

УДК 539.25

doi:10.18.101/978-5-9793-0883-8-5-12

Особенности термодинамики формирования композитных наночастиц

А. Р. Раднаев¹, А. В. Номоев^{1,2}

¹Бурятский государственный университет, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а

²Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

Аннотация

Статья посвящена механизму возникновения и формированию янусподобных наночастиц TaSi₂/Si и частиц ядро-оболочка Cu/SiO₂, полученные в условиях совместного испарения и конденсирования кремния с танталом и медью. Показано, что формирование, морфология и фазовый состав наночастиц зависит от химического взаимодействия компонентов при кристаллизации. Использование янус-частиц и частиц ядро-оболочка приводит к возможности применения в электронных приборах, в качестве объектов с уникальными электрофизическими свойствами: электрическими и оптическими, каталитической активностью, комбинационным рассеянием, поверхностным плазмонным резонансом. Наличие барьера Шоттки в янусподобных наночастицах TaSi₂/Si может обуславливать наличие у них еще одного уникального свойства – нелинейной проводимости.

Ключевые слова: эвтектика, химические соединения, силицид тантала, янусчастица, твердый раствор, кристаллизация, наночастица, ядро-оболочка.

Features of Thermodynamics in Composite Nanoparticles Formation

A. R. Radnaev¹, A.V. Nomoev^{1,2}

¹Buryat State University, 24a, Smolin Str., Ulan-Ude 670000, Russia

²Institute of Physical Materials Science, SB RAS, 6, Sakhyanova Str., Ulan-Ude 670047, Russia

Abstract

The article is devoted to the mechanism of the origin and formation of Janus-like nanoparticles TaSi₂ / Si particles and core-shell Cu / SiO₂, resulting in a co-evaporation and condensation of silicon with tantalum and copper. The formation, morphology and phase composition of the nanoparticles depend on the chemical interaction of components in the process of crystallization. Using the Janus particles and core-shell particles leads to the possibility of use in electronic devices, as objects with unique physical properties: electrical and optical, catalytic activity, Raman scattering, surface plasmon resonance. The presence of the Schottky barrier at the Janus-like TaSi₂ / Si nanoparticles can condition that they have another unique property – nonlinear conduction.

Keywords: eutectic, chemical compounds, tantalum silicide, janus-particle solid solution crystallization, nanoparticle, core-shell.

Введение

В настоящей работе проведены дополнительные исследования механизма формирования структуры наночастиц TaSi₂/Si, Cu/SiO₂ с учетом кристаллизации фазовых и структурных составляющих в соответствии с фазовыми диаграммами состояния Ta-Si, Cu-Si, Cu-O[1,2].

В связи с этим, проведены исследования взаимосвязи их структуры, морфологии и фазового состава наночастиц. Уникальные свойства составляющих компонентов композитных янусподобных наночастиц объясняют возрастающий интерес исследователей к их синтезу, о чем свидетельствует большое количество публикаций [3,4].

Силицид тантала (TaSi₂) имеет привлекательное сочетание свойств, включающее в себя высокую температуру плавления 2040°C, низкое удельное электрическое сопротивление (по Галлисту, около 8,5 мком·см, при температуре 4.4⁰ К это соединение переходит в сверхпроводящее состояние), поверхностное сопротивление (2 Ом/квдрат), высокий модуль упругости (350-450 ГПа), коррозионную стойкость в атмосферных условиях, относительно низкую плотность (8,83 г/см³). Низкое электрическое сопротивление и стойкость к окислению обусловили применение дисилицида тантала TaSi₂ в микро- и нанoeлектронике в качестве барьеров [5,6], омических контактов [7], соединителей в интегральных цепях [8]. Все эти свойства TaSi₂ одновременно с хорошей совместимостью с кремнием (Si) позволяют синтезировать на их основе янусподобные наночастицы силицид тантала – кремний (TaSi₂/Si) размером 150-250 нм с уникальными электрофизическими свойствами синтез и механизм образования, которых описан в [6].

К таким уникальным свойствам янусподобной наночастицы TaSi₂/Si, например, можно отнести наличие у неё анизотропии электрических свойств вызванной неоднородностью фазового состава. Фаза TaSi₂ обладает металлической проводимостью, а фаза Si – полупроводниковой. В результате на границе контакта TaSi₂/Si возникает барьер Шоттки, который при наличии в полупроводниковой час-

ти частицы электронов может привести к их перераспределению и образованию дипольного момента. При отсутствии электронов в кремнии разделения зарядов не происходит, а в янусподобной наночастице TaSi₂/Si будет сохраняться встроенное электрическое поле ориентированное перпендикулярно плоскости контакта Шоттки. Как дипольный момент, так и наличие встроенного электрического поля представляют большой практический интерес, так как их взаимодействие с внешними магнитными, либо электрическими полями позволяет дистанционно управлять их пространственной ориентацией.

Наличие барьера Шоттки в янусподобных наночастицах TaSi₂/Si может обуславливать наличие у них еще одного уникального свойства – нелинейной проводимости. Ожидается, что в виду малого размера их электрическая емкость (C) будет очень мала, что при наличии очень маленького последовательного сопротивления R_S, позволяет использовать их как очень высокочастотные (десятки и сотни Терагерц) приборы.

Прикладываемое к решетке электрическое поле создает дипольный момент TaSi₂/Si в янусподобных частицах, предположительно, что создаваемый момент имеет большее значение, вследствие большей поляризации зарядов в этих частицах.

В последнее время авторы синтезируют частицы типа ядро-оболочка Cu/Si высокопроизводительным способом испарения вещества релятивистским пучком электронов с последующей конденсацией паров в потоке инертного транспортного газа [8, 9]. В данном способе частицы получают в одну стадию, непосредственно из газовой среды без подложки и метод получения наночастиц является высокоэффективным и наиболее экономичным [10,11]. Процесс кристаллизации двухкомпонентных систем с ограниченной растворимостью в твердом состоянии заключается в равновесном выделении вторичных стабильных фаз из пересыщенных твердых растворов [12-15].

В равновесных условиях, из пересыщенного твердого раствора выделяется новая стабильная фаза. С увеличением скорости охлаждения, атомы растворенной меди остаются в решетке матричного твердого раствора алюминия, вызывая деформацию матрицы, приводя систему в неравновесное состояние. Для цветных металлов комнатная температура является достаточно высокой для диффузионной подвижности атомов [16]. Поэтому в закаленном однофазном твердом растворе, растворенные избыточные атомы диффундируют в определенные области, образуя кластеры – зоны Гинье-Престона (в дальнейшем ЗГП) [17-20].

В системе Cu-Si, при содержании кремния менее 8% Si (вес.), из стабильной α-Cu фазы выделяется вторичная и равновесная γ-Cu фаза с более высокой концентрацией кремния. В неравновесных условиях охлаждения вторичная, стабильная фаза не успевает выделиться и сформироваться, поэтому α-Cu твердый раствор находится в однофазном, метастабильном и несколько деформированном состоянии.

Из общих физических соображений понятно, что электрофизические свойства этих частиц характеризуются совокупностью параметров: размером, структурой, морфологией, фазовым составом, композицией, наличия примесей и т. д.

Все эти свойства могут управляться переменным размером, морфологией, и композицией наночастиц, что позволяет создавать новые материалы с оригинальными свойствами, допированные или модифицированные этими наночастицами. Характеризация полученных наночастиц проведена методами, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), рентгенофазового анализа (РФА) и электронной дифракцией на отдельных участках (SAED).

Результаты и обсуждения

Термодинамические особенности образования наночастиц TaSi₂/Si

В фазовой диаграмме состояния Ta-Si компоненты которой могут образовывать ограниченный твердый раствор внедрения, максимальное содержание кремния в тантале близко к 7% при температуре 2260 °С, а также ряд химических соединений Ta₃Si, Ta₂Si, Ta₅Si₃ и TaSi₂.

Механизм образования частиц был описан ранее и опубликован в статьях [21, 22].

Изображение этих частиц, полученное на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) (рис. 3) показывает, что сфероподобная частица состоит из двух частей. Черная половина – это силицид тантала TaSi₂, более светлая вторая – кремний.

Масспектрометрический анализ с атомно-индуцированной плазмой показал содержание элементов в 64% Ta и 36% Si (вес.) в нанопорошке, содержащим TaSi₂/Si, TaSi₂, Si. Образование наночастиц TaSi₂/Si может происходить в зоне, содержащей менее 76% Ta, т. е. правее соединения TaSi₂ по диаграмме. По полученным снимкам ПЭМ (рис.1.) отчетливо видны фазовые структурные составляющие TaSi₂ и Si, как отдельные, так и связанные между собой в янусподобную форму TaSi₂/Si и с различным соотношением фаз в наночастицах. Поскольку химического взаимодействия между TaSi₂ и Si нет, то образуется граница раздела фаз (барьер Шоттки) [23]. По-нашему мнению, образование рав-

новесных янусподобных наночастиц, с различным содержанием структурных составляющих, заключается в образовании жидких капель в транспортируемом газе (аргон), испаренных атомов Ta и Si релятивистским электронным пучком мощностью 1,4МэВ, с различной стехиометрией компонентов (Ta, Si) и их последующей кристаллизацией. В соответствии с диаграммой состояния Ta-Si и данными содержания элементов, могут реализоваться следующие последовательности фазовых превращений, приводящие к образованию янусподобных наночастиц TaSi₂/Si:

- в первом случае – доэвтектический, сначала из жидкой фазы кристаллизуется достаточно большое количество – 57% вес. TaSi₂ (первичная кристаллизация), а оставшееся количество жидкой фазы (43% вес.) претерпевает эвтектический (изотермический) распад $L \xrightarrow{\text{const } 1400,0^{\circ}\text{C}} \text{Э}(\text{TaSi}_2+\text{Si})$. Расчет производился по правилу отрезков. При этом содержание структурных составляющих в эвтектике 7% TaSi₂ и 93% Si. Структурно, как известно, эвтектика представляет собой прочно связанную механическую смесь фаз TaSi₂ и Si. Весовое содержание компонентов в эвтектике 99% Si и 1% Ta (в соответствии с фазовой диаграммой Ta-Si). Необходимо заметить, что при кристаллизации эвтектики системе энергетически невыгодно образовывать отдельную структурную составляющую Э(TaSi₂+Si) в частице, поэтому кристаллизующийся TaSi₂ в эвтектике Э(TaSi₂+Si), достраивает ранее выделившийся первичный TaSi₂, образуя, собственно янус-частицу, не разделяясь на отдельные структурные составляющие TaSi₂ и эвтектику Э(TaSi₂+Si).

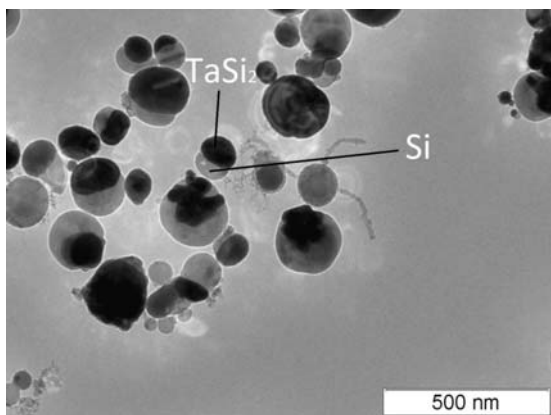


Рис. 1. Изображения янусподобных наночастиц TaSi₂/Si.

- во втором случае, стехиометрический состав компонентов – эвтектический. Охлаждение и кристаллизация капли эвтектического состава, с содержанием компонентов 99% Si и 1% Ta происходит только по эвтектическому механизму $L \xrightarrow{\text{const } 1400,0^{\circ}\text{C}} \text{Э}(\text{TaSi}_2+\text{Si})$, т. е. распад сразу на две структурные составляющие Э(7%TaSi₂ + 93%Si). При кристаллизации эвтектики

кремний и тантал в жидкой капле диффундируют навстречу друг другу и концентрируются на противоположных участках частицы, образуя в конечном итоге Si и TaSi₂. Далее частицы охлаждаются от 1400⁰С до комнатной температуры и не претерпевая каких-либо изменений. На рис. 2. частицы TaSi₂ видны на поверхности кристалла кремния в виде темных образований.

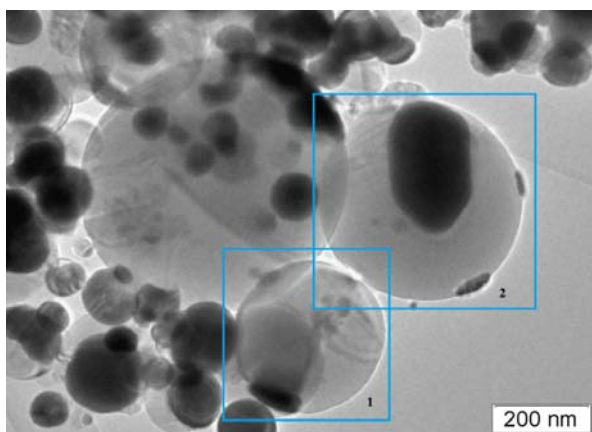


Рис.2. ПЭМ изображение наночастиц TaSi₂/Si с различной структурной формой:

- 1 – кремний с одной частицей TaSi₂,
- 2 – кремний с тремя частицами TaSi₂ различных размеров

- в третьем случае механизм кристаллизации – заэвтектический в капле кристаллизуется большое количество первичного кремния, а оставшееся количество жидкой фазы эвтектического состава претерпевает изотермический, эвтектический распад

$L \xrightarrow{\text{const } 1400,0^{\circ}\text{C}} \text{Э}(\text{TaSi}_2+\text{Si})$, причем кремний, выделяющийся в эвтектике Э(TaSi₂+Si), достраивает, ранее выделившиеся, первичные кристаллы кремния. Структурной составляющей как дисилицид тантала в таких наночастицах крайне мало, которые содержат первичные кристаллы кремния и эвтектику содержащую только 1% TaSi₂ остальное Si, поэтому в такой наночастице TaSi₂ по сравнению с кремнием и может быть не виден на снимках ПЭМ и наблюдается как частица кремния (рис. 3.)

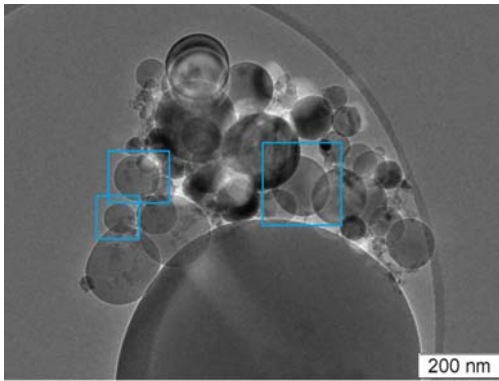


Рис.3. Фрагмент ПЭМ изображения частиц нанопорошка TaSi₂/Si, не содержащих TaSi₂

Особенности формирования наночастиц ядро-оболочка Cu/SiO₂

В процессе совместного испарения меди и кремния релятивистским пучком электронов [24], в транспортирующем инертном газе (аргон) образуются наноклапты, содержащие в основном медь и кремний. Наличие кислорода во всех марках испаряемой меди М0, М1 (ГОСТ РФ 859-2001), обуславливает его непосредственное участие в процессе формирования и кристаллизации. Скорость испарения меди выше, чем у кремния при одинаковых условиях, поэтому содержание кремния в парах значительно меньше, чем меди.

Особый интерес вызывает возникновение дифракционных полос в ядре наночастицы ядро-оболочка Cu/SiO₂. Конденсированный состав наноклапты при ее кристаллизации может содержать медь, кремний и кислород, при этом ее стехиометрический состав может быть следующим:

- только медь и кислород (кислород присутствует в виде оксидов в марках меди М0 – до 0,01% и М1 – до 0,03%);
- медь и кремний с кислородом в стехиометрической пропорции, достаточной только для образования диоксида кремния (SiO₂);
- медь и кремний с кислородом в количестве, достаточном не только для образования диоксида кремния, но и растворенного кремния в твердом α-Cu растворе;
- количества кремния в сплаве недостаточно, чтобы полностью связать кислород, содержащийся в меди;
- медь, кислород и кремний, содержание которого более 8% (вес.).

В первом случае, максимальное содержание кислорода в твердом растворе α-Cu составляет 0,03% при температуре 1066°C. При медленном охлаждении, вторичная перекристаллизация происходит с образованием равновесного Cu₂O по линии сольвуса (рис.4. а – линия предельной растворимости кислорода в меди). При быстром охлаждении происходит фиксация пересыщенного, однофазного, неравновесного твердого раствора α-Cu, который содержит растворенный кислород в междоузлиях кристаллической решетки меди.

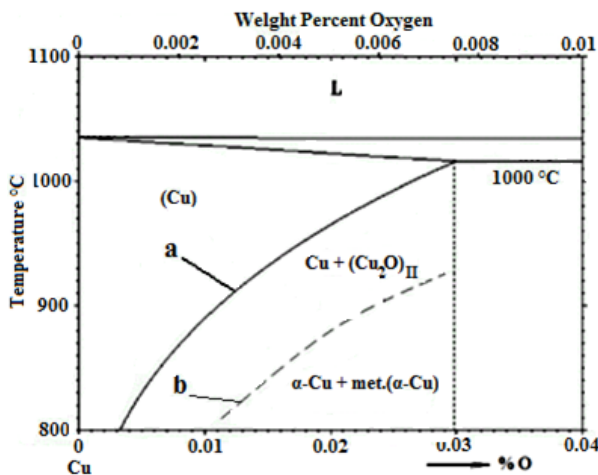


Рис. 4. Фрагмент фазовой диаграммы состояния Cu-Si: а – линия сольвуса начала образования Cu₂O, б – предполагаемая линия сольвуса для образования метастабильной фазы (met. α-Cu) [25]

Поскольку комнатная температура для цветных сплавов (металлов) является температурой достаточной для диффузионной подвижности атомов, но недостаточной для образования отдельных равновесных и стабильных фаз Cu₂O, можно предположить о диффузии и концентрации атомов кислорода в определенных областях с их увеличенным содержанием [26]. При этом существует граница между стабильной фазой α-Cu и "предвыделениями", содержащими кислород, но не являющиеся полноценным оксидом – куприт Cu₂O (рис. 4. б – линия предполагаемого сольвуса метастабильной фазы). В этом случае дифракционные полосы можно трактовать как "предвыделения" в виде зон Гинье-Престона (ЗГП) с размытой границей раздела со стабильной α-Cu фазой.

Во втором случае весь кислород и кремний после конденсации и кристаллизации связан в виде аморфного SiO_2 и вытеснен на поверхность ядра меди. Поскольку нет растворенных атомов кислорода или кремния в меди, то нет условий для образования неравновесных структур, следовательно, дифракционная картина в ядрах наночастицы не наблюдается.

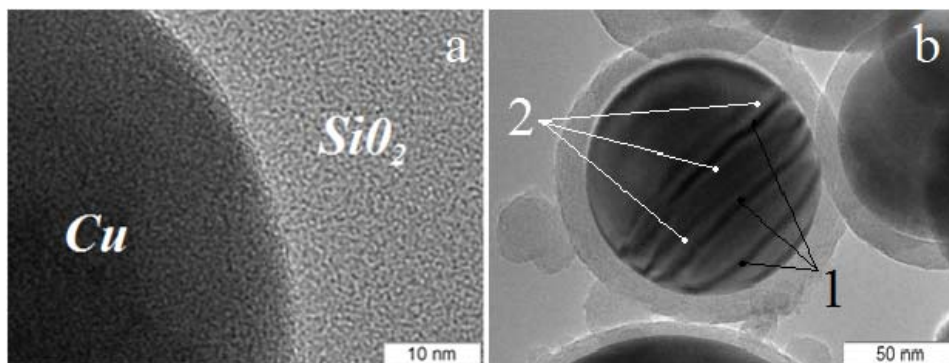


Рис. 5. Изображение наночастицы Cu/SiO_2 (изображения получены на ПЭМ):
 а – изображение границы медного ядра наночастицы и ее оболочки в виде аморфного диоксида кремния – SiO_2 ;
 б – предполагаемые метастабильные фазы в медном ядре наночастицы в виде темных дифракционных полос (1),
 стабильная $\alpha\text{-Cu}$ фаза (2)

В третьем случае в присутствии достаточно большого количества кремния в стехиометрической капле, процесс образования оксида меди невозможен потому, что весь кислород расходуется на образование диоксида кремния, ввиду большего сродства кислорода к кремнию, чем к меди. Это объясняется различием энергии Гиббса для реакций окисления компонентов, для меди при температуре 25°C она составляет $29,0 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot\text{моль})$, а для кремния – $80,8 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot\text{моль})$. Диоксид кремния, образующийся за счет кислорода, содержащегося в меди, будет вытеснен на поверхность капли в виде шлака, образуя оболочку SiO_2 [27]. Причина в меньшей удельной плотности диоксида кремния, равной примерно $2,2 \text{ г}/\text{см}^3$, чем у меди – $8,92 \text{ г}/\text{см}^3$. Поэтому, в нашем случае, уместно рассматривать систему, в которой отсутствует влияние кислорода на кристаллизацию системы Cu-Si [25]. В ядрах таких наночастиц, где повышенное содержание кремния, наблюдаются ярко выраженные дифракционные полосы в ядре $\alpha\text{-Cu}$ (рис. 5б). Анализ фазовой диаграммы Cu-Si (рис. 6) показывает, что максимальная растворимость кремния в $\alpha\text{-Cu}$ при температуре 552°C составляет $4,65\% \text{ Si}$ (вес).

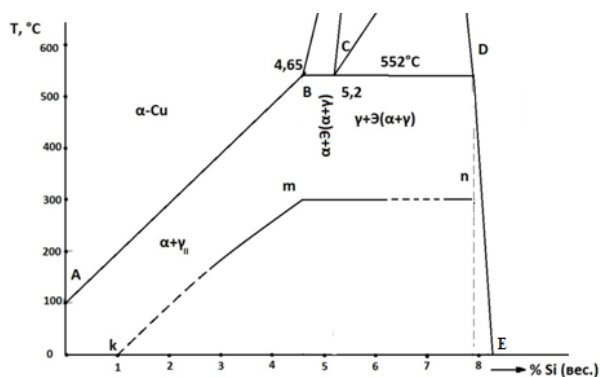


Рис. 6. Фрагмент фазовой диаграммы состояния Cu-Si

В нашем случае при быстром охлаждении фиксируется однофазный твердый раствор кремния в $\alpha\text{-Cu}$ растворе. При его образовании, охлаждении и естественном старении пересыщенного медного твердого раствора ядра наночастицы, происходит перераспределение кремния, в которых образуются метастабильные области с высоким содержанием кремния в виде темных дифракционных полос на снимках ПЭМ. Они как бы ”предвыделения” γ -фазы меди, хотя таковыми не являются. По нашему мнению, наблюдаемые дифракционные полосы в этих частицах представляют собой метастабильные фазы зон Гинье-Престона, т. е. участок $\alpha\text{-Cu}$ раствора уплотненный кремнием.

Поскольку для цветных сплавов комнатная температура является температурой достаточно высокой для диффузионной подвижности атомов растворенного компонента [28], то области образуются как во время охлаждения, так и в процессе длительного времени (естественное старение). Причем это не новая фаза, а участок исходного, матричного $\alpha\text{-Cu}$ твердого раствора, обогащенного растворенным кремнием. В отличие от промежуточных фаз с качественно иной структурой, характеризующихся собственной решеткой, зона Гинье-Престона имеет ту же решетку, что и матричный раствор, только она деформирована из-за различия в атомных диаметрах растворимого и растворителя. Между зоной

и окружающим твердым раствором нет четкой границы раздела. В отличие от концентрационных флуктуаций, которые непрерывно возникают и размываются тепловым движением, зоны Гинье-Престона длительное время устойчивы (при низких температурах — неопределенно долгое время). Экспериментально установлено, что с увеличением продолжительности старения, размер зон растет, причем более крупные зоны растут за счет растворения более мелких, т. е. точно также, как происходит коагуляция зерен кристаллов в твердом состоянии (собирательная рекристаллизация) [28]. При этом количество зон при данной температуре старения не зависит от состава сплава. В некоторых сплавах ЗГП образуются сразу же после закалки или даже во время закалочного охлаждения, в то время как промежуточные и стабильные фазы появляются через некоторый инкубационный период. Все эти факты свидетельствуют об отличии ЗГП от промежуточных и стабильных фаз. Поэтому ЗГП часто называют предвыделениями, чтобы отличить их от «истинных» выделений промежуточных и стабильных фаз с качественно иной структурой [28].

В отличие от такого структурного подхода, трактующего ЗГП как предвыделения, с термодинамической точки зрения их можно рассматривать как самостоятельную метастабильную фазу, промежуточную между матричным раствором и стабильной фазой. Таким образом, данные зоны можно рассматривать как вторую фазу, находящуюся в метастабильном равновесии с матричным раствором. Кроме того, ЗГП в двойной системе Cu-Si с ограниченной растворимостью кремния в твердом состоянии, может иметь свою линию сольвуса km (рис. 6), ниже которой образуются метастабильные фазы с высоким содержанием кремния в матричной кристаллической решетке α -Cu. Если рассматривать ЗГП как фазу, то при ее зарождении изменение свободной энергии сплава $\Delta U = -\Delta U_{об} + \Delta U_{пов} + \Delta U_{упр}$ ($U_{об}$ – общая энергия системы, $U_{пов}$ – поверхностная энергия кристалла, $U_{упр}$ – упругая составляющая энергии). Из-за когерентности зоны и матрицы составляющей $\Delta U_{пов}$ можно пренебречь, так как величина ее мала. Тогда при достаточно большом пересыщении энергетический барьер для зарождения зоны Гинье-Престона должен быть достаточно мал, чем и объясняется появление кластеров сразу после охлаждения с высокой скоростью или даже во время охлаждения. Для нас большое практическое значение имеет то, что ЗГП могут легко зарождаться по всему объему матричного твердого раствора и дают структуру равномерного распада с высокой плотностью (смотрите изображение на рис. 5b). Таким образом, дифракционные полосы в ядрах меди наночастицы ядро-оболочка нужно рассматривать как вторую метастабильную фазу, находящуюся в равновесии с матричным твердым раствором. Аналогично, с кривой расслоения km в твердом растворе α -Cu можно построить кривую сольвуса для γ -Cu с промежуточными предвыделениями. От других промежуточных фаз зоны Гинье-Престона отличаются строением границы раздела с матрицей. Эти зоны – полностью когерентные выделения и поэтому граница их раздела с матрицей размыта.

Так как точность определения межплоскостного расстояния методами электронной дифракции не превышает 1 \AA , то по его данным невозможно достаточно точно определить изменение межплоскостного расстояния плоскости $d_{(111)}$ α -Cu твердого раствора в дифракционных полосах ядра наночастицы, но можно предположить о фазовой неоднородности структуры [29]. Поэтому такие структуры необходимо трактовать как твердый раствор α -Cu матрицы с присутствием в нем областей метастабильных фаз с деформированной кристаллической решеткой.

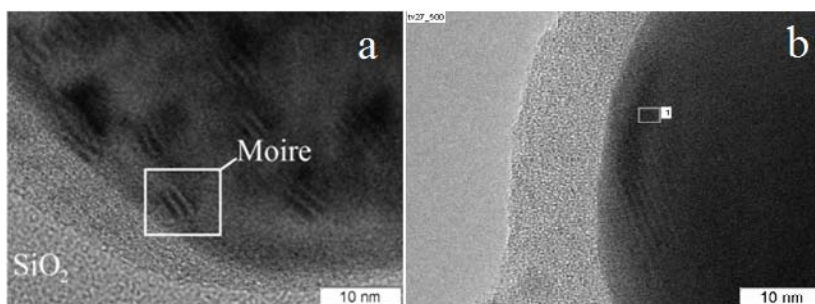


Рис. 7. а – муары в медном ядре наночастицы (изображения получены на ПЭМ) [3],
 б – SAED – анализ ядра наночастицы ядро-оболочка Cu/SiO₂

В четвертом случае образование наночастицы ядро-оболочка Cu/SiO₂ происходит как в третьем случае, но поскольку кремния недостаточно для полного связывания кислорода меди, образуется переходная зона, содержащая Cu₂O. Муары в таких частицах наблюдаются при возможном наложении двойной дифракции от двух и более кристаллов твердого раствора α -Cu (рис.7а) [30]. Наночастица, по данным анализа SAED, представляет собой как бы «сэндвич»: ядро α -Cu (рис.7б, межплоскостное

расстояние $d(111) \approx 2,0 \text{ \AA}$, что соответствует табличным данным для Cu), переходная зона – оксид меди Cu_2O (рис.8.а, межплоскостное расстояние $d(111) \approx 2,4 \text{ \AA}$) и оболочка – аморфный диоксид кремния, по данным EDAX, содержание кислорода в этой области – более 12% [24]. Высший оксид меди CuO обнаружен только на поверхности оболочки наночастицы из SiO_2 (рис.5b, межплоскостное расстояние $d(111) \approx 2,5 \text{ \AA}$).

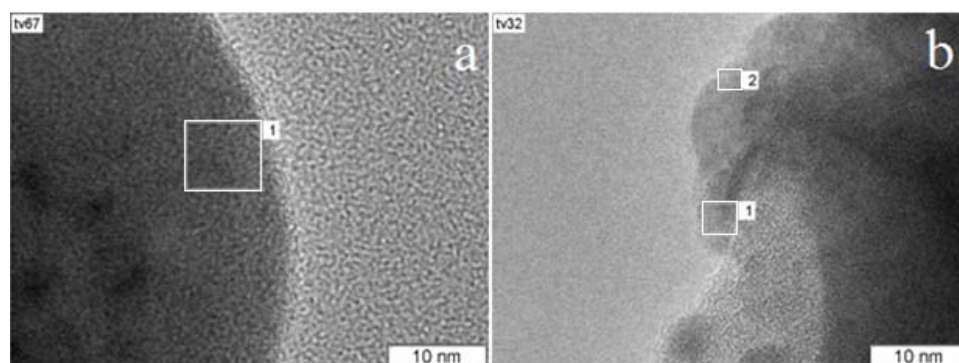


Рис. 8. SAED – анализ наночастицы ядро-оболочка Cu/SiO₂:
а – в переходной зоне между ядром и оболочкой, б – на поверхности оболочки

В пятом случае, когда содержание кремния от 8,3-8,5% до 13% (вес.), медь с кремнием в твердом состоянии при комнатной температуре образует непрерывный ряд твердых растворов меди α , γ , ϵ и η . Кремний, содержащий более 13% (вес.) меди, претерпевает эвтектический распад только на (η +Si) [25], структурно такой сплав содержит эвтектики в эвтектиках. В полученном порошке наночастиц кроме α -Cu других модификаций твердых растворов меди не наблюдалось.

Выводы

В целом проведенные в настоящей работе исследования являются основой в изучении процессов кристаллизации, образования и механизма формирования наноразмерных композитных частиц, при конденсации паров металлов и металлов с неметаллами. Изучение и поиск путей целенаправленного изменения свойств наноструктур, создания новых веществ, которые могут найти применение в различных областях современного материаловедения. Созданию композитных материалов стойких к внешним воздействиям. Придание стабильной работы электронных устройств в широком диапазоне температур, стойких при пиковых нагрузках.

Литература

1. Georgios A. Sotiriou, Ann M. Hir, Pierre-Yves Lozach, Gulbransen, E.A.; Andrew, K.F.; Brassart, F.A. Oxidation of silicon at high temperatures and low pressure under flow conditions and the vapor pressure of silicon. *J. Electrochem. Soc.* 1966, 113, 834–837.
2. Schlesinger M.E. //The Si-Ta (Silicon-Tantalum) System// University of Missouri-Rolla *Journal of Phase Equilibria* Vol. 15 No. 1.
3. Georgios A. Sotiriou, Ann M. Hir, Pierre-Yves Lozach, Alexandra Teleki, Frank Krumeich, and Sotiris E. Pratsinis // *Chem. Mater.* - 2011. 23 (7), pp. 1985–1992.
4. Fu X., Liu J., Yang H., Sun J., Li X., Zhang X., Jia Y. // *Materials Chemistry and Physics*. – 2011. V.130. I.1-2. P. 334-339.
5. Ravindra N.M., Jin L., Ivanov D., Menta V.R., Dieng L.M., Popov G., Gokce O.H., Grow J., Fiory A.T. // *J. of Electronic Materials*. – 2002. V.31. N.10. P.1074 -1079.
6. Номоев А.В., Бардаханов С.П. //Синтез и механизм образования янусподобных наночастиц силицида тантала-кремния (TaSi₂/Si)// Плазменная эмиссионная электроника : тр. IV междунар. Крейнделевского семинара (г. Улан-Удэ, 25-30 июня 2012 г.) / под ред. А. П. Семенова . – 2012. – С. 190-193.
7. Ravindra N.M., Jin L., Ivanov D., Menta V.R., Dieng L.M., Popov G., Gokce O.H., Grow J., Fiory A.T. // *J. of Electronic Materials*. – 2002. V.31. N.10. P.1074 -1079.
8. Hao Chen. // Dissertation. DAI-B 67/11, p. 6668, May 2007. University of Illinois at Urbana-Champaign. Publication Number 324814.
9. Temujin J., Bardakhanov S., Nomoev A., Minjigmaa A., Dugersuren G. *Bull. Mater. Sci.* . 2009; 32: 13. Nomoev A.V., Bardakhanov S.P. *Technical Physics Letters*. 2012; 38: 375–378.
10. Bardakhanov S.P., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavrukhin A.V., Salimov R.A., Fadeev S.N., Cherepkov V.V. *Elsevier, Mater. Sci. Eng. B*, 2006; 132: 204–208.
11. Bardakhanov S.P., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavrukhin A.V., Salimov R.A., Fadeev S.N., Cherepkov V.V. *Doklady Physics*. 2006; 51(7): 353–356.
12. Vesnin U.I. *Journal of Structural Chemistry*, 1995; 36(4): 724-730.
13. Vesnin U.I. Secondary structure and properties of crystals, Publishing house of SB RAS, Novosibirsk, 1997.
14. Niselson L.A., Yaroshevskiy A.G.. Interphase partition coefficients, Science, Moscow, 1992.
15. Ormont B. F. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 1978; 52: 342-348.

16. Gulyaev A.P. Metal science. College level textbook. 6th edition. Metallurgy, Moscow, 1986.
17. Vesnin Yu. I., Abstracts European Crystallographic Meeting ECM-18, B3-P8, Praha, 1998.
18. Meier K. Physical-chemical crystallography. Metallurgy, Moscow, 1972.
19. Ubbelohde A., Melting and crystalline structure, Mir, Moscow, 1969.
20. Burggraaf A. J., *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, 1983; 83: 208-215.
21. Nomoev A.V., Bardakhanov S.P., Schreiber M., Bazarova D.Zh., Baldanov B.B. and Romanov N.A.// Synthesis, Characterization, and Mechanism of Formation of Janus-Like Nanoparticles of Tantalum Silicide-Silicon (TaSi₂/Si)// *J. Nanomaterials*, 2015, P. 26-35
22. Nomoev A.V., Radnaev A.R., Baldanov B.B., Torhov N.A., Radnaev B.R., Romanov N.A, Schreiber M. Chemical Physics Letters Thermodynamic considerations in the formation of Janus-like TaSi₂/Sinanoparticles by electron-beam evaporation *Chemical Physics Letters* 637 (2015) 94–96.
23. Rajanikanth V. Joshi, Simulation of current-voltage Characteristics in Schottky barrier and MOS device structures, MS project report, NJIT, Unpublished, 2000.
24. Temuujin J., Bardakhanov S., Nomoev A., Minjigmaa A., Dugersuren G. *Bull. Mater. Sci.* . 2009; 32:
25. Lyakhishcheva N.P. Diagrams of conditions of double crystal systems: reference book in three volumes.: Vol. 2.–Engineering, Moscow, 1997. 1024 p.
26. Temuujin J., Bardakhanov S.P., Nomoev A.V., Zaikovskii V.I., Minjigmaa A., Dugersuren G. Van Riessen A. *Bull. Mater. Sci.* 2009; 32(5): 543–547.
27. Shishkin A.V., Basin A.S. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2004; 38: 660–668.
28. Gulyaev A.P. Metal science. College level textbook. 6th edition. Metallurgy, Moscow, 1986.
29. Shimmel G. Methods of electron microscopy. Mir, Moscow, 1972.
30. Nomoev A.V., Bardakhanov S.P., Schreiber M., Bazarova D.G., Romanov N.A., Baldanov B.B., Radnaev B.R., Syzrantsev V.V. *Beilstein J. Nanotechnol.* 2015, 6: 874–880.

Сведения об авторах

Раднаев Александр Рабданович, РФ, г. Улан-Удэ, 670000, ул. Смолина, 24а, Бурятский государственный университет, E-mail: radnaev.1961@mail.ru

Номоев Андрей Валерьевич, РФ, г. Улан-Удэ, 670000, ул. Смолина, 24а, Бурятский государственный университет, Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, E-mail: nomoevav@mail.ru

УДК 532.135

doi:10.18.101/978-5-9793-0883-8-12-15

Физико-механические свойства суспензий наночастиц на основе полимерных жидкостей

Б. Б. Бадмаев^{1,2}, Т. С. Дембелова¹, Д. Н. Макарова¹, А. Б. Цыренжапова¹, Б. В. Бадархаев¹

¹Институт физического материаловедения СО РАН,

670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, e-mail: lmf@ipms.bscnet.ru

²Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,

670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, e-mail: fizika@esstu.ru

Аннотация

В работе представлены результаты исследования физико-механических свойств коллоидных суспензий наночастиц диоксида кремния в полиэтилсилоксановой жидкости акустическим резонансным методом при частоте сдвиговых колебаний 73.2 кГц. Показано изменение вязкоупругих свойств суспензий в зависимости от концентрации и размеров наночастиц и от величины сдвиговой деформации.

Ключевые слова: наночастицы, коллоидные суспензии, модуль сдвига, вязкость, тангенс угла механических потерь, сдвиговая деформация, смазочные материалы.

Physical-mechanical Properties of the Nanoparticle Suspension Based on Polymer Liquids

B. B. Badmaev^{1,2}, T. S. Dembelova¹, D. N. Makarova¹, A. B. Tsyrenzhapova¹, B. V. Badarkhaev¹

¹Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Sakhyanova Str., 6, Ulan-Ude 670047, Russia, e-mail: lmf@ipms.bscnet.ru

²East-Siberia State University of Technology and Management, Kluchevskaya Str., 40V, Ulan-Ude 670013 Russia, e-mail: fizika@esstu.ru

Abstract

The paper presents the results of the study on physical and mechanical properties of colloidal suspensions of silica nanoparticles in polyethylsiloxane using acoustic resonance method at a frequency of 73.2 kHz shear oscillations. Changing of the viscoelastic properties of suspensions depending on the concentration and the size of nanoparticles and the magnitude of shear deformation have been discovered.

Keywords: nanoparticles, colloidal suspensions, shear modulus, viscosity, mechanical loss tangent, shear deformation, lubricants.