достаточно универсален, и может применяться к различным моделям. Полученные в рамках этого подхода решения уравнений демонстрируют возможность описания периодических структур.

По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания.

1. Литературный обзор, представленный в Главе 1, недостаточно полный. С одной стороны автор пытался рассказать про все разделы радиационной физики твердого тела, а с другой стороны обзор экспериментальных работ о формировании сверхструктур свелся к нескольким примерам, в основном из статьи [N.M. Ghoniem, D. Walgraef, S.J. Zinkle, Journal of computer-aided materials design. 2001. V. 8. No 1. P. 1-38]. В разделе «1.2 Модели роста сверхрешеток» приводится в основном обзор теоретических моделей роста кластеров, предвыделений и т.д., но модели образования сверхструктур представлены ограниченно. В тоже время уже достаточно давно сформировалась отдельная научная дисциплина «Синергетика» (см. например, Г. Хакен, Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах.

Москва: Мир, 1985. - 419 с.), в которой рассматриваются различные модели и методы описания упорядоченных структур. Широко-известными нелинейными уравнениями, описывающими возникновение новых структур, в том числе периодических, являются уравнения типа Гинзбурга-Ландау (см. например, A. Z. Patashinskii and B. I. Shumilo, Zh. Ehp. Teor. Fiz. 77, 1417), не рассмотренные в Литературном обзоре.

Важным моментом, который желательно было обсудить в обзоре это то, что под облучением могут формироваться сверхструктуры из радиационно-индуцированных скоплений дефектов (вакансионных пор, дислокационных петель, и т.д.), а не непосредственно из точечных дефектов. В результате непонятно какие объекты должны быть рассмотрены для выявления условий формирования сверхструктур: точечные дефекты или уже сформированные кластеры точечных дефектов, обладающих дополнительными специфическими свойствами.

В обзоре не рассмотрены вопросы, касающиеся формы образующихся объектов в виде кластеров\предвыделений, а также касающиеся соответствия симметрии возникающих сверхструктур и кристаллической решетки материалов.

В итоге сформулированные выводы к главе не совсем очевидны. Например, что «рост упорядоченных структур в кристаллических материалах, облучаемых как частицами, так и лазерным излучением, носит универсальный характер».

2. При рассмотрении решаемых уравнений не всегда сформулированы физические причины включения тех или иных членов уравнения, их функциональная зависимость, знак введенных величин, физический смысл особенностей полученных решений уравнений.

- Например, при решении уравнения (14) предположено, что функция $u(x, t)$ может быть положительной, и описывать функцию источника. Отметим, источник точечных дефектов пропорциональный числу дефектов физически не оправдан, и приводит к экспоненциальному росту решения уравнения без каких-либо дополнительных условий.

- При решении уравнения (14) отмечается появление многолистных решений, т.е. появление нескольких возможных состояний системы, но не обсуждается физический смысл этих решений, и не поясняется в каком конкретном состоянии будет находиться система. Также не объясняется физический смысл точек ветвления.

- В уравнении (177) введено нелинейное слагаемое $+\gamma J(n)$, где $J(n) \sim n^3$. Предполагается, что $\gamma > 0$, но тогда это не рекомбинация, о которой говориться

в работе, а источник дефектов, для которого рассмотренная функциональная зависимость неочевидна.

- В главе 3 рассматривается пример степенной зависимости коэффициента диффузии от концентрации дефектов: $D(n) \sim n^p$, в том числе с отрицательными значениями p . В этом случае при малых концентрациях дефектов скорость диффузии неограниченно возрастает, что физически неоправдано, и в теории дефектов такие зависимости не возникают.

3. В работе не рассматривается роль ряда физических параметров, например влияние температуры на процесс роста структур, которая определяет параметры термически активируемых процессов решаемых уравнений. Непонятно из каких соображений для энергии налетающих частиц выбрана величина 0.1 МэВ, и не указано частицы какого излучения рассматриваются (электроны, ионы, нейтроны?). От этого существенно зависят характеристики источника дефектов. Например, при реакторном облучении для расчета источника дефектов учитываются нейтроны более 0.5 МэВ, и нейтроны имеют значительные пробеги, не создавая градиентов в облучаемом объекте. Если рассматриваются ионы, то при энергии 0.1 МэВ пробеги составляют около сотни нанометров, тем самым создается градиент на очень узком пространственном масштабе. При проведении численных расчетов не проведены оценки для областей параметров (температур, интенсивностей источников излучения), при которых возможно формирование обнаруженных в работе структур. И это особенно важно для выявления критического механизма возникновения той или иной неустойчивости, поскольку, как правило, таких причин несколько, а наблюдаемые эффекты обусловлены только одной из возможных причин.
4. В Главе 4 источник в уравнениях диффузии отождествляется с источником внешнего излучения, но имело бы смысл указать связь между источником точечных дефектов в исследуемых уравнениях диффузии и интенсивностью источника излучения.
5. В главе 5 рассмотрена система уравнений для концентраций вакансий и междоузельных атомов, образующихся под действием облучения. Исследование неустойчивостей этих уравнений ведутся достаточно давно (см, например, Martin, G., Phys. Rev. B: Condens. Matter, 1980, v. B21, no. 6, p. 2122, Cauvin, R. and Martin, G., Phys. Rev. B: Condens. Matter, 1981, v. B23, no. 7, p. 3322). Физической причиной такого рода неустойчивости может являться взаимодействие (притяжение) вакансий. Но оценки концентраций вакансий, при которых это взаимодействие становится достаточным, показывают слишком

высокие значения этих концентраций (см. например, Elesin, V.F., Solids, Dokl. Akad. Nauk SSSR, 1988, v. 298, no. 6, p. 1377.), более адекватные результаты получаются если дополнительно учесть наличие примесей (см. например, Devyatko Yu.N. and Tronin V.N., Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz., 1983, v. 37, no. 6, p. 278-280), которые обеспечивают дополнительное «эффективное» притяжение вакансий. Эксперименты подтверждают эти соображения. Например, при реакторном облучении в ядерных реакциях образуются газовые атомы (гелий, водород), которые существенным образом облегчают зарождение вакансионных пор.

- б. В диссертационной работе имеется ряд опечаток, а также ряд недостаточно точных утверждений.

Полученные результаты могут быть использованы при проведении исследований в области изменения свойств материалов под действием внешнего излучения. Достоверность полученных в работе результатов подтверждается использованием при решении всех поставленных задач обоснованных и проверенных на практике методов решения уравнений, в том числе нелинейных. Математические вычисления в диссертации представлены достаточно подробно, что также подтверждает достоверность математических построений в диссертации.

Результаты диссертационной работы в полном объеме опубликованы в 9 статьях в журналах из списка ВАК, результаты работы докладывались на различных научных конференциях.

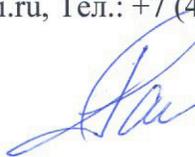
Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации Морозова В. М.

Заключение. Диссертационное исследование Морозова Виталия Михайловича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи по кандидатской диссертации, имеющей важное значение для теоретической физики в области воздействия внешнего излучения на структуру твердых тел. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, согласно п. 2.2 раздела II (кандидатская) Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов», утвержденного ученым советом РУДН протокол № УС-1 от 22.01.2024 г., а её автор, Морозов Виталий Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности Теоретическая физика 01.04.02.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук Рогожкин Сергей Васильевич, (специальность 1.3.8 Физика конденсированного состояния), профессор кафедры физики экстремальных состояний вещества, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
E-mail: SVRogozhkin@mephi.ru, Тел.: +7 (495) 788 5699 (доб. 9809).

11 июня 2024 г.



Рогожкин Сергей Васильевич



Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ

В.М. Саморозов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31, +7 (495) 785 5699, info@mephi.ru