

УДК 621.762

**МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РЕАКЦИОННОГО СПЕКАНИЯ
ПОЛНОТЕЛЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ КРЕМНИЯ В АЗОТЕ**

Н.К. Касмамытов, Л.О. Сатаев, Н.Ж. Кайрыев

**MODEL STUDIES OF REACTION SINTERING KINETICS, SOLID SPHERICAL
PARTICLES OF SILICON IN NITROGEN**

N.K. Kasmanyrov, L.O. Sataev, N.J. Kajryev

Аннотация. В работе проведен краткий анализ формирования микроструктуры реакционно-спечённого нитрида кремния на базе собственных экспериментальных данных и на её основе смоделирована обобщенная физическая схема кинетики синтеза нитрида кремния. С учётом этого сформулирована физико-математическая модель реакционного спекания полнотелых частиц кремния шаровидной формы в атмосфере азота. Приведены основные дифференциальные уравнения и представлены их решения с заданными начальными и граничными условиями.

Ключевые слова: кремний; азот; спекание; реакция; нитрид кремния; формирование структуры, модель; дифференциальные уравнения.

Abstract. In the work a short analysis of the formation of microstructure of reactive sintering of silicon nitride based on experimental data and modeled based on generalized physical schema kinetics of the synthesis of silicon nitride. Taking into account the physical and mathematical model formulated reaction sintering solid particles of silica spherical shape in a nitrogen atmosphere. Provides basic differential equations and their solutions are presented with the given initial and boundary conditions.

Keywords: model; differential equations; initial and boundary conditions; silicon; nitrogen; formation of the microstructure, reactionary; silicon nitride bonding.

Введение

В производстве полупроводниковых кремниевых пластин образуются вторичные отходы кремния в большом количестве в виде микростружки, шлама, скрапа и других, которые выбрасываются в отвал. Утилизация отходов полупроводникового кремния методами порошковой металлургии являются перспективными. Переработанные кремниевые отходы полупроводникового производства представляют собой ультрадисперсный порошок кремния. Из этих кремниевых порошков методом термопластического литья изготавливают требуемые шликерные изделия различной конфигурации, которые на конечной стадии получения подвергаются реакционному спеканию в атмосфере азота. Путем реакционного спекания ультрадисперсных порошков кремния в среде азота получают наноструктурированные керамокомпозиционные материалы на основе нитрида и карбонитрида кремния с повышенными значениями жаростойкости и термостойкости. В работе [1,2] подробно описаны синтез, особенности формирования структуры и свойств нитрида кремния.

В наших работах [3,4] разработаны способы получения керамокомпозиционных материалов на основе нитрида и карбонитрида кремния, а также изучены особенности их структурообразования и физико-химические свойства. Керамокомпозиционные материалы на основе нитрида и карбонитрида кремния, полученные реакционным спеканием, обладают высокими термостойкими, жаропрочными свойствами, с большим сопротивлением высокотемпературной ползучести. Реакционно-спечённые керамокомпозиционные материалы, состоящие из соединений α - Si_3N_4 , β - Si_3N_4 и нестехиометрического β' - Si_xN_y в виде ультрадисперсных нитевидных кристаллов, благодаря своим уникальным физико-

химическим свойствам, они могут применяться в различных областях современной промышленности в качестве огнеупорных и термостойких материалов в машиностроении, полупроводниковой промышленности, химической и авиационной промышленности, черной и цветной металлургии и многих других. Для промышленного производства требуются керамокомпозиционные изделия различной конфигурации, различных форм и размеров толщин стенок изделия. Для технологической разработки конкретных видов керамокомпозиционных изделий на основе нитрида кремния различной конфигурации требуется провести большой ряд дорогостоящих экспериментальных исследований по оптимизации реакционного спекания с целью получения качественного нитридокремниевое изделия с требуемыми свойствами. В связи с этим, в настоящей работе представляло интерес разработать физико-математическую модель реакционного спекания кремния в среде азота и на её основе изучить особенности кинетики окончательного формирования нитрида кремния в процессе синтеза с учетом формы и размеров изделия. Разработка модели и на её основе изучение процесса синтеза нитрида кремния существенно позволяет сократить дорогостоящие эксперименты.

В работах [5-8] представлены результаты экспериментальных исследований о закономерностях реакционного спекания кристаллического кремния в среде азота, где детально изучено эволюционное формирование микроструктуры на различных стадиях реакционного спекания порошков кремния в атмосфере азота. Показано, что микроструктура реакционно спечённого нитрида кремния формируется поэтапно. На первом этапе, происходит диффузионное формирование насыщенных твёрдых растворов Si-N, первоначально на поверхности кремниевой частицы с постепенным диффузионным переходом вглубь к центру частицы. С помощью локального микрорентгеноспектрального анализа было показано, что микроструктура у сформировавшихся частиц нитрида кремния на различных этапах процесса реакционного синтеза, как правило, в центре (в ядре) крупных частиц имеется остаточный не прореагировавший с азотом кремний. В поверхностных слоях этих же реакционно сформировавшихся частиц массовое содержание кремния Si и азота N в процентном соотношении соответствует пропорции 3:4 соответственно. Этот факт позволяет трактовать о том, что в поверхностных слоях крупных частиц кремния в результате кристаллохимической реакции с азотом сформировалось новое соединение - нитрид кремния Si_3N_4 как продукт реакции, а в центральной части частицы - кремний ещё не прореагировал с азотом. Рентгенофазовый анализ реакционно-спечённых образцов нитрида кремния также однозначно показывает наличие в их структуре остаточного непрореагировавшего кремния. Также следует отметить, что процесс реакционного спекания кремния с азотом сопровождается без усадки спрессованного брикета [5,6,8].

Физико-математическая модель

Отметим, что в предыдущих работах [9,10] нами была разработана одномерная и двухмерная нестационарные модели реакционного спекания для заданных цилиндрических шликерных брикетов кремния с заданными давлениями атмосферы азота в камере электропечи. Следует отметить, что расчётные данные по этим моделям удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

В настоящей работе, представляло интерес провести модельные исследования кинетики реакционного спекания на полнотелых частицах кремния шаровой формы в среде азота.

Реакционное спекание кристаллического кремния в среде газообразного азота в наиболее общем случае можно представить в виде гетерогенного процесса, протекающий в системе реагентов «твёрдое вещество (Si) – газ (N_2)», а в продукте кристаллохимической реакции образуется новое твёрдое кристаллическое вещество (соединение Si_3N_4):



Для модельного описания кинетики реакционного спекания кристаллического кремния в газовой среде азота рассматривался одиночный объект, представляющий собой полнотелую сферическую частицу кремния. Причём поверхность этой сферической частицы кремния постоянно находится в обтекаемой среде газового потока азота. Для численного расчёта кинетики гетерогенной реакции в виде (1) использовали кинетическую модель с фронтальным перемещением зоны реакции вглубь частицы кремния [11] с учетом наших собственных экспериментальных данных.

Для реализации модели реакционного спекания кремния с азотом нами было сделано ряд предположений: во-первых, в процессе реакционного спекания сферическая частица не изменяет своего первоначального (до реакции) размера; во-вторых, протекающая химическая реакция между реагентами является необратимой; в третьих, реакция происходит с наличием «резкой» границы (фронтом) между слоями прореагировавшего и непрореагировавшего кристаллического кремния, и наконец, в четвёртых рассматриваемая модель не учитывает зёрненную микроструктуру полнотелой сферической частицы кремния, а рассматривает её как сплошное беспористое тело.

Физическая суть разработанной модели заключается в следующем. Схематично вышерассмотренную физическую модель эволюции реакционного спекания кремния с азотом с течением времени можно проиллюстрировать с помощью трёх последовательных рисунков, как показано на рис. 1.

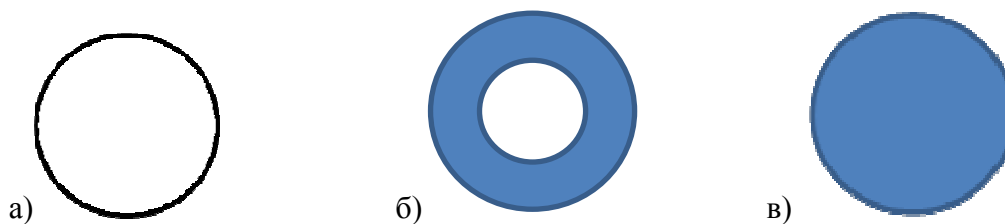


Рисунок 1 – Формирование профильного разреза по изменению концентрации химически связанного азота в сферической частице кремния в различные моменты времени реакции по модели: а) – кристаллический кремний до реакции; б) – промежуточный момент реакции, в котором имеется непрореагировавшее ядро; в) – полностью прореагировавшая частица кремния с азотом

Согласно этой модели кристаллохимическая реакция вначале протекает на внешней поверхности сферической частицы кремния, причём до тех пор, пока внешний слой поверхности кремния полностью не превратится в новый продукт кристаллохимической реакции – нитрид кремния. При этом во внутренних слоях данной сферической частицы кремния имеется остаточный кремний, который ещё в реакцию не вступает, а находится на стадии диффузионного насыщения кристаллической решётки кремния атомами азота. С течением времени, постепенно фронтальная зона химической реакции продвигается внутрь сферической частицы, оставляя за собой твердый продукт реакции и непрореагировавшую центральную часть исходного кристаллического кремния. Другими словами, в некоторый момент времени реакционного спекания, полнотелую сферическую частицу кремния можно представить в виде частицы с непрореагировавшим ядром кристаллического кремния, которая окружена внешней поверхностной оболочкой прореагировавшего кремния с азотом. Фактически на рис. 1 показана кинетика изменения концентрации газового реагента (азота) по мере протекания реакции вглубь сферической частицы кремния, описываемого моделью с фронтальным перемещением зоны реакции.

Таким образом, на основе исследований структуро- и фазообразования [4,6-8] методами рентгеноструктурного и локального микрорентгеноспектрального анализов установлено следующее формирование реакционно-спеканного нитрида кремния. Условно

образование нитрида кремния в результате процесса азотирования шаровидной частицы кремния в первом приближении можно представить схематически в виде рис.2. Из рис. 2 видно, что в области 1 у поверхности шара кристаллического Si постоянно подводится газ N_2 , который диффундирует в кристаллическую решётку с последующим образованием нитрида кремния (закрашенная область 2), причём в центральной части шара (светлая область 3) кремний ещё не прореагировал и имеет чёткую центрально симметричную границу раздела.

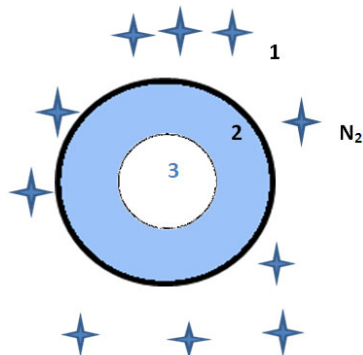


Рисунок 2 – Профиль изменения концентрации азота в результате взаимодействия его со сферической частицей кремния с фронтальным перемещением зоны реакции: 1 – приграничный газовый слой с концентрацией азота N_2 ниже, чем в газовом потоке; 2 – реакционно образовавшийся слой нитрида кремния; 3 – ядро непрореагировавшего кремния сферической частицы

Целью настоящей работы является разработка физико-математической модели гетерогенного реакционного спекания кристаллического кремния с азотом, распространяющаяся с фронтальным перемещением зоны реакции с «резко-очерченной» границей.

Модель реакционного спекания сферической частицы кремния с азотом, описываемый как временной процесс с перемещением фронтальной зоны реакции, подразделяется на три последовательных стадий. На первой стадии осуществляется «внешний диффузионный» подвод газообразного азота к поверхности кристаллической частицы кремния, причём обедненный азотом у поверхности. На второй стадии атомы азота диффузионно проникают в кристаллическую структуру кремния через вакансионные пустоты и продвигаются к ядру сферической частицы кристаллического кремния, т.е. осуществляется так называемая «внутренняя диффузия». На третьей стадии протекает кристаллохимическая реакция между кремнием и азотом у поверхности «непрореагировавшего ядра» с перемещением фронтальной зоны реакции к центру ядра.

Кристаллохимическую реакцию кремния с азотом выражают формулой (1), а в обобщённом случае его можно представить в виде:



где A – реагирующий газ, B – твёрдый реагент, а C – новый твёрдый продукт реакции.

Известно [9], что уравнение непрерывности для реагирующего газа с твёрдым веществом записывается в форме дифференциального уравнения:

$$\theta \frac{\partial C_A}{\partial t} + \nabla N_A = -\bar{R}_A, \quad (3)$$

где C_A - молярная концентрация газа (A), t - время, N_A - молярный поток газа A , \bar{R}_A - средняя молярная скорость взаимодействия газа (A) с твёрдым веществом (B) в результате химической реакции в единице объема сферической частицы, θ - пористость сферической частицы.

Ранее в работах [11,12] было установлено, что если скорость перемещения границы фронтальной поверхности реакции во много раз меньше, чем скорость внутренней диффузии азота через эту же поверхность, то такое состояние газа считается квазистационарным. Условием квазистационарного состояния газа является выражение

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

Это условие «квазистационарности» (9) было обосновано и подтверждено в работах [12] путем экспериментальных расчётов. Показано, что условие квазистационарности выполняется с достаточно высокой точностью в случае, если величина отношения молярных плотностей реагирующих веществ (твёрдого вещества и газа) принимает значения порядка 1000 и выше. С учётом этого, уравнение непрерывности для потока газа A , в определенном поверхностном слое сферической частицы твёрдого вещества, запишется в виде дифференциального уравнения:

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dC_A}{dr} \right) = 0, \quad r_c < r < r_{g0} \quad (5)$$

со следующими граничными условиями:

$$r = r_c : D_{As} \left(\frac{dC_A}{dr} \right)_{r_c} = k C_{Ac} \quad (6)$$

$$r = r_{g0} : D_{As} \left(\frac{dC_A}{dr} \right)_{r_{g0}} = k_{MA} (C_{Ab} - C_{Ac}) \quad (7)$$

где r - радиальная координата, r_{g0} - внешний радиус сферической частицы, r_c - радиус «непрореагировавшего-ядра», D_{As} - коэффициент диффузии газа A в слое продукта реакции сферической частицы B , k - константа скорости реакции, k_{MA} - коэффициент массы переноса газовой фазы, C_{Ac} - концентрация газового реагента на поверхности реакции, C_{Ab} - концентрация газового реагента на поверхности продукта реакции, C_{As} - концентрация газового реагента на поверхности сферической частицы.

Решение дифференциальных уравнений

Решение уравнения (3)-(7) с соответствующими граничными условиями позволяет получить следующее выражение:

$$\frac{C_A}{C_{Ab}} = \frac{\left[1 + \frac{D_{As}}{kr_c} \right] \frac{1}{r_c} - \frac{1}{r}}{\left[1 + \frac{D_{As}}{kr_c} \right] \frac{1}{r_c} - \left[1 - \frac{D_{As}}{k_{MA}r_{g0}} \right] \frac{1}{r_{g0}}} \quad (8)$$

Если заменить в уравнении (5) величину r на r_c , то аналогично можно получить выражение, учитывающее концентрацию газового реагента C_{Ac} на поверхности границы раздела реакции:

$$\frac{C_{Ac}}{C_{Ab}} = \frac{1}{1 + \frac{kr_c^2}{k_{MA}r_{g0}^2} + \frac{kr_c}{D_{As}} \left(1 - \frac{r_c}{r_{g0}}\right)} \quad (9)$$

Из формулы (9) можно выразить скорость реакции кремния с азотом на единицу площади R_{Ac} , которая запишется в виде формулы (10):

$$R_{Ac} = kC_{Ac} = \frac{kC_{Ab}}{1 + \frac{kr_c^2}{k_{MA}r_{g0}^2} + \frac{kr_c}{D_{As}} \left(1 - \frac{r_c}{r_{g0}}\right)} \quad (10)$$

Фронтальное перемещение (движение) зоны поверхности реакции вглубь сферической частицы кремния r_c описывается дифференциальным уравнением:

$$-\frac{a\rho_B}{b} \frac{dr_c}{dt} = kC_{Ac} \quad (11)$$

с начальным условием: $t = 0: r_c = r_{g0}$.

Проинтегрировав дифференциальное уравнение (11) с учётом уравнения (9), получим соотношение, связывающее время кристаллохимической реакции с превращением кремния в нитрид кремния:

$$t = \frac{a\rho_B r_{g0}}{bC_{Ab}} \left\{ \frac{X}{3k_{MA}} + \frac{r_{g0}}{6D_{As}} \left[1 + 2(1-X) - 3(1-X)^{2/3} \right] + \frac{1}{k} \left[1 - (1-X)^{1/3} \right] \right\}, \quad (12)$$

где ρ_B - молярная плотность твердого реагента, X -расстояние, показывающая на какую глубину прореагировал кремний с азотом в направлении к центру (ядру) сферической частицы кремния:

$$X = 1 - \left(\frac{r_c}{r_{g0}} \right)^3 \quad (13)$$

Если за время t^* обозначить время, затрачиваемое для полного превращения сферической частицы кремния в нитрид кремния, то это время t^* можно определить из (12), подставляя в неё формулу (13) при условии, что $r_c = r_{g0}$, тогда окончательно получим выражение:

$$t^* = \frac{a\rho_B r_{g0}}{bC_{Ab}} \left\{ \frac{1}{3k_{MA}} + \frac{r_{g0}}{6D_{As}} + \frac{1}{k} \right\}, \quad (14)$$

В выражении (14) сумма в фигурных скобках, состоит из трёх слагаемых. Первое слагаемое показывает относительное сопротивление переноса массы, второе – учитывает диффузию газа азота через слой кристаллического кремния в процессе реакции, а третье - характеризует скорость химической реакции в общем процессе азотирования кремния.

Заключение

Разработана физико-математическая модель в виде дифференциальных уравнений. Проведено аналитическое решение дифференциальных уравнений с учётом заданных граничных условий и получены соотношения, которые позволяют провести численные расчёты реакционного превращения кристаллического полнотелого шаровидного кремния в нитрид кремния в атмосфере азота.

Проведенная научно-исследовательская работа направлена на решение инженерно-технологической задачи, в частности, разработки оптимальной технологии получения для конкретных керамических изделий на основе нитрида кремния, применяемых в полупроводниковой промышленности, а также на аффинажном металлургическом заводе драгметаллов Кыргызской Республики.

В дальнейшем планируется представить результаты численных расчётов реакционного спекания полнотелых сферических частиц кремния в атмосфере азота, где на основе вышерассмотренной физико-математической модели будут проанализированы ряд расчётных кинетических кривых азотирования в зависимости от температуры, давления, размера частиц и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриевский Р.А. Нитрид кремния и материалы на его основе. М.: Металлургия, 1984. 269 с.
2. Андриевский Р.А. Нитрид кремния – синтез и свойства // Успехи химии. 1995. № 4, С. 311-329.
3. Кыргызпатент KG 1203 C1 (C04B 35/58). Способ изготовления керамокомпозиционных изделий из отходов кремния / Н.К. Касмамытов, В.П. Макаров, К.Р. Курбанов Бишкек, 2009. 4с.
4. Касмамытов Н.К., Ласанху К.А., Имаев М., Пархимович Н.Ю. Микроструктура и состав формирующихся фаз при реакционном спекании композиционной керамики армированной графитовым волокном // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета, 2015. Т. 15. № 9. С. 67-72
5. Касмамытов Н.К. Реакционное спекание и свойства нано- и ультра структурированных керамокомпозиционных материалов // Перспективные материалы. 2011. № 3. С. 208-213.
6. Касмамытов Н.К. Особенности структурообразования нано- и ультрадисперсных керамокомпозиционных материалов на основе шламовых отходов кремниевого производства // Перспективные материалы. 2011. № 3. С.201-207.
7. Касмамытов Н.К., Мураталиева В.Ж. Рентгеноструктурные и рентгенофазовые исследования реакционно-спечённых керамокомпозиционных материалов// Материалы Международ. науч. техн. конф., посвящ. 55-летию КГТУ. Вестник КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек: Изд-во КГТУ, 2009. С. 269-274.
8. Касмамытов Н.К. Структурообразование керамокомпозиционного материала на основе нитрида кремния. Бишкек: Изд-во КРСУ им. президента России Б.Н. Ельцина, 2011. 94 с.
9. Сатаев Л.О., Кайрыев Н.Ж., Касмамытов Н.К. Одномерная физико-математическая модель реакционного спекания отформованных ультрадисперсных порошков кремния в атмосфере азота // Современные тенденции развития науки и технологий: научный сборник. Белгород, 2016. № 4-1. С. 40-46.
10. Касмамытов Н.К., Сатаев Л.О., Кайрыев Н.Ж. Двумерная нестационарная модель реакционного спекания кремния в атмосфере азота // Европейский фонд инновационного



развития. II-е Международные научные чтения памяти Софьи Ковалевской. Москва: Изд-во: ЕФИР, 2016. С. 5-8.

11. Levenspiel, Octave. Chemical reaction engineering Kinetics. 3rd ed. New York, 1999, pp.566-579.

12. Joshi A.S., Peracchio A.A., Grew K.N., Chiu W.K.S. Lattice Boltzmann method for continuum, multi-component mass diffusion in complex 2D geometries. J. Phys. D Appl. Phys. 2007. V. 40. No. 9, pp.7593-7600.

REFERENCES

1. Andrievskii R.A. *Nitrid kremniia i materialy na ego osnive* [Silicon nitride and materials based on it]. Moscow: Metallurgy Publ., 1984. 269 p.

2. Andrievskii R.A. *Nitrid kremniya – sintez i svoistva* [Silicon nitride synthesis and properties]. *Progress of chemistry*, 1995(65). №4, pp.311-329.

3. Kasmamytov N.K., Makarov V.P., Kurbanov K.R. *Kyrgyz Patent KG 1203 C1 (C04B 35/58). Sposob izgotovleniya keramokompozicionnyh izdelii iz othodov kremniya* [Method of manufacturing Silicon waste products from keramokompozicionnyh]. Kyrgyz Patent KG 1203 C1 (C04B 35/58). Bishkek, 2009. 4 p.

4. Kasmamytov N.K., Lasankhy K.A., Imaev M., Parhimovich N.Y. *Mikrostruktura i sostav formiruyushih faz pri reakcionnom spekanii keramokompozicionnoi keramiki armirovannoi grafitovym voloknom* [Microstructure and composition of the emerging phases when the reaction sintering ceramic graphite fiber reinforced composite]. Bishkek: *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University*, 2015. V. 15. No, 9, pp. 67-72.

5. Kasmamytov N.K. *Reakcionnoe spekanie i svoistva nano- i ultra strukturirovannyh keramokompozicionnyh materialov* [High-pressure reaction sintering and properties of nano-structured materials keramokompozicionnyh and ultra]. *Perspective materials*, 2011. No. 3, pp. 208-213.

6. Kasmamytov N.K. *Osobennosti strukturoobrazovaniya nano- i ultradispersnyh keramokompozicionnyh materialov na osnove shlamovyh othodov kremnievogo proizvodstva* [Features nano-structure formation and ultrafine keramokompozicionnyh slime waste materials based on silicon production]. *Perspective materials*, 2011. No. 3, pp. 201-207.

7. Kasmamytov N.K., Muratalieva V.J. *Rengenostруктурные i rentgenofazovye issledovaniya reakcionno- spehennyh keramokompozicionnyh materialov* [X-ray diffraction and rentgenofazovye study of reactive keramokompozicionnyh sintered materials]. International researcher Tech. conf, Dedi. 55 years - KSTU. Herald of KSTU I.Razzakov, Bishkek: KSTU, 2009, pp. 269-274.

8. Kasmamytov N.K. *Strukturoobrazovanie keramokompozicionnogo materiala na osnove nitride kremniya* [Cross-linking ceramic-kompozition material based on silicon nitride]. Bishkek: KRSU Publ., 2011. 94 p.

9. Kasmamytov N.K., Sataev L.O., Kajryev N.J. *Odnomernaiy fiziko-matematicheskaiy model reakcionnogo spekaniya otformovannyh ultradispersnyh poroshkov kremniya v atmosphere azota* [Physico-mathematical model of one-dimensional reaction sintering of ultrafine powders molded Silicon in a nitrogen atmosphere]. Belgorod: Modern trends in science and technology, 2016. No. 4-1, pp. 40-46.

10. Kasmamytov N.K., Sataev L.O., Kajryev N.J. *Dvumernaya nestasionarnaiya model reakcionnogo spekaniya kremniya v atmosphere azota* [2D Nonstationary model of reactionary Silicon sintering in atmosphere nitrogen]. Sat. labour. II international scientific readings in memory of Sofia Kovalevskaya, Moscow: EFIR: 2016, pp. 5-8.

11. Levenspiel, Octave. Chemical reaction engineering Kinetics. 3rd ed. New York, 1999, pp.566-579.



12. Joshi A.S., Peracchio A.A., Grew K.N., Chiu W.K.S. Lattice Boltzmann method for continuum, multi-component mass diffusion in complex 2D geometries. J. Phys. D Appl. Phys. 2007. V. 40. No. 9, pp.7593–7600.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Касмамытов Нурбек Кыдырмышевич

Институт физико-технических проблем и материаловедения Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызская Республика, доктор физико-математических наук, доцент, заместитель директора по научной работе,

E-mail: nurkas@mail.ru

Kasmamytov Nurbek Kydyrmyshevich

The National Academy of Sciences Kyrgyz Republic, Institute of physical and technical problems of materials science of NAS KR, Bishkek, Kyrgyz Republic, doctor of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Deputy Director on scientific work,

E-mail: nurkas@mail.ru

Сатаев Лесбек Орынгалиевич

Аспирант кафедры «Физики» Кыргызского Государственного Университета им. И. Арабаева; Кыргызская Республика, г. Бишкек,

E-mail: leke_1974@mail.ru

Sataev Lesbek Oryngalievich

PhD student at the Department of Physics, Kyrgyz State University in the name of I. Arabaev, Bishkek, Kyrgyz Republic.

E-mail: leke_1974@mail.ru

Кайрыев Нурлан Жутанович

Старший научный сотрудник лаборатории «Порошковых материалов» Институт физико-технических проблем и материаловедения Национальной Академии Наук, г. Бишкек, Кыргызская Республика, кандидат физико-математических наук,

E-mail: n.kajryev@mail.ru

Kajriev Nurlan Jutanovich

The National Academy of Sciences Kyrgyz Republic, Institute of physical and technical problems of materials science of NAS KR, Laboratory of powder materials, Bishkek, Kyrgyz Republic, candidate of physico-mathematical sciences;

E-mail: n.kajryev@mail.ru

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с авторами статьи:
720071, Бишкек, Чуй проспект, 265-а, ИФТПиМ НАН КР, приемная
дирекции института. Касмамытов Н.К.

+996 312 64-27-06