

**Д. Ю. Труфанов¹, А. П. Завьялов¹, К. В. Зобов¹
В. В. Сызранцев¹, С. П. Бардаханов¹⁻³**

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Бурятский государственный университет
ул. Смолина, 24а, Улан-Удэ, 670000, Россия*

³ *Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630073, Россия*

trufanov@itam.nsc.ru

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО ПРИМЕСНОГО СОСТАВА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НАНОПОРОШКА ДИОКСИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ИСПАРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ*

Работа посвящена анализу изменения элементного примесного состава при производстве нанопорошка методом испарения электронным пучком. Решена задача оценки условий в зоне испарения исходного вещества. Приведено теоретическое обоснование методики оценки условий испарения высокочистого кварцевого песка при получении нанопорошка диоксида кремния методом испарения электронным пучком. Оценка температуры испарения по изменению концентраций алюминия и титана составила 2493 К. Проведены экспериментальные измерения и сравнение элементного примесного состава испаряемого вещества и полученного нанопорошка для двух образцов диоксида кремния.

Ключевые слова: получение нанопорошков, испарение, диоксид кремния, примеси, электронный пучок.

Введение

Возрастающий интерес к наноразмерным порошкам поднимает все больше вопросов об их классификации и свойствах, на которые может оказать влияние метод их производства. Продолжающееся развитие методов производства и областей применения наноразмерных порошков показало кардинальное влияние методики производства на свойства нанопорошка. Создание и развитие методов производства часто приводит к получению нанопорошков сходных по размерам и составу, но различных по свойствам.

Это может приводить как к расширению области их применения, так и к невозможности применения в уже известных процессах. В связи с этим возникает вопрос о контроле параметров производственного процесса и отслеживании причин, вызывающих изменение производимых наночастиц.

Однако существует две группы сложностей, возникающих при контроле. Первая связана с измерением параметров самого нанопорошка. Малость размеров и сложность методик проведения каких-либо измерений в таких масштабах делает их почти нереализуемыми в процессе производства.

* Работа поддержана грантом РФФИ № 16-31-60076.

Вторая группа связана с критическими условиями производства. Часто используются высокие давления, температуры, токи, плазменные эффекты. Например, в универсальном методе производства нанопорошков испарением электронным пучком присутствует ряд таких условий [1; 2]. Высокая температура (кипение исходного сырья) исключает возможность использования контактных методов измерения температуры или давления в зоне испарения. Тормозное излучение пучка электронов, используемого в качестве источника нагрева, сильно осложняет и бесконтактные методы измерения. Дополнительные проблемы для использования, например, пирометров или тепловизоров, создает наличие разгоряченного парами газа носителя на пути между приемником детектора и непосредственной зоной испарения. Все эти факторы значительно затрудняют контроль протекания процессов во время образования наночастиц.

Две эти группы сложностей приводят к необходимости строить модели процесса получения нанопорошка, опирающиеся на параметры исходного сырья и конечного продукта, без точных данных о параметрах самого процесса.

Целью представленной работы было создание и апробация косвенного метода оценки условий, испарения исходного вещества при получении нанопорошка методом испарения электронным пучком высокой энергии. В работе приведено теоретическое расчетное описание процесса и его сравнение с измерением элементного примесного состава испаряемого вещества и полученного нанопорошка диоксида кремния.

Метод и материалы

Метод производства наночастиц

В работах [1; 2] описан относительно новый продуктивный способ получения нанопорошков диоксида кремния, в котором используется установка со сфокусированным пучком электронов, выпущенным в атмосферу воздуха при энергии 1,4 МэВ. При воздействии ускоренными электронами на твердое тело, в данном случае кварцевый песок, энергия выделяется непосредственно в объеме вещества на глубине нескольких миллиметров [3], вызывая ионизацию вещества и разогрев этого слоя. При достаточной

мощности температура поверхностного слоя расплавленного жидкого вещества достигает температуры кипения, т. е. начинается интенсивное испарение вещества. Энергия ускоренных электронов расходуется в основном на нагрев и испарение кварцевого песка, излучение с поверхности расплавленной жидкости и нагрев воздуха в реакторе. Потери энергии с отраженными электронами составляют 5–15 % [4].

Примесный состав материала мишени (области, подвергающейся испарению) может влиять на динамику его испарения, а следовательно, на размеры частиц и их состав. Ранее подобного рода влияния детально не рассматривались, хотя неоднократно отмечалось [1; 2], что происходит очистка материала исходного вещества. Однако подробный анализ примесного состава исходного материала и получаемого нанопорошка выявляет их заметные отличия.

Метод измерения примесного состава

Анализ состава примесей проводился совместно со специалистами Института неорганической химии СО РАН методом атомно-эмиссионной спектроскопии индуктивно-связанной плазмы (ИСП-АЭС). Эта методика предназначена для определения примесей в кремнии и диоксиде кремния высокой чистоты в интервале концентраций 10^{-1} – 10^{-8} масс. %. Она основана на предварительном удалении основного элемента – кремния – в виде тетрафторида и растворении остатка в разбавленной азотной кислоте. Далее раствор анализируемого вещества вводится в горелку ИСП в форме водного аэрозоля. Излучаемый атомами или ионами в ИСП свет преобразуется фотоумножителем спектрометра в электрический сигнал. Интенсивность полученного сигнала сравнивается с предварительно измеренной интенсивностью для раствора элемента известной концентрации; по этим измерениям рассчитывается искомая концентрация.

Модель изменения примесного состава вещества

Основное вещество с примесями можно рассматривать в качестве раствора, в котором основное вещество выступает в роли растворителя. Малая концентрация раство-

ренного вещества позволяет описывать свойства основного вещества – растворителя – так, как если бы раствор был идеальным. Поскольку в данной работе использовались достаточно чистые материалы (> 99 %), то раствор можно считать предельно разбавленным и обладающим свойствами идеального раствора. Отсутствие химического взаимодействия между растворителем и примесями позволяет также рассматривать последние как компоненты идеального раствора.

В этом случае справедлив закон Рауля [5]: «Равновесное в идеальном растворе парциальное давление пара i -го компонента P_i пропорционально мольной доле этого компонента X_i ». Коэффициент пропорциональности для идеального раствора равен парциальному давлению насыщенного пара над чистым компонентом при той же температуре P_{i^0} :

$$P_i(T) = P_{i^0}(T) X_i. \quad (1)$$

Величины, относящиеся к основному веществу (растворителю), будем обозначать индексом «s» (solvent). Выражение (1) тогда преобразуется так:

$$\frac{P_{s^0}(T) - P_i(T)}{P_{s^0}(T)} = 1 - X_s = \sum X_i. \quad (2)$$

Выражение (2) есть иная формулировка закона Рауля (1). Оно свидетельствует о том, что для идеальных растворов давление пара растворителя P_s над поверхностью раствора меньше давления пара P_{s^0} над чистым веществом растворителя и определяется только суммарной мольной долей всех растворенных веществ. Кинетически этот результат объясняется тем, что в приповерхностном испаряющемся слое часть объема занята молекулами растворенного вещества, что не дает пересекать границу испарения молекулами растворителя столь же интенсивно, как они могли бы это делать при испарении чистого вещества. Однако для высокочистых веществ суммарная мольная доля примесей невелика, и отклонение от давления над чистым веществом растворителя обнаружить практически невозможно.

Полное парциальное давление паров над раствором есть сумма давлений отдельных компонент:

$$P(T) = \sum P_{i^0}(T) X_i. \quad (3)$$

Поскольку зависимость давления от температуры различна для различных веществ, то суммарное давление P отличается от давления паров над чистым растворителем P_{s^0} . Если растворенные вещества более летучи, чем растворитель, то давление паров $P(T)$ при той же температуре будет превышать значение $P_{s^0}(T)$. Если менее летучи, то давление паров $P(T)$ будет меньше $P_{s^0}(T)$. В частности, для двухкомпонентного идеального раствора при полностью нелетучем растворенном веществе температура кипения идеального раствора выше, чем растворителя, и разница пропорциональна мольной концентрации растворенного вещества.

Используя уравнение состояния идеального газа в виде $P = c * k * T$ для (1) и (3), получим для концентраций паров c :

$$c_i(T) = c_{i^0}(T) X_i. \quad (4a)$$

$$c(T) = c_{s^0}(T) (1 - \sum X_i) + \sum c_{i^0}(T) X_i. \quad (4b)$$

Выражение (4b) показывает, что наличие примесей с меньшей летучестью уменьшает суммарную концентрацию паров, что может выражаться в уменьшении производительности процесса испарения. Для высокочистых веществ суммарная мольная доля примесей невелика и общая концентрация паров над чистым растворителем $c(T) \approx c_{s^0}(T)$.

Выражение (4a) показывает, как концентрация отдельных компонент изменяется при испарении вещества. Из (4a) можно получить выражение для мольной концентрации примесей в парах X_i' :

$$\frac{c_i(T)}{c_s(T)} = X_i = \frac{c_{i^0}(T)}{c_{s^0}(T)} \frac{X_i}{1 - \sum X_i}. \quad (5)$$

Для высокочистых веществ соотношение (5) малопригодно ввиду большой ошибки в

определении отношения $X_i/(1 - \sum X_i)$. Это связано с тем, что примесный состав отдельных компонент X_i может быть измерен достаточно точно. Однако конечная чистота основного вещества (растворителя) $1 - \sum X_i$ известна намного хуже. По этой причине эффективнее опираться на относительные изменения концентраций компонент примесей:

$$\frac{c_i(T)}{c_s(T)} = \frac{X_i}{X_j} = \frac{c_{i^0}(T)}{c_{j^0}(T)} \frac{X_i}{X_j}. \quad (6)$$

Выражения (4)–(6), основанные на законе Рауля (1), отражают причины и закономерности изменения примесного состава вещества при его испарении и дальнейшей конденсации в виде наночастиц. Перепишем (6), выражающее соотношение между мольными долями в конденсированном веществе и его парах, в несколько ином виде:

$$\frac{c_{i^0}(T)}{c_{j^0}(T)} = \frac{X_i/X_i}{X_j/X_j}. \quad (7)$$

При известных зависимостях концентрации паров чистых веществ от температуры $c_{i^0}(T)$ в левой части выражения (7) оказывается известная функция температуры. Поэтому, если известны соотношения мольной концентрации примесей соответствующих веществ в конденсированном состоянии X_i и парах X_i' , выражение (7) позволяет узнать температуру T , при которой происходит испарение.

Из эксперимента нам известен примесный элементный состав испаряемого материала и полученного из паров нанопорошка. Чтобы применить выражение (7) для оценки температуры испарения материала мишени, необходимо сделать некоторые дополнительные предположения и уточнения.

Во-первых, элементный состав примесей в нанопорошке будем считать точно соответствующим элементному составу примесей в парах вещества мишени, при конденсации которых и формируется нанопорошок. Вопрос о том, насколько примесный состав паров соответствует примесному составу

получаемых в процессе наночастиц, будет обсуждаться далее.

Во-вторых, по измерениям примесного состава нам известны молярные концентрации элементов примесных веществ. В то время как при получении выражения (7) рассматривалось испарение веществ. Связь между мольными концентрациями вещества X_i и соответствующего ему элемента χ_i задается через стехиометрический индекс I_i , с которым данный элемент входит в состав вещества:

$$X_i = \chi_i / I_i. \quad (8)$$

Например, титан Ti и алюминий Al предполагаются входящими в состав исходного вещества в своих оксидных формах TiO_2 и Al_2O_3 , поэтому для этих элементов получаем

$$\begin{aligned} X_{TiO_2} &= \chi_{Ti} I_{TiO_2} = \chi_{Ti}, \\ X_{Al_2O_3} &= \chi_{Al} I_{Al_2O_3} = \chi_{Al}^2. \end{aligned} \quad (9)$$

В-третьих, выражение (7) получено для примесных веществ, испаряющихся без изменения состава. Мы предполагаем, что вещества испаряются с разложением. В этом случае пары над чистым веществом лишь в сумме по составу соответствуют стехиометрии испаряемого вещества. И хотя общая оценка концентрации частиц в паре на основе закона для идеальных газов остается верной, для оценки концентрации конкретного элемента в парах необходимо знать отдельно концентрацию паров всех компонент. При этом концентрация в парах i -го элемента будет суммой концентраций паров отдельных компонент, умноженных на соответствующие стехиометрические индексы, с которыми данный элемент входит в состав присутствующих в парах веществ:

$$c_{i^0}(T) = \sum_k I_k c_{ik^0}(T). \quad (10)$$

Можно рассмотреть испарение с разложением в два этапа: сначала разложение в конденсированном состоянии с той же эффективностью, что и при испарении, а затем испарение уже продуктов разложения. Тогда в качестве концентрации паров примеси в выражении (5) можно использовать кон-

центрацию элемента (10). В этом случае выражение (5) даст значение мольной концентрации элемента в парах:

$$\frac{c_i(T)}{c_s(T)} = \frac{c_{i^0}(T)}{c_{s^0}(T)} \frac{X_i}{1 - \sum X_i} = \frac{\sum_k I_k c_{ik^0}(T)}{c_{s^0}(T)} \frac{\chi_i/I_i}{1 - \sum X_i} = \chi_i. \quad (11)$$

Тогда аналогичное (7) выражение будет выглядеть так:

$$\frac{c_{i^0}(T)}{c_{j^0}(T)} = \frac{I_i \chi_i/\chi_i}{I_j \chi_j/\chi_j}. \quad (12)$$

Выражение (12) в дальнейшем и будет использовано для оценки условий испарения материала по различиям в концентрации примесных элементов в нанопорошке и исходном материале.

Результаты

Состав примесей в исходном сырье

Для анализа были взяты нанопорошки диоксида кремния произведенные из высокочистого кварца. В качестве исходных использовали следующие материалы.

Материал № 1. Кварцевый песок одного из месторождений Читинской области (чистота ~ 99,99 %);

Материал № 2. Кварцевый песок месторождения в Республике Якутия (тонкий помол, но загрязнен материалами мелющего оборудования – чистота ~ 99 %).

На рис. 1 приведены данные по обнаруженным в исходных материалах элементам примесей. Как видно, материал № 1 обладает наименьшей концентрацией примесей по большинству элементов. Основными примесными элементами являются Al, Ca, Fe, K, Na. Материал № 2 обладает меньшей степенью чистоты. Он имеет значительно большее содержание Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Ni, Ti, Zn и Zr. Все эти элементы входят в состав различных высокопрочных сплавов, что может указывать на загрязнение материала № 2 материалами мелющего оборудования.

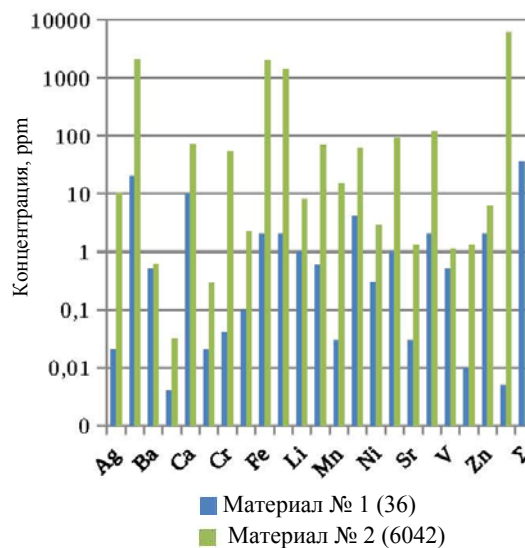


Рис. 1. Элементный состав примесей в исходных материалах. Σ – суммарная концентрация обнаруженных примесей (значение приведено в легенде), ppm

Оценка чистоты вещества и температуры испарения будут проводиться для Al и Ti. Значения для остальных элементов может быть искажено за счет различных факторов. В частности, Na, P, K содержатся в большинстве органических веществ и неизбежно вносятся при контакте с человеком. Fe входит в состав элементов тракта, в том числе сублиматора, где происходит испарение материалов.

Образцы нанопорошков, полученные из сырья № 1

Материал № 1 использовался при получении нанопорошков при воздействии на материал в течение 30 мин электронным пучком мощностью 12,6 кВт с расстояния 17,5 мм (расход воздуха 70 л/мин). Для изучения состава примесей были отобраны два образца:

- образец № 1.1 собран с фильтра;
- образец № 1.2 собран со стенок герметичного пластикового бокса, где располагался фильтр.

На рис. 2 приведены данные по обнаруженным в наночастицах элементам примесей в сравнении с примесным составом материала, из которого были получены нанопорошки.

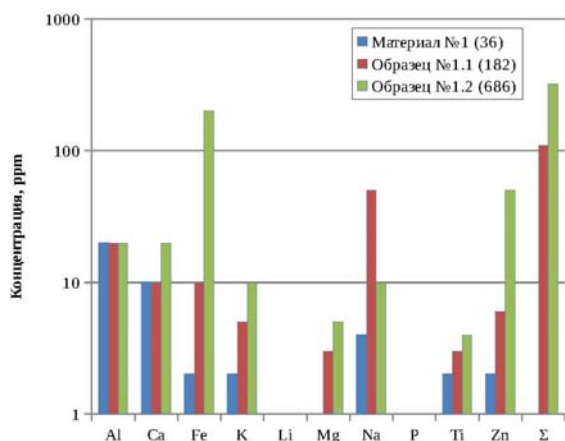


Рис. 2. Элементный примесный состав материала № 1 и полученных из него образцов нанопорошка. Σ – суммарная концентрация обнаруженных примесей (значение приведено в легенде), ppm

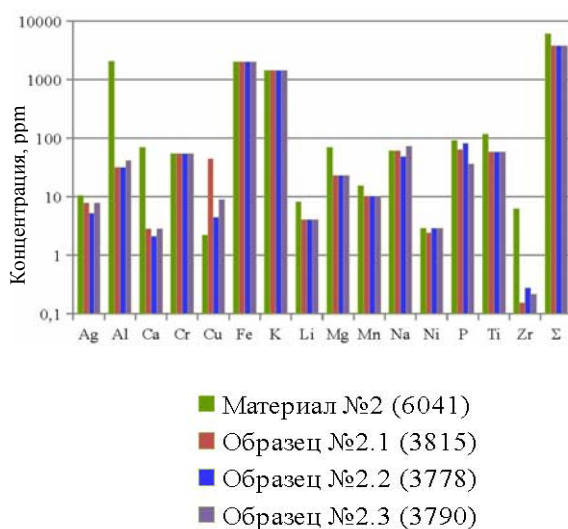


Рис. 3. Элементный примесный состав материала № 2 и полученных из него образцов нанопорошка. Σ – суммарная концентрация обнаруженных примесей (значение приведено в легенде), ppm

В целом образцы нанопорошков № 1.1 и 1.2 содержат большую концентрацию примесей, чем исходный высокочистый материал № 1. Одной из причин увеличения концентрации примесей может быть загрязнение веществами, при работе с которыми ранее на данной установке использовались отдельные блоки экспериментального тракта,

в частности при получении других нанопорошков.

С загрязнениями следует связывать увеличение концентрации таких элементов, как W, Ca, Mg, которые в своих оксидных формах являются малолетучими по сравнению с SiO_2 веществами.

Так как в этих экспериментах использовался высокочистый материал, то результаты, приведенные на рис. 2, можно использовать в дальнейшем для оценки количества примесей, вносимых в образцы в качестве загрязнений, не связанных с эволюцией примесного состава в процессе получения нанопорошка через испарение и конденсацию материала мишени.

Образцы нанопорошков, полученные из сырья № 2

Материал № 2 использовался в серии экспериментов по исследованию влияния мощности электронного пучка на химическую чистоту получаемого материала, в которых прочие условия получения оставались постоянными (расстояние 17 мм, расход воздуха 54,6 л/мин). Всего было получено три образца:

- образец № 2.1 собран из герметичного бокса после 40 мин воздействия электронным пучком мощностью 12,6 кВт;
- образец № 2.2 собран из герметичного бокса после двукратного воздействия на мишень в течение 30 мин (суммарно 60 мин) электронным пучком мощностью 14 кВт;
- образец № 2.3 собран из герметичного бокса после двукратного воздействия на мишень в течение 20 мин (суммарно 40 мин) электронным пучком мощностью 15,4 кВт.

На рис. 3 приведены данные по обнаруженным в образцах примесям в сравнении с примесным составом исходного материала.

Образцы нанопорошков № 2.1, 2.2 и 2.3 по большинству элементов содержат сопоставимое или меньшее число примесей, чем исходный материал № 2. Ситуация обратная только для Cu и Zn. Однако по экспериментам при испарении мишеней из материала № 1 видно, что увеличение концентрации этих элементов может быть связано с загрязнением образцов, поскольку они входят в состав материалов экспериментального тракта.

Оценка условий испарения материала мишени

Получение нанопорошков диоксида кремния SiO_2 происходило в воздушной атмосфере путем испарения высокочистого кварцевого материала. Несмотря на то, что испарение SiO_2 идет с разложением, можно считать, что в насыщенной кислородом атмосфере происходит доокисление до высшей степени оксида. Это же касается и наиболее важных примесей – элементов Ti и Al, которые, как предполагается, находятся в исходном материале в оксидных формах – TiO_2 и Al_2O_3 . Поскольку все вещества – SiO_2 , TiO_2 и Al_2O_3 – являются твердыми веществами при нормальных условиях, то можно считать, что примесный состав нанопорошков по элементам Ti и Al в точности соответствует соотношению концентраций этих элементов в парах, из которых формируются наночастицы.

На рис. 4 приведена расчетная зависимость отношения концентрации паров над расплавом оксида алюминия Al_2O_3 в пересчете на элементарный алюминий Al по всем компонентам пара к концентрации паров над расплавом диоксида титана TiO_2 в пересчете на элементарный титан Ti по всем компонентам пара $c_{\text{Al}^0}/c_{\text{Ti}^0}$ в виде зависимости от температуры T , построенная по описанному в [6] методу с использованием данных о термодинамических функциях веществ из [7], что соответствует левой части выражения (12). Точкой отмечено значение, рассчитанное в соответствии с (12) по экспериментальным данным о примесном составе материала № 2 и нанопорошка, полученного вследствие испарения. Также отмечены значения, рассчитанные в соответствии с правой частью выражения (12) по данным из рис. 2, 3 о величине элементного примесного состава алюминия Al и титана Ti в материале № 2 и соответствующего нанопорошка, примесный состав которого считается соответствующим примесному составу паров.

Таким образом, данные о примесном составе алюминия Al и титана Ti в исходном материале и полученных нанопорошках совместно с рассчитанными зависимостями концентраций различных компонент паров над чистыми веществами позволяют получить оценки температуры испарения мате-

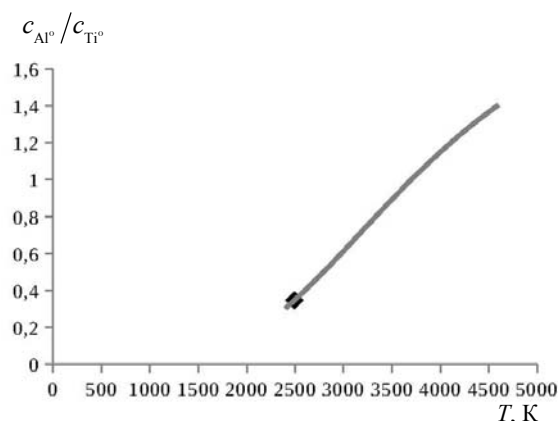


Рис. 4. Соотношение концентраций элементарных алюминия Al и титана Ti в парах чистых Al_2O_3 и TiO_2 , построенное по расчетным данным $c_{\text{Al}^0}/c_{\text{Ti}^0}$ в зависимости от температуры T

риала мишени в соответствии с выражением (12). Результат оценки этой температуры составляет 2493 K, а давление паров основного вещества (SiO_2) – 0,226 атм.

Выводы

Исследования элементного состава свидетельствуют о его изменении в процессе трансформации испаряемого вещества из конденсированной макроскопической фазы в наноразмерные частицы.

На основе отличий в составе примесей исходного материала и получаемого нанопорошка разработана методика оценки условий испарения.

Оценка температуры испарения по изменению концентраций алюминия и титана составила 2493 K.

Если содержание некоторых примесных элементов (Al, Ca, Mg, Zr) в исходном сырье велико, то их содержание в нанопорошке уменьшается. Это может быть связано со слабой испаряемостью в условиях синтеза веществ, содержащих эти элементы.

Список литературы

1. Бардаханов С. П., Корчагин А. И., Куксанов Н. К., Лаврухин А. В., Салимов Р. А., Фадеев С. Н., Черепков В. В. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении // Докл. АН. 2006. Т. 409, № 3. С. 320–323.

2. Bardakhanov S. P., Korchagin A. I., Kusanov N. K., Lavrukhin A. V., Salimov R. A., Fadeev S. N., Cherepkov V. V. Nanopowder production based on technology of solid raw substances evaporation by electron beam accelerator // *Materials Science and Engineering*: B. 2006. Vol. 132, № 1-2. P. 204–208.

3. Баранов В. Ф. Дозиметрия электронного излучения. М.: Атомиздат, 1974.

4. Ito R., Andreo P., Tabata T. Reflection of electrons and protons from solid bombarded by 0.1 to 100 MeV electrons // *J. Radiat. Phys. Chem.* 1993. Vol. 42. No. 4–6. P. 761–764.

5. Стромберг А. Г., Семченко Д. П. Физическая химия. М.: Высш. шк., 1999. 527 с.

6. Голковский М. Г., Труфанов Д. Ю., Завьялов А. П., Лысенко В. И., Бардаханов С. П. Оценка парциального давления паров для различных оксидов // *Теплофизика и аэромеханика*. 2012. Т. 19, № 3. С. 369–374.

7. Глушко В. П., Гурвич Л. В., Бергман Г. А., Вейц И. В., Медведев В. А., Хачкурузов Г. А., Юнгман В. С. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. изд.: В 4 т. 3-е изд. М.: Наука, 1978–1982.

Материал поступил в редколлегию 04.03.2018

**D. Yu. Ttufanov¹, A. P. Zavjalov¹, K. V. Zobov¹
V. V. Syzrantsev^{1,2}, S. P. Bardakhanov¹⁻³**

¹ *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

² *Buryat State University
24a Smolin Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

³ *Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation*

ttufanov@itam.nsc.ru

ANALYSIS OF CHANGES IN THE ELEMENTAL IMPURITY COMPOSITION IN THE SILICA NANOPOWDER SYNTHESIS BY ELECTRON BEAM EVAPORATION

The paper analyzes the changes in elemental impurity composition in the nanopowder synthesis by electron beam evaporation. The conditions in the zone of the initial material evaporation were evaluated. The theoretical justification of the method described of the conditions evaluation at evaporation of high-purity quartz sand in the process of silica nanopowder synthesis by electron beam evaporation.

Estimated evaporation temperature due to change of the aluminum and titanium concentrations was 2493 K.

The experimental measurement and comparison of the elemental impurity compositions of the vaporized material and the resulting nanopowder for two silica samples had been conducted.

Keywords: special surface, particle size, synthesis of nanoparticles, electron beam.

For citation:

*Ttufanov D. Yu., Zavjalov A. P., Zobov K. V., Syzrantsev V. V., Bardakhanov S. P. Analysis of Changes in the Elemental Impurity Composition in the Silica Nanopowder Synthesis by Electron Beam Evaporation. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 2, p. 53–60. (In Russ.)*

DOI 10.25205/2541-9447-2018-13-2-53-60