

Научная статья

УДК 666.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-88-98

## ФОРМИРОВАНИЕ КАРБИДОКРЕМНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ГАЗОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ (обзор). Часть 2\*

Д.В. Сидоров<sup>1</sup>, А.А. Шавнев<sup>1</sup>, А.А. Мелентьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Представлен обзор научно-технической литературы в области формирования карбидокремниевых покрытий методом химического осаждения из газовой фазы. В зависимости от технологических параметров можно добиться как осаждения чистого карбида кремния, так и совместного осаждения кремния и углерода, а также покрытий переменного состава. В представленной статье уделено внимание подходам к изучению процесса формирования карбида кремния с кинетической точки зрения, а также термодинамическим параметрам.

**Ключевые слова:** химическое газофазное осаждение, карбид кремния, покрытие, химическая реакция, реагент, кинетика, термодинамика

**Для цитирования:** Сидоров Д.В., Шавнев А.А., Мелентьев А.А. Формирование карбидокремниевых покрытий методом химического газофазного осаждения (обзор). Часть 2 // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-88-98.

Scientific article

## FORMATION OF SILICON CARBIDE COATINGS BY CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (review). Part 2

D.V. Sidorov<sup>1</sup>, A.A. Schavnev<sup>1</sup>, A.A. Melentev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The article provides an overview of the scientific and technical literature in the field of the formation of silicon carbide coatings by chemical vapor deposition (CVD). CVD is a complex process, approaches to which vary depending on the tasks being solved. Depending on the technological parameters it is possible to achieve both the deposition of pure silicon carbide and the co-deposition of silicon and carbon, mixed coating. In the article attention is paid to the study of CVD from the point of view of the kinetic and parameters for deposition and thermodynamic.

**Keywords:** chemical vapor deposition, silicon carbide, coating, chemical reaction, reagent, kinetic, thermodynamic

**For citation:** Sidorov D.V., Schavnev A.A., Melentev A.A. Formation of silicon carbide coatings by chemical vapor deposition (review). Part 2. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-88-98.

---

\* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 6 (100), 2021.

### Введение

Кинетика и термодинамика являются важными составляющими при теоретическом моделировании новых материалов, оптимизации технологических параметров их изготовления и переработки, прогнозировании поведения материалов и изменения в их структуре при эксплуатации [1–3].

Кинетика химических реакций зависит от температуры, давления, длительности проведения процесса, участия вовлеченных в процесс молекул, радикалов и заряженных частиц. При рассмотрении кинетики и взаимодействия в гетерогенных системах, к которым можно отнести химическое осаждение из газовой фазы (ХГО), дополнительными факторами являются поверхность контактирования, температурный профиль в аппарате и на подложке, течение газовых потоков и массообменные процессы. Все эти факторы значительно усложняют разработку расчетных моделей и универсальных математических формул для оценки процессов, происходящих в гетерогенных системах.

При математическом описании формирования карбидокремниевых покрытий методом химического газофазного осаждения в научно-технической литературе используются различные подходы, базирующиеся на эмпирических, полуэмпирических и неэмпирических данных. Большой интерес к данным покрытиям в различных технологических сферах обусловлен комплексом преимуществ физико-механических свойств по отношению к традиционно используемым материалам [4–8].

Принимая во внимание многогранность процессов, протекающих при формировании карбида кремния, целью предлагаемого научно-технического литературного обзора является рассмотрение различных подходов к изучению данного процесса с кинетической точки зрения с учетом термодинамических параметров.

### Кинетика химического газофазного осаждения

Для изучения механизмов реакций ХГО авторы работы [9] использовали подход с кинетической точки зрения. Эксперименты по осаждению SiC проводили в реакторе вертикального типа с горячими стенками. Исходным компонентом служил метилтрихлорсилан (МТХС) с водородом, соотношение давления водорода к нему варьировали от 1 до 10. Разогрев подложки осуществляли с помощью радиочастотной индукции до температур 825 и 925 °С. Давление в реакторе составляло от 3,4 до 27,5 кПа при общем расходе газа – от 160 до 440 см<sup>3</sup>/с. Дополнительно в газовую смесь вводили хлорид водорода и метан для оценки их влияния на осаждение SiC. Установлено, что при относительно низких температурах (~825 °С) и давлении от 5 до 10 кПа кинетическое уравнение для осаждения SiC можно представить в виде:

$$R = A e^{\frac{-E_a}{RT}} P_{\text{МТХС}}^{2,5}, \quad (1)$$

где энергия активации  $E_a > 500$  кДж/моль;  $A$  – предэкспоненциальный множитель;  $R$  – газовая постоянная (8,314 Дж/моль);  $T$  – температура;  $P_{\text{МТХС}}^{2,5}$  – парциальное давление МТХС.

При температурах ~925 °С и низком давлении (<10 кПа) скорость осаждения SiC не зависит от парциального давления МТХС и водорода и может быть описана стандартным уравнением Аррениуса:

$$R = A e^{\frac{-E_a}{RT}}, \quad (2)$$

где  $E_a = 190 \pm 20$  кДж/моль;  $A = 5 \cdot 10^5$  мг/(мин·см<sup>2</sup>).

При давлении >10 кПа кинетика осаждения SiC связана с первым порядком относительно МТХС и нулевым – относительно водорода по уравнению

$$R = A e^{\frac{-E_a}{RT}} P_{\text{МТХС}}^1, \quad (3)$$

где  $A = 4,5 \cdot 10^3$  мг/(мин·см<sup>2</sup>·Па).

Авторы работы [9] считают, что протекающие реакции можно объяснить моделью Ленгмюра–Хиншелвуда, при этом SiC образуется из радикалов CH<sub>3</sub> и SiCl<sub>3</sub>. Лимитирующей стадией является гетерогенный процесс элиминирования молекулы хлористого водорода за счет разрыва связей.

В работе [10] авторы изучали влияние температуры на характеристики роста карбида кремния из МТХС. Соотношение МТХС/водород составляло 1/12, давление в реакторе 5 кПа, температура осаждения варьировалась в интервале от 1100 до 1230 °С. Установлено, что процесс пиролиза МТХС является эндотермическим и сильно зависит от температуры, а энергия активации составляет 116,31 кДж/моль. Методом рентгенофазового анализа показано, что при температурах 1100 и 1230 °С получены чистые карбидокремниевые покрытия гранулированной структуры, при этом средний размер кристаллитов составил 22 и 32 нм соответственно. Размер кристаллитов увеличивается линейно с ростом температуры. При формировании SiC-структуры авторы работы [10] придерживаются модели островкового роста по механизму Вольмера–Вебера, когда молекулы адсорбируются на поверхности подложки, диффундируют, накапливаются, и, наконец, происходит зарождение и рост островков на поверхности подложки.

Авторы работы [11] провели детальный термодинамический равновесный анализ 221 газообразного и 5 твердых соединений для ХГО с применением МТХС и водорода с температурным интервалом 3–1617 °С, давлением 6–100 кПа и соотношением водорода к МТХС – от 10<sup>-2</sup> до 10<sup>7</sup>. Метод основан на поиске минимального химического потенциала (или энергии Гиббса) для систем с газовой и твердой фазами по уравнению

$$G_{\min} = \left\{ \sum_{i=1}^s n_{i\text{ТВ}} \Delta G_i + \sum_{i=s+1}^N n_i \left[ \Delta G_i + RT \ln p + RT \ln \frac{n_i}{\sum_{j=s+1}^N n_j} \right] \right\}, \quad (4)$$

где  $s$  – общее количество твердых фаз;  $N$  – общее количество соединений;  $p$  – общее давление;  $n_i$  – количество вещества для  $i$ -соединения в газовой фазе;  $n_{i\text{ТВ}}$  – количество вещества для  $i$ -соединения в твердой фазе.

По результатам расчета [11] можно сделать следующие наиболее существенные выводы:

– при температурах 3–327 °С в системе представлена только одна фаза β-SiC, скорость образования которой практически постоянна;

– при температурах 372–1003 °С образование β-SiC значительно увеличивается с ростом температуры осаждения; присутствует также соосаждение углерода, которое достигает максимального значения при температуре ~800 °С, а затем снижается;

– при температурах >1003 °С образование β-SiC снижается незначительно, соосаждение углерода плавно увеличивается;

– при мольном соотношении водорода к МТХС менее 10 количество β-SiC быстро увеличивается; с ростом этого соотношения в интервале от 10 до 10<sup>4</sup> выход β-SiC остается практически постоянным – на уровне 99,5 % с присутствием небольшого количества С; при соотношениях более 10<sup>4</sup> образование β-SiC быстро уменьшается и становится незначительным при достижении значения для данного соотношения 10<sup>6</sup>;

– образование кремния возможно при температурах 3–1203 °С при соотношении водорода к МТХС более  $10^5$ .

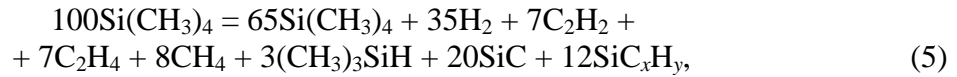
Для изучения эффекта наличия примесей хлора в покрытии из карбида кремния в работе [12] авторы провели эксперименты по адсорбции хлорида водорода. При помощи Оже-спектроскопии установлено, что происходит его адсорбция на поверхности SiC. При десорбции идентифицирован только хлорид водорода, энергия активация которого при этом составила 267 кДж/моль.

Попытка моделирования тепло- и массопереноса процесса ХГО карбида кремния модификации 4H-SiC предпринята авторами в работе [13]. В работе применены: реакторы с холодными и горячими стенками; в качестве реагентов – силан, пропан и водород; температура осаждения 1700–1900 °С; давление 10–100 кПа. Основной проблемой стала трудность достижения равномерной температуры на подложке большого размера. С использованием различных подходов к моделированию можно достичь компромисса между технологическими ограничениями и равномерной скоростью осаждения SiC для подложек больших размеров.

Моделирование процесса ХГО осаждения карбида кремния также представлено в работе [14]. В качестве сырья использованы силан и пропан, которые полностью разлагаются рядом с подложкой до соединений: Si, SiH<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Исходные параметры для расчета: температура осаждения 1450 °С; давление 6,6 кПа; скорость вращения держателя 750 об/мин. Построена фазовая диаграмма для постоянного расхода SiH<sub>4</sub> (17 см<sup>3</sup>/мин) и C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (4,4 и 6,6 см<sup>3</sup>/мин). Авторы работы [14] считают, что пары кремния вблизи подложки перенасыщаются и образуют жидкие кластеры на поверхности подложки. По результатам проведенного расчета сделан вывод, что при соотношении на входе в реактор углерода к кремнию >1,16 будет происходить графитизация подложки; при соотношении углерода к кремнию <0,38 на поверхности подложки образуется жидкая фаза. Область роста кристалла SiC находится между этими соотношениями.

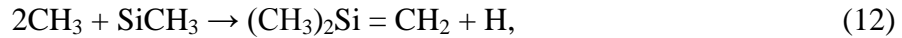
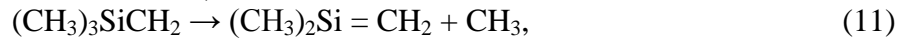
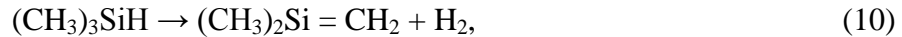
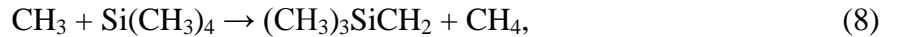
В работе [15] исследовано осаждение SiC методом ХГО при атмосферном давлении из диметилдихлорсилана (ДМДХС). Предложены следующие параметры осаждения: температура 900–1100 °С; суммарная скорость газа 5–50 м/с; концентрация ДМДХС составляла 0,01–2,0 % (мольн.). Для проведения экспериментов использовали трубчатый реактор (длина 700 мм, диаметр – от 2 до 10 мм) с горячими стенками. Газом-носителем являлся гелий, который пропускали через стеклянный барботер с ДМДХС и направляли в реактор. Осаждение SiC проводили на подложку из кремния, при этом в объеме реактора не замечено самопроизвольного формирования порошка карбида кремния. Покрытие на подложке представляло собой чистый β-SiC без присутствия свободного углерода и кремния. Основной проблемой такого способа является образование жидких продуктов полимеризации ДМДХС с температурами кипения от 70 до 206 °С.

В работе [16] изучено формирование покрытия SiC методом ХГО из тетраметилсилана при пониженном давлении. Реактор для проведения исследований представлял собой охлаждаемую водой трубу из нержавеющей стали высотой 550 мм (поперечное сечение 6×7 см). Тетраметилсилан (чистота 99,9 %) подавали с помощью массового расходомера снизу реактора со скоростью 0,2 м/с. Давление в реакторе поддерживали на уровне 2 Па. Осаждение карбида кремния происходило на подложку из графита (марка 5890, производитель – фирма Carbone Lorraine) размером 50×25×2 мм. Скорость роста слоя SiC с кристаллической решеткой β-SiC на подложку составила 400 мкм/ч. В газовой смеси, выходящей из реактора, идентифицированы тетраметилсилан, триметилсилан, метан, этан, этилен, ацетилен и водород. Уравнение протекающих химических реакций может быть записано в виде:



где  $x = 6 \pm 1,5$ ;  $y = 20 \pm 2$ .

Начало процесса распада тетраметилсилана является химическая реакция (6) с энергией активации 361 кДж/моль и предэкспоненциальным множителем  $10^{17,3}$  для уравнения Аррениуса, после чего возможно протекание других химических реакций (7)–(16). При этом энергия активации для реакции (7) диссоциации триметилсилана составляет  $\sim 220$  кДж/моль.



На поверхности подложки протекают реакции (8) и (12) элиминирования метана, за счет которых образуются хемосорбирующие места для таких соединений, как триметилсилан, триметил(метилен)силан, диметил(метилен)силан. Дальнейшее элиминирование метана и водорода способствует образованию первых монослоев на поверхности подложки.

Для расчета температурного профиля в реакторе использовали следующее уравнение:

$$\Delta T = \frac{2 - \alpha}{\alpha} \cdot \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \cdot \frac{\lambda}{\text{Pr}} \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (17)$$

где  $\Delta T$  – изменение температуры по длине реактора;  $\alpha$  – коэффициент пересчета (табл. 1);  $\gamma$  – соотношение теплоемкостей  $C_p/C_v$ ;  $\partial T/\partial x$  – температурный коэффициент газа вдоль оси, перпендикулярной к стенке реактора;  $C_p$ ,  $C_v$  – удельные теплоемкости при постоянных давлении и объеме соответственно; Pr – число Прандтля.

Таблица 1

Коэффициент пересчета для систем «газ–твердое тело» [16]			
Система	$\partial T/\partial x$ , К/см	$\Delta T$ , К	$\alpha$
H <sub>2</sub> –W	18800	355	0,10
H <sub>2</sub> –C	29100	321	0,15
H <sub>2</sub> –SiC	19200	545	0,05
H <sub>2</sub> (пиролиз тетраметилсилана)–SiC	29700	100	0,05

При формировании покрытия SiC методом ХГО из тетраметилсилана при пониженном давлении установлено, что конверсия тетраметилсилана составляет  $\sim 35$  %, кремнийсодержащие продукты разложения тетраметилсилана представляют собой: 57 % стехиометрического карбида кремния; 34 % порошка желтого цвета состава SiC<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, образованного полимеризацией в холодной части реактора; 9 % триметилсилана.

В работе [17] представлены результаты теоретических исследований тепло- и массопереноса для метода ХГО с плазмой в вертикальном реакторе осаждения карбида кремния. Основными составляющими для расчета послужили распределение скорости потока в реакторе и массоперенос, выраженный числом Шервуда и критерием Нуссельта. Реагентами для образования карбида кремния являлись газы пропан и силан, разбавителем – водород. Физической моделью для расчета послужил реактор с верхним и нижним электродом, а также подложкой длиной 101,6 мм. Авторы работы [17] считают, что химические реакции протекают на поверхности субстрата с постоянной температурой, при этом осаждается карбид кремния на подложку и выводятся газы из зоны реакции по двум каналам шириной 25,4 мм. Смешивание пропана и силана происходит на входе – до их введения в реактор. Основным моментом является формирование плазмы, которое происходит за счет ионизации газов высокочастотным генератором с частотой 13,6 МГц. Мощность формируемой плазмы находится на уровне 10 Вт/см<sup>3</sup>. В расчетах также проводили учет энергии активации и предэкспоненциального множителя для химических реакций. Для математического расчета предположили, что в данном реакторе проходят две газозависимые и три поверхностные реакции. Допущены также следующие упрощения: химические реакции протекают в объеме, находящемся между двумя электродами; газовый поток в реакторе ламинарный (число Рейнольдса менее 2000); реактор работает в адиабатическом режиме; газы являются идеальными и подчиняются ньютоновскому течению жидкости; на поверхности субстрата химические реакции протекают необратимо. Процесс осаждения карбида кремния сопровождается многочисленными химическими реакциями (18)–(30), представленными в работе [18] и принятыми авторами работы [17] для расчета:



Химическое осаждение с плазмой сопровождается сложными химическими реакциями, в том числе с участием электронов. За счет этого образуются радикалы, такие как CH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, SiH<sub>3</sub>, SiH<sub>2</sub>, SiH и H. Принято считать, что на поверхности подложки протекают реакции (22) и (25)–(27), тогда как остальные протекают в объеме. При этом для реакций (18), (19) и (28) необходимо дополнительное воздействие сильного электромагнитного поля. Карбид кремния осаждается на подложку по реакции (27).

В работе [17] установлено, что диаметр отверстий подающего распределителя газа в реакторе ХГО с плазмой влияет на скорость осаждения SiC. При увеличении диаметра отверстий с 1 до 2,5 мм на расстоянии 30 мм критерий Нуссельта снижается с 17 до 4, число Шервуда уменьшается с 13 до 6, скорость поверхностного осаждения SiC – с 1,21 до 0,41 г/(м<sup>2</sup>·с). Такой эффект резкого критериального снижения называют «граничным плавучим потоком». В этой области происходит осаждение покрытия на

подложку, при этом тепло- и массоперенос незначительны. Изменение температуры подложки также оказывает значительное влияние на скорость поверхностного осаждения SiC: при 150 °C она составляет около 1,4 г/(м<sup>2</sup>·с), при 750 °C – около 0,8 г/(м<sup>2</sup>·с). Исходя из этого сделан вывод, что при повышении температуры на поверхности подложки сила поверхностного потока направлена в противоположную сторону от подложки, что препятствует подводу химических реагентов и ведет к снижению скорости осаждения [19]. Дополнительно к этому выводу приводят довод, что адсорбционные процессы на поверхности подложки являются экзотермическими, что также замедляет процесс осаждения SiC.

Вычисления в работе [17] проводили по математическим уравнениям (31)–(43), начиная с формулы неразрывности потока (31) и уравнения количества движения (32):

$$\nabla \rho u = 0, \quad (31)$$

где  $\rho$  и  $u$  – соответственно плотность и скорость газовой смеси в реакторе;

$$\nabla \rho u_i u_j = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g, \quad (32)$$

где  $g$  – гравитационная постоянная;  $\tau$  – напряжение при сдвиге;  $p$  – давление.

Напряжение при сдвиге вычисляют по уравнению

$$\tau = \mu \left[ \nabla u + (\nabla u)^T \right] - \frac{2}{3} \mu (\nabla u) \delta, \quad (33)$$

где  $\delta$  – символ Кронекера;  $\mu$  – динамическая вязкость газовой смеси.

Энергетический баланс определяют по уравнению

$$c_p \nabla (\rho u T) - \nabla (\lambda \nabla T) = 0, \quad (34)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость газовой смеси;  $T$  – температура газовой смеси;  $\lambda$  – коэффициент теплопередачи.

Массоперенос в результате конверсии химических веществ учитывают по уравнению

$$-\nabla (\rho u w_i) - \nabla j_i + R_i = 0, \quad (35)$$

где  $w_i$  – массовая доля вещества;  $j_i$  – массовый поток;  $R_i$  – скорость реакции веществ.

Массовый поток включает коэффициент диффузии по уравнению

$$j_i = -\rho D_i \nabla w_i, \quad (36)$$

где  $D_i$  – коэффициент диффузии.

Скорость реакции химических веществ суммируют по всем химическим реакциям, протекающим в объеме, и выражают в виде

$$R_i = M_i \sum_{r=1}^{N_r} R_{i,r}, \quad (37)$$

где  $M_i$  – молярная масса вещества;  $R_{i,r}$  – скорость реакции вещества  $i$  в реакции  $r$ .

Математическое выражение скорости реакции каждого вещества можно определить по уравнению

$$R_{i,r} = (v_{i,r}'' - v_{i,r}') (k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_r} [c_{j,r}] \eta_{j,r}'), \quad (38)$$

где  $v_{i,r}'' - v_{i,r}'$  – стехиометрические коэффициенты;  $k_{f,r}$  – скорость реакции;  $c_{j,r}$  – мольные концентрации реагентов;  $\eta_{j,r}'$  – скорость реакции каждого реагента или продукта  $j$ ;  $N_r$  – количество реагентов и продуктов.

Для химических реакций, протекающих на поверхности подложки по химической реакции в общем виде (39), где компонент  $B$  осаждается на поверхность подложки, а компонент  $A$  контактирует с подложкой, можно записать:



Контактирующий с поверхностью подложки поток компонента  $A$  определяют по уравнению

$$F_A = \frac{P_A}{\sqrt{2\pi M_A RT_s}}, \quad (40)$$

где  $F_A$  – поток компонента  $A$ ;  $P_A$  – парциальное давление компонента;  $M_A$  – молярная масса вещества.

Скорость поверхностной реакции (SDR) может быть выражена уравнением

$$SDR = \gamma_A \frac{P_A}{\sqrt{2\pi M_A RT_s}} = \gamma_A C_A \sqrt{\frac{RT_s}{2\pi M_A}}, \quad (41)$$

где  $\gamma_A$  – коэффициент химической реакции для компонента  $A$ ;  $C_A$  – мольная концентрация для компонента  $A$ ;  $T_s$  – температура на поверхности.

В упрощенном виде выражение (41) можно записать, если ввести коэффициент  $k$ , определяемый уравнением

$$k = \gamma_A \sqrt{\frac{R}{2\pi M_A}} T_s^{\frac{1}{2}}. \quad (42)$$

Сравнивая уравнение (42) с уравнением Аррениуса, авторы работы [17] пришли к выводу, что предэкспоненциальный множитель можно определить по уравнению

$$A_r = \gamma_A \sqrt{\frac{R}{2\pi M_A}}, \quad E_a = 0, \quad (43)$$

где  $E_a$  – энергия активации.

В данном случае при выводе скорости поверхностной реакции по уравнению (41) авторы работы [17] приняли энергию активации за 0, для того чтобы исключить энергетический вклад в процесс оценки ХГО. Для оценки скорости осаждения и кинетических параметров удобнее использовать результаты экспериментальных данных и линейные уравнения, представленные в работе [20].

**Заключения**

По результатам проведенного обзора научно-технической литературы видно, что оценка кинетики химического осаждения карбида кремния из газовой фазы осложнена многочисленными факторами, затрудняющими вывод математических уравнений. К ним относятся: неравномерный температурный профиль в аппарате и на поверхности контактирования химических реагентов, а также неравномерное течение газовых потоков и, соответственно, тепло- и массопереноса. Все эти факторы значительно усложняют разработку расчетных моделей и универсальных математических формул для оценки происходящих процессов в гетерогенных системах. Несмотря на значительный прогресс в области математической оценки взаимодействия в гетерогенных системах, универсальная модель для расчета ХГО до сих пор не разработана.

**Список источников**

1. Каблов Е.Н., Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
2. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <https://journal.viam.ru> (дата обращения: 21.12.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
3. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
4. Matovic B., Yano T. Handbook of Advanced Ceramics. Materials, Applications, Processing, and Properties. Oxford, 2013. P. 225–244.
5. Сидоров Д.В., Стороженко П.А., Шутова О.Г., Кожевников Б.Е. Получение алкилсиланов высокой чистоты // Химическая технология. 2006. № 7. С. 22–24.
6. Эшби М., Джонс Э. Конструкционные материалы. Полный курс. Долгопрудный: Интеллект, 2010. 672 с.
7. Choy K. Chemical vapour deposition of coatings // Progress in material science. 2003. Vol. 48. P. 57–170. DOI: 10.1016/S0079-6425(01)00009-3.
8. Сидоров Д.В., Шавнев А.А., Мелентьев А.А. Формирование карбидокремниевых покрытий методом химического газофазного осаждения (обзор). Часть 1 // Труды ВИАМ. 2021. № 6 (100). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-100-111.
9. Loumagne F., Langlais F., Naslain R. Reactional mechanisms of the chemical vapour deposition of SiC-based ceramics from CH<sub>3</sub>SiC<sub>3</sub>/H<sub>2</sub> gas precursor // Journal of Crystal Growth. 1995. Vol. 155. P. 205–213.
10. Huo Y., Chen Y. Effects of Deposition Temperature on the Growth Characteristics of CVD SiC Coatings // Key Engineering Materials. 2008. Vol. 368–372. P. 846–848.
11. Deng J.G., Su K., Wang X. Thermodynamics of the Production of Condensed Phases in the CVD of Methyltrichlorosilane Pyrolysis // Chemical vapor deposition. 2009. Vol. 15. P. 281–290.
12. Shulberg M., Allendorf M., Outka D. The adsorption of hydrogen chloride on polycrystalline silicon carbide // Surface Science. 1995. Vol. 341. P. 262–272.
13. Pons M., Meziere J., Kuan S. Heat and mass transfer modeling for a better knowledge of the large-area growth of homoepitaxial SiC by CVD // Materials Research Society Symposium Proceedings. 2001. Vol. 640. P. H.5.6.1–H.5.6.1.6.
14. Vorob'ev A.N., Karpov S.Yu., Bord O.V. Modeling of gas phase nucleation during silicon carbide chemical vapor deposition // Diamond and Related Materials. 2000. Vol. 9. P. 472–475.

15. Takeuchi T., Egashira Y., Komiyama H. A design policy of the SiC CVD reactor based on the chemical reaction kinetics of dichlorodimethylsilane // *Journal of Materials Science*. 1997. Vol. 97-25. P. 447–454.
16. Herlin N., Lefebvre M., Pealat M. Investigation of the Chemical vapor deposition of silicon carbide from tetramethylsilane by in situ temperature and gas composition measurements // *Journal of Physical Chemistry*. 1992. Vol. 96. P. 7063–7072.
17. Shirvan M., Ellahi R., Sheikholeslami T., Behzadmehr A. Numerical investigation of heat and mass transfer flow under the influence of silicon carbide by means of plasma enhanced chemical vapor deposition vertical reactor // *Neural Computing & Application*. 2017. Vol. 96. P. 7063–7072.
18. Ding J., Zhao Y., Yan N., Shubo M. Effect of electrode architecture and process parameters on distribution of SiH<sub>3</sub> in a PECVD system // *Vacuum*. 2011. Vol. 86. P. 344–349.
19. Soong C., Chyuan C., Tzong R. Thermo-flow structure and epitaxial uniformity in large-scale metalorganic chemical vapor deposition reactors with rotating susceptor and inlet flow control // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1998. Vol. 37. P. 5823–5834.
20. Lu C., Cheng L., Zhao C. Kinetics of chemical vapor deposition of SiC from methyltrichlorosilane and hydrogen // *Applied Surface Science*. 2009. Vol. 255. P. 7495–7499.

### References

1. Kablov E.N., Echin A.B., Bondarenko Yu.A. History of development of directional crystallization technology and equipment for casting blades of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 11, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
2. Kablov E.N., Kutyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 21, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
3. Kablov E.N., Valueva M.I., I.V. Zelenina, Khmelniitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 11, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
4. Matovic B., Yano T. *Handbook of Advanced Ceramics. Materials, Applications, Processing, and Properties*. Oxford, 2013, pp. 225–244.
5. Sidorov D.V., Storozhenko P.A., Shutova O.G., Kozhevnikov B.E. Obtaining high purity alkylsilanes. *Chemical technology*, 2006, no. 7, pp. 22–24.
6. Ashby M., Jones E. *Structural materials. Full course*. Dolgoprudny: Intellekt, 2010. 672 p.
7. Choy K. Chemical vapour deposition of coatings. *Progress in material science*, 2003, vol. 48, pp. 57–170. DOI: 10.1016/S0079-6425(01)00009-3.
8. Sidorov D.V., Schavnev A.A., Melentev A.A. Formation of silicon carbide coatings by chemical vapor deposition (review). Part 1. *Trudy VIAM*, 2021, no. 6 (100), paper no. 10. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 6, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-100-111.
9. Loumagne F., Langlais F., Naslain R. Reactional mechanisms of the chemical vapour deposition of SiC-based ceramics from CH<sub>3</sub>SiC<sub>3</sub>/H<sub>2</sub> gas precursor. *Journal of Crystal Growth*, 1995, vol. 155, pp. 205–213.
10. Huo Y., Chen Y. Effects of Deposition Temperature on the Growth Characteristics of CVD SiC Coatings. *Key Engineering Materials*, 2008, vol. 368–372, pp. 846–848.
11. Deng J.G., Su K., Wang X. Thermodynamics of the Production of Condensed Phases in the CVD of Methyltrichlorosilane Pyrolysis. *Chemical vapor deposition*, 2009, vol. 15, pp. 281–290.
12. Shulberg M., Allendorf M., Outka D. The adsorption of hydrogen chloride on polycrystalline silicon carbide. *Surface Science*, 1995, vol. 341, pp. 262–272.

13. Pons M., Meziere J., Kuan S. Heat and mass transfer modeling for a better knowledge of the large-area growth of homoepitaxial SiC by CVD. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 2001, vol. 640, pp. H.5.6.1–H.5.6.1.6.
14. Vorob'ev A.N., Karpov S.Yu., Bord O.V. Modeling of gas phase nucleation during silicon carbide chemical vapor deposition. *Diamond and Related Materials*, 2000, vol. 9, pp. 472–475.
15. Takeuchi T., Egashira Y., Komiyama H. A design policy of the SiC CVD reactor based on the chemical reaction kinetics of dichlorodimethylsilane. *Journal of Materials Science*, 1997, vol. 97-25, pp. 447–454.
16. Herlin N., Lefebvre M., Pealat M. Investigation of the Chemical vapor deposition of silicon carbide from tetramethylsilane by in situ temperature and gas composition measurements. *Journal of Physical Chemistry*, 1992, vol. 96, pp. 7063–7072.
17. Shirvan M., Ellahi R., Sheikholeslami T., Behzadmehr A. Numerical investigation of heat and mass transfer flow under the influence of silicon carbide by means of plasma enhanced chemical vapor deposition vertical reactor. *Neural Computing & Application*, 2017, vol. 96, pp. 7063–7072.
18. Ding J., Zhao Y., Yan N., Shubo M. Effect of electrode architecture and process parameters on distribution of SiH<sub>3</sub> in a PECVD system. *Vacuum*, 2011, vol. 86, pp. 344–349.
19. Soong C., Chyuan C., Tzong R. Thermo-flow structure and epitaxial uniformity in large-scale metalorganic chemical vapor deposition reactors with rotating susceptor and inlet flow control. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1998, vol. 37, pp. 5823–5834.
20. Lu C., Cheng L., Zhao C. Kinetics of chemical vapor deposition of SiC from methyltrichlorosilane and hydrogen. *Applied Surface Science*, 2009, vol. 255, pp. 7495–7499.

### Информация об авторах

**Сидоров Денис Викторович**, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Шавнев Андрей Александрович**, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Мелентьев Артем Александрович**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

### Information about the authors

**Denis V. Sidorov**, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Andrew A. Schavnev**, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Artem A. Melentev**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.12.2021.

The article was submitted 06.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 13.12.2021.