

PASC: 75.50.G, 81.10.Dn, 81.10.Aj, 81.15.Lm

Н.И. Мезин, Н.Ю. Старостюк

ВЕРИФИКАЦИЯ ГИПОТЕЗЫ ОБ ИЗМЕНЕНИИ МЕТРИКИ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ В ПРОЦЕССЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 5 августа 2019 года

В процессе эпитаксиального роста пленок феррогранатов посредством наследственных кластеров получен ряд результатов, имеющих характер артефактов. Для интерпретации результатов привлекается гипотеза об изменении метрики пространства-времени в процессе кристаллизации.

Ключевые слова: жидкофазная эпитаксия, кластеры, феррогранат, наследственная информация, фазовые равновесия

Введение

При анализе явлений роста кристаллов возникают следующие вопросы: какие физические факторы определяют неизбежность роста кристаллических структур, если в среде достигнуты известные условия; какой механизм (необходимый и достаточный) обеспечивает сохранение подобия (углов) в процессе роста; с помощью какого физического агента скорость роста одной грани связана со скоростью роста другой. Классические теории кристаллообразования не дают исчерпывающих ответов на эти вопросы.

Молекулярно-кинетические и термодинамические теории роста кристаллов рассматривают этот процесс как поверхностный эффект, разыгрывающийся в масштабах молекулярных размеров у поверхности кристалла. Термодинамическая теория роста кристаллов, которая была предложена и развивалась Д. Гиббсом (1879 г.), П. Кюри (1885), В. Вульфом (1895), основана на гипотезе о превалирующей роли поверхностного натяжения. Молекулярно-кинетические теории, развитые В. Косселем (1927 г.) и И. Странским (1938–1949 гг.), сводили рост к масштабам порядка размеров кристаллической ячейки. Теория роста Франка (1945–1949 гг.) относится также к теориям роста на поверхности кристалла. Она придает принципиальное значение дислокациям, происхождение которых ею не выясняется.

Молекулярно-кинетические теории не раскрывают причину и не объясняют закона сохранения углов в процессе роста кристаллов. Термодинамические же теории требуют дополнительного постулата «извне» для сохранения подобия. Ограниченность классических теорий является естественной,

поскольку объединение двух признаков – объемности роста и сохранения пропорций в процессе роста – является невозможным в рамках галилеевого представления о времени. Кроме того, классические теории не содержат подходов к пониманию причин изменений некоторых физических свойств, возникающих вблизи растущих граней и исчезающих с прекращением роста. К таким свойствам относятся прежде всего уменьшение скорости распространения электромагнитных волн вблизи растущих граней (это явление было открыто Г. Майерсом в 1904 г.) и повышение давления со стороны растущих граней на окружающую среду. Это так называемое «кристаллизационное давление» не зависит от изменения плотности среды при кристаллизации.

Нетрадиционный подход к росту структур с сохранением их подобия предложил А.А. Власов (1965 г.). Этот подход позволил ему создать теорию, которая с единых позиций описывает рост кристаллических, биологических и плазменных структур. В рамках настоящей работы нет возможности и необходимости в детальном изложении этой теории. Ее физико-математическая суть обстоятельно изложена в монографии [1]. Обозначим лишь основные физические принципы и гипотезы, на которых базируется данная теория.

Из анализа признаков роста кристаллических, биологических и плазменных структур А.А. Власов сделал следующий вывод. Существует целый ряд общих признаков роста у структур, существенно отличающихся в отношении силовых, молекулярно-структурных, химических и других свойств. Поэтому должны быть некие величины или понятия, более первичные, чем силовые взаимодействия и молекулярно-структурные свойства самих частиц. К числу таких понятий А.А. Власов относит функцию распределения, которая определяет вероятность местоположения частиц без детализации их внутренней структуры, и информацию, заключенную в уравнении непрерывности для данной функции. Кроме того, эти понятия включают метрические пространственно-временные соотношения, ограничивающие произвол кинематических характеристик среды, тепловые движения частиц и диффузионные явления. Конкретизировать указанные первичные понятия можно, выделив и обобщив экспериментальные данные о росте структур.

В предложенной теории процессы роста относятся к классу инерционных процессов в том смысле, что для их течения не обязательно участие внешних сил. Процессы роста требуют среды с определенными признаками и характеризуются наличием растущей структуры. Внешние силы могут влиять на рост, но он происходит и без их действия. Более того, выдвигается гипотеза, имеющая ключевое значение для теории о том, что законы, управляющие ростом как инерционным процессом, запрещают состояние покоя. Движение при этом должно быть одного из трех возможных видов: движение состояний вещества (например, движение фронта перепада концентраций между средой и растущей структурой), движение самого вещества и, наконец, движение, связанное с изменением метрики пространства-времени. Последний вид является фундаментальной формой движения и, возможно, обязательной для растущей структуры.

На основе изложенных выше положений и гипотез составляются тензорные уравнения движения в четырехмерном римановом пространстве. Решения этих уравнений дают ответы на поставленные выше вопросы, т.е. показывают, каким образом обеспечивается сохранение подобия растущих структур, а также объясняют изменения физических свойств, возникающих у растущих граней.

Следует подчеркнуть, что самым необычным элементом в теории Власова является гипотеза об изменении метрики пространства-времени в процессе кристаллизации. В ней категория движения выдвигается на один уровень первичности вместе с категориями пространства и времени. По сути, гипотеза допускает выход за рамки плоского пространства-времени.

В настоящей работе мы приводим ряд экспериментальных результатов, имеющих характер артефактов. По нашему мнению, они могут служить косвенным подтверждением гипотезы об изменении метрики пространства-времени в процессе кристаллизации. Эти артефакты были получены в процессе роста эпитаксиальных пленок и кристаллов феррогранатов посредством наследственных кластеров.

1. Влияние полуупорядоченного слоя на формы движения в процессе кристаллизации

В своей теории А.А. Власов принимает и подтверждает ряд основных предпосылок реального кристаллообразования, в частности: принципиальную роль полуупорядоченного слоя, возникающего у поверхности растущего кристалла, на несколько порядков превышающего молекулярные размеры; объемный, а не поверхностный характер роста кристаллов.

Полуупорядоченный слой, наличие которого подтверждается многочисленными экспериментами, формируется при ассоциации частиц пересыщенной среды, примыкающей к кристаллу. В результате образуются квазикристаллические или жидкоподобные комплексы или кластеры. Они беспорядочно ориентированы, не способны к самостоятельному росту, но могут ориентированно высаживаться на поверхности кристалла, образуя полуупорядоченные слои, которые затем переходят в слои роста. Между ними и, особенно, между ними и кристаллом существуют дальнедействующие силы, проявляющиеся на значительных расстояниях. В газовых средах, растворах и расплавах эти кластеры играют фундаментальную роль на всех стадиях роста кристалла [2].

Следует предположить, что образование полуупорядоченного слоя и квазикристаллических кластеров отразится на формах движения, о которых говорится в гипотезе о законах, запрещающих состояние покоя. Очевидно, что возникновение в кристаллизационной среде квазикристаллических кластеров должно сказываться в большей степени на движениях, связанных с изменениями метрики пространства-времени, чем на двух других формах движения – движении состояния вещества и движении самого вещества. Действительно, при образовании кластеров общая концентрация частиц у поверхности кристалла не изменяется, что, в свою очередь, не приводит к

изменению в движении состояния вещества. В большей степени изменяются кинематические характеристики среды, имеющие отношение к метрике пространства-времени.

Таким образом, можно полагать, что квазикристаллические кластеры, формирующие полуупорядоченный слой у поверхности кристалла, могут выступать в роли некоего опосредованного инструмента, изменяющего метрику пространства-времени в процессе кристаллизации.

2. Кристаллизация посредством наследственных кластеров

Образование квазикристаллических кластеров в результате ассоциации частиц в пересыщенной среде имеет случайный, неконтролируемый характер. Следовательно, предсказать их структуру и поведение невозможно. Это обстоятельство повышает вероятность спонтанной кристаллизации и ухудшения качества получаемых кристаллов. Поэтому при выращивании кристаллов формирование кластеров считается нежелательным явлением и его стараются минимизировать, подбирая оптимальные технологические режимы.

Мы развиваем иной механизм образования квазикристаллических кластеров. Он заключается в том, что квазикристаллические кластеры создаются целенаправленно путем частичной или слабой диссоциации вещества нужного состава, предварительно синтезированного в керамическом виде. Важной особенностью этих кластеров является то, что их структура может быть предсказана. Кроме того, они могут нести наследственную информацию от исходного керамического вещества к растущему кристаллу. Такой информацией являются соотношение между химическими элементами в исходном материале и его структурный мотив. Эти кластеры логично назвать наследственными. Технология кристаллизации посредством наследственных кластеров была реализована на примере жидкофазной эпитаксии и спонтанной кристаллизации редкоземельных феррогранатов [3,4].

Было показано, что, выбирая соответствующие технологические параметры, можно создавать в растворе-расплаве кластеры требуемой структуры, сохраняя необходимую устойчивость кристаллизационной среды к спонтанной кристаллизации. Получаемые при этом эпитаксиальные пленки и кристаллы обладают совершенной кристаллической структурой и улучшенными физическими характеристиками. Так, в пленках, выращенных посредством наследственных кластеров, коэффициенты затухания в 6 раз меньше, а подвижность доменных границ в 10 раз больше, чем в пленках аналогичных составов, полученных из традиционного раствора-расплава, не содержащего наследственных кластеров [5]. Состав пленок не зависит от температуры и скорости роста и соответствует химическому составу исходной керамики. Этот факт указывает на генетическую природу кластеров. С помощью наследственных кластеров был получен новый ферритовый материал, обладающий необычными свойствами [4,6].

3. Артефакты, полученные в процессе кристаллизации посредством наследственных кластеров

Наряду с выявленными особенностями кинетики кристаллизации посредством наследственных кластеров нами получен ряд экспериментальных результатов, которые имеют характер артефактов, так как их нельзя объяснить на основе традиционных представлений о фазообразовании и росте кристаллов.

3.1. Нарушение фазовых равновесий

Диаграммы фазового равновесия (фазовые диаграммы) являются одной из основ материаловедения. Они представляют собой графическое изображение состояний термодинамической системы в пространстве их основных параметров – температуры, давления и состава. Для сложных систем, включающих много фаз и компонентов, построение диаграмм состояния по экспериментальным данным и данным термодинамического моделирования является важнейшим способом предсказания поведения в ходе различных процессов.

На рис. 1 представлена фазовая диаграмма раствор-расплавной композиции $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-Ln}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$, традиционно используемой для жидкофазной эпитаксии пленок феррогранатов [7]. Она свидетельствует о том, что в данной системе могут существовать только три фазы – магнетоплюмбит, феррогранат и ортоферрит, причем область феррограната довольно узкая. Руководствуясь этой диаграммой, технологи задают состав раствора-расплава для роста пленок феррограната.

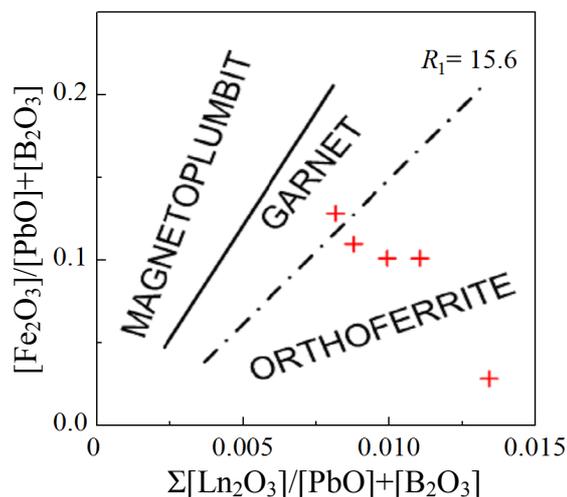


Рис. 1. Псевдодвойная равновесная фазовая диаграмма раствор-расплавной композиции $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-Ln}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Значками (+) показаны составы растворов-расплавов, из которых выращивались пленки феррограната посредством наследственных кластеров

Фазовая диаграмма претерпевает существенные изменения, когда в процессе кристаллизации участвуют наследственные кластеры. Как видно из диаграммы, их участие приводит к значительному расширению области су-

ществования феррограната. Фаза феррограната глубоко внедрилась в область ортоферрита, т.е. образование феррограната произошло в той области фазовой диаграммы, где согласно эмпирическим данным и термодинамическим моделям ее быть не должно.

3.2. Увеличение механической прочности пленки

При эпитаксии пленок феррограната необходимо обеспечивать равенство постоянных решеток пленки и подложки. Несоблюдение этого равенства вызывает механические напряжения в пленке. Связь возникающего напряжения с постоянной решеткой подложки a_s и постоянной решетки пленки a_f , т.е. с $\Delta a_0 = a_s - a_f$, определяется следующей формулой [8]:

$$\sigma = \frac{E}{1-\nu} \frac{\Delta a_0}{a_s}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона. В гранатовых пленках практически допустимы только значения $\Delta a_0 / a_s \sim 0.2\%$, в противном случае пленка разрушается, и ее рост прекращается.

Из раствора-расплава, содержащего наследственные кластеры, осуществляли эпитаксию пленок состава $\text{Eu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ на подложку $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$. Постоянная решетки феррограната $\text{Eu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ $a_f = 1.2498$ nm, постоянная решетки подложки $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ $a_s = 1.2386$ nm, рассогласование параметров решеток подложки и пленки $\Delta a_0 / a_s \sim 0.9\%$. Следовательно, согласно вышеизложенному рост пленки при этих значениях постоянных решеток исключен, так как рассогласование постоянных решеток пленки и подложки превышает допустимое более чем в четыре раза. Тем не менее происходил устойчивый рост пленки. При этом скорость роста мало отличалась от скорости роста пленок других составов, постоянная решетки которых была близка к постоянной решетки $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$. Качество полученных пленок зависело от их толщины. При толщинах до 10 μm видимых дефектов в пленках не обнаружено. При увеличении толщины более 10 μm начинает проявляться макроскопическая шероховатость поверхности, возникают трещины и включения микрокристаллов (рис. 2).

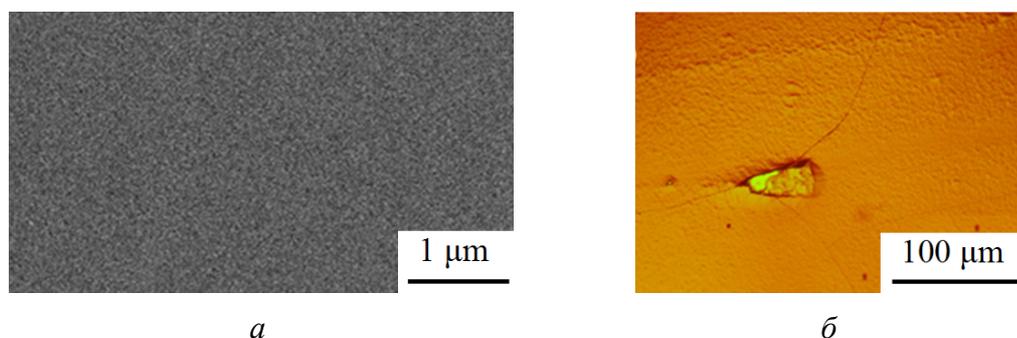


Рис. 2. Изображения поверхностей эпитаксиальных пленок $\text{Eu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ толщиной $h = 8$ μm (а) и $h = 15$ μm (б), выращенных на подложках $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ при рассогласовании параметров решеток подложки и пленки более чем на 0.9%

Итак, в процессе кристаллизации посредством наследственных кластеров непонятным образом существенно повысились прочностные характеристики полученных пленок. Принимая во внимание формулу (1), правомерно утверждать, что произошло увеличение модуля Юнга феррограната.

3.3. Образование кристаллов вне кристаллизационной среды

Для понимания степени уникальности следующего артефакта кратко опишем условия, при которых он был получен.

В процессе жидкофазной эпитаксии подложку погружали в раствор-расплав, который находился в платиновом тигле. Объем раствора-расплава не должен превышать половины тигля. В наших экспериментах высота последнего составляла 50 мм, расстояние от поверхности раствора-расплава до края тигля ~ 30 мм. Во время роста весь объем расплава находился в изотермической зоне. Небольшой температурный градиент (снижение температуры) наблюдался у края тигля, затем по мере удаления от него градиент постепенно увеличивался. В процессе роста наблюдалось незначительное испарение компонентов растворителя, которые в дальнейшем конденсировались на защитной крышке, изолирующей рабочее пространство печи от внешней среды и расположенной примерно на расстоянии 40 см от края тигля. Химический анализ конденсата показал, что он почти на 100% состоял из оксида свинца.

После завершения цикла выращивания серии пленок (примерно 10 образцов) и охлаждения раствора-расплава до комнатной температуры тигель был извлечен из печи. Вся его наружная поверхность была абсолютно чистой, за исключением того, что на ее средней части образовался опоясывающий слой шириной ~ 5 мм, состоящий из агломерата блестящих кристаллов размером 0.1–0.5 мм.

Формирование слоя кристаллического агломерата на внешней поверхности тигля не поддается логическому объяснению, так как этот агломерат не имел контакта с раствором-расплавом. Дальнейшие исследования показали, что агломерат состоит из кристаллов феррограната, ортоферрита и редкой модификации гематита – маггемита (рис. 3). В природных условиях маггемит

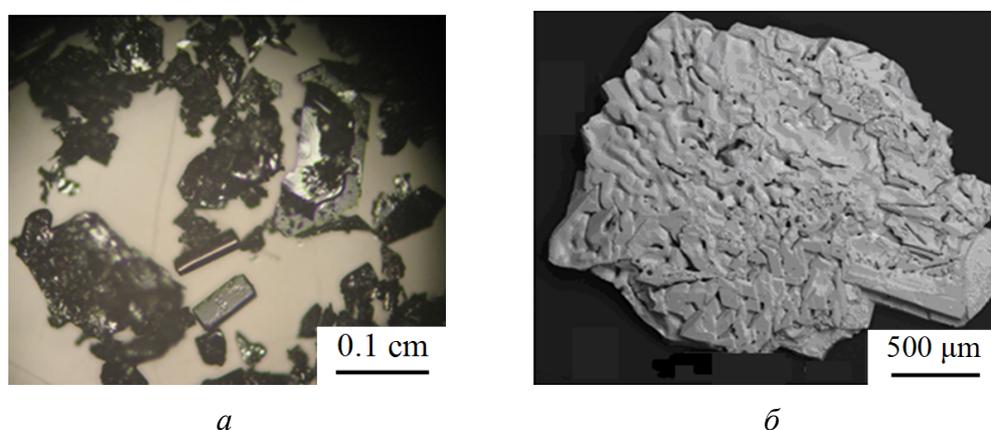


Рис. 3. Кристаллы, образовавшиеся на внешней поверхности платинового тигля: *а* – кристаллы феррограната и ортоферрита, *б* – друза из кристаллов маггемита

очень редко встречается на Земле в виде микрокристаллических включений в магнетите. На Марсе маггемит составляет основу красных песков.

Итак, можно констатировать, что формирование кристаллических структур на внешней поверхности тигля произошло вне кристаллизационной среды без видимых признаков массопереноса. Кроме того, образовалась дополнительная фаза (маггемит), которой согласно фазовой диаграмме (см. рис. 1) в композиции $PbO-V_2O_3-Ln_2O_3-Fe_2O_3$ быть не должно.

Обсуждение

Смещение фазовых равновесий, увеличение модуля упругости и рост кристаллов вне кристаллизационной среды представляют собой артефакты, не имеющие объяснений в рамках классических представлений и теорий. Поэтому для их интерпретации логично обратиться к теории, которая наиболее полно описывает процессы реального кристаллообразования. Таковой является теория роста структур с сохранением их подобия, предложенная А.А. Власовым. Покажем, что из трех форм движения, допускаемых в этой теории, форма движения, связанная с изменением метрики пространства-времени, выступает наиболее вероятной движущей силой, приводящей к возникновению описанных артефактов.

1. Расширение гранатовой фазы. Фазовая диаграмма представляет собой графическое изображение картины термодинамического равновесия в сложной многокомпонентной системе при постоянных температуре и давлении. Каждой фазе на диаграмме соответствует минимум свободной энергии. Это означает, что при определенном соотношении между компонентами система сама «выбирает» свое поле (область на фазовой диаграмме), в которой ей выгодно находиться. Иными словами, данному соотношению между компонентами соответствует только одно положение на диаграмме. Для того чтобы переместиться в другое поле на фазовой диаграмме, необходимо изменить соотношение между компонентами. В нашем случае (см. рис. 1) такими компонентами являются Fe_2O_3 , Ln_2O_3 и $PbO + V_2O_3$. Очевидно, что если из этих компонентов образуются квазикристаллические кластеры, то соотношение между ними не изменится. Это соотношение соответствует фазе ортоферрита (рис. 1). В действительности же в поле ортоферрита кристаллизуется феррогранат, т.е. произошло расширение гранатовой фазы в область ортоферрита. Следовательно, в системе появилась новая, дополнительная форма движения.

Наследственные кластеры в кристаллизационной среде образуются без изменения усредненной по объему исходной концентрации кристаллообразующих компонентов. Движения состояния вещества при этом не происходит. Поэтому, исходя из вышеизложенной гипотезы, дополнительная форма движения может быть связана главным образом с изменением метрики пространства-времени.

2. Увеличение прочности. Прочность реальных твердых тел может быть во много раз меньше прочности, рассчитанной для идеального кристалла.

Это связано с дефектностью их структуры. Можно предположить, что увеличение прочности в нашем случае происходит в результате уменьшения дефектности кристаллической структуры пленок. Однако экспериментально доказано, что метод жидкофазной эпитаксии позволяет выращивать пленки, обладающие практически идеальной кристаллической структурой. Поэтому повышение прочности (увеличение предельно допустимого значения $\Delta a_0/a_s$ с 0.2 до 0.9%) только за счет уменьшения дефектности кристаллической структуры пленок мало вероятно. Очевидно, что рост прочности обеспечивается также и вследствие изменения упругих свойств материала (увеличения модуля Юнга в соотношении (1)). Сила упругости имеет электромагнитную природу, будучи макроскопическим проявлением межмолекулярного взаимодействия.

Следовательно, мы имеем еще один факт, который (наряду с эффектом, открытым Г. Майерсом) свидетельствует об изменении физических свойств в процессе кристаллизации. Очевидно, что движение фронта кристаллизации и массоперенос не могут повлиять на упругие свойства кристалла. Поэтому резонно предположить, что это изменение обусловлено формой движения, связанной с изменением метрики пространства-времени.

Таким образом, можно утверждать, что увеличение прочности пленок феррограната произошло в результате изменения метрики пространства-времени в процессе кристаллизации посредством наследственных кластеров.

3. Рост кристаллов вне кристаллизационной среды. Попытаемся проанализировать все возможные варианты, при которых агломерат из кристаллов мог бы образоваться на внешней поверхности тигля.

Из описанной выше геометрии эксперимента следует, что рост кристаллов на внешней поверхности тигля непосредственно из раствора-расплава исключен. Теоретически возможен еще один механизм, по которому кристаллообразующие компоненты могут оказаться за пределами тигля и осадиться на его внешней поверхности – это конденсация из газовой фазы. Однако анализ химического состава испаряющегося из тигля конденсата показал отсутствие в нем кристаллообразующих компонентов. Кроме того, температурный профиль в месте нахождения тигля вообще исключает возможность конденсации какого-либо вещества на его поверхности, поскольку температура стенок тигля на 10–15°C больше, чем температура ближайших к нему поверхностей, а конвективные потоки направлены вверх от тигля. Можно также предположить гипотетическую возможность, при которой перемещение кристаллообразующих компонентов на внешнюю поверхность тигля происходит в результате воздействия на них физических полей. Однако в печи нет источников электрических полей, а переменное магнитное поле, создаваемое обмоткой нагревательного элемента, чрезвычайно мало.

Таким образом, в описанном эксперименте не выявлено факторов, связанных с движением вещества, или полей, которые бы обусловили образование кристаллов на внешней поверхности тигля. Поэтому логично предположить, что и в этом случае имеет место движение, связанное с изменением метрики пространства-времени.

Выводы

Теория Власова является пока что единственной, логически не противоречивой теорией, которая описывает процессы реального кристаллообразования с сохранением подобия. Поэтому применение для интерпретации полученных артефактов одной из основных гипотез, используемых в этой теории, является вполне обоснованным. Гипотеза об изменении метрики пространства-времени в процессе кристаллизации посредством наследственных кластеров позволяет, не выходя за рамки физической реальности, приблизиться к пониманию полученных артефактов. В свою очередь, эти артефакты наполняют физическим содержанием гипотезу об изменении метрики пространства-времени в процессе кристаллизации.

Таким образом, нарушение фазовых равновесий в сложной многокомпонентной системе, увеличение модуля упругости растущего кристалла и рост кристаллов вне кристаллизационной среды могут быть обусловлены особой формой движения, имеющей место в процессе кристаллизации посредством наследственных кластеров. Эта форма движения связана с изменением метрики пространства-времени.

Авторы выражают благодарность В.В. Бурховецкому за помощь в идентификации кристаллов.

1. *А.А. Власов*, Статистические функции распределения, Наука, Москва (1966).
2. *Р.О. Гриздейл*, Теория и практика выращивания кристаллов, Металлургия, Москва (1968), с. 176–189.
3. *Н.И. Мезин, Н.А. Дорошенко, Н.Ю. Старостюк, З.Ф. Кравченко*, ЖТФ **56**, 1230 (1986).
4. *N.I. Mezin, N.Yu. Starostyuk, S.V. Yampolskii*, JMMM **442**, 189 (2017).
5. *Ф.Г. Барьяхтар, А.Ф. Коновалов, Н.И. Мезин, Л.И. Приходько, В.Ф. Шкарь*, УФЖ **32**, 749 (1987).
6. *N.I. Mezin, Yu.I. Nepochatykh, N.Yu. Starostyuk, S.V. Yampolskii*, JMMM **476**, 447 (2019).
7. *T. Hibija*, J. Cryst. Growth **64**, 499 (1983).
8. *A.H. Eschenfelder*, Magnetic Bubble Technology, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1981).

N.I. Mezin, N.Y. Starostyuk

VERIFICATION OF THE HYPOTHESIS ABOUT A CHANGE OF SPACE-TIME METRICS IN THE COURSE OF CRYSTALLIZATION PROCESS

A number of results of artifact character are obtained when studying the process of epitaxial growth of ferrogarnet films by means of inherent clusters. For the purpose of interpretation of the results, the hypothesis of a space-time metrics change in the course of crystallization is involved.

Keywords: liquid-phase epitaxy, clusters, ferrogarnet films, inherent information, phase equilibrium

Fig. 1. Pseudo-double equilibrium phase diagram of the $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-Ln}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ solution-melt composite. Signs (+) mark the compositions of solution-melts used for growing of ferrogarnet films by inherent clusters

Fig. 2. Images of the surfaces of the $\text{Eu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ epitaxial films grown on the $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ substrates with more than 0.9% mismatch between the substrate and the film grids: *a* – film thickness $h = 8 \mu\text{m}$, *b* – film thickness $h = 15 \mu\text{m}$

Fig. 3. Crystals formed on the outer surface of the platinum crucible: *a* – ferrogarnet and orthoferrite crystals, *b* – maghemite druse