

УДК 533.17, 533.9.07

Конденсация в расширяющейся струе высокоэнтальпийной плазмы с образованием наночастиц и нанесение их на поверхность*

Г.А. Поздняков^{1,2}, Т.И. Гареев²

¹*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

E-mail: georg@itam.nsc.ru

Продemonстрированы процессы кристаллизации наноразмерных частиц в расширяющейся струе высокоэнтальпийной сильно неравновесной плазмы на примере титана с последующим нанесением их на поверхность. Источником плазменного потока служил дисковый магнетогидродинамический ускоритель. На вход ускорителя подавался транспортный газ с добавкой газообразных прекурсоров. Поток, генерируемый МГД-ускорителем, приобретал скорость порядка нескольких километров в секунду и истекал в вакуум. Образовавшаяся струя обтекала подложку, располагавшуюся на расстоянии порядка ширины канала от выхода ускорителя, на которой образовывалось гладкое покрытие. При отнесении подложки от ускорителя на расстояние, на порядок большее ширины канала, образовывалось покрытие, состоявшее из наноразмерных кристаллов.

Ключевые слова: дисковый магнетогидродинамический ускоритель плазмы, наноструктуры, напыление наночастиц

Введение

Для модификации поверхностей материалов, применяемых в машиностроении, приборостроении, химической промышленности и других отраслях, часто используется нанесение на эти поверхности покрытий. С помощью напыления, в частности, повышают термостойкость, твердость, улучшают защиту от коррозии, увеличивают износостойкость, управляют оптическими свойствами поверхностей, формируют катализаторы и т.д. Получаемые покрытия различаются адгезией к поверхности, однородностью и шероховатостью в зависимости от применяемого метода напыления. Требуемые свойства наносимого покрытия определяют метод его нанесения или диктуют необходимость разработки нового. В частности, покрытия, состоящие из наноразмерных частиц, могут быть использованы при изготовлении катализаторов, для повышения тока термоэлектронной

* Исследование проведено в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН.

эмиссии и пр. Напыление наноразмерных частиц сопровождается технологическими трудностями, например, использование заранее приготовленных нанопорошков осложняется их агломерацией при хранении, а также уносом наночастиц мимо обрабатываемой поверхности потоком газа или плазмы, применяемых в процессе напыления, в отличие от микроразмерных частиц. Эти проблемы могут быть решены в случае образования наночастиц в потоке непосредственно перед напылением в результате резкого снижения плотности несущего частицы газа до натекания потока на обрабатываемую поверхность. В предлагаемой работе описаны способы синтеза наночастиц в потоке и напыления их на поверхность.

1. Образование наночастиц при конденсации паров

В работе [1] обсуждается процесс образования космической пыли при столкновении космических тел. Приведено решение задачи о конденсации пара при его адиабатическом расширении в вакууме с образованием пыли на примере железного метеорита, столкнувшегося с неким небесным телом и испарившегося вследствие этого столкновения. Учтена ионизация образовавшегося при столкновении газообразного железа. Показано, что зародыши частиц, в том числе на ионах, образуются в основном вблизи линии насыщения, при дальнейшем охлаждении конденсация происходит на образовавшихся зародышах. Там же приведено решение задачи о конденсации быстро испаренного при 35000 К грамма железа, что близко к лабораторным условиям. Это позволило оценить характерное время конденсации около 50 мкс, когда облако пара достигает размера 30 см.

В работах [2-8] изучалось образование наноразмерных частиц алюминия в расширяющейся сверхзвуковой струе водорода. Алюминий вносился в поток водорода испарением навесок металла в форкамере сопла. Центрами конденсации в этом случае являлись спонтанно образовавшиеся димеры. В отличие от задачи, решавшейся в [1], где температура снижалась за счет излучения и адиабатического расширения, теплота парообразования уносилась холодной сверхзвуковой струей водорода. При натекании струи, содержащей частицы, на поверхность подложки на последней образовывалось покрытие. Описанные методики характеризуются относительно низкой производительностью (порядка 10 нм/мин) и не могут обеспечить высокую адгезию наносимого покрытия с подложкой ввиду низкой скорости падающих на поверхность частиц. Для улучшения адгезии частиц можно использовать их ускорение в детонационной волне [9].

Условия, при которых происходит конденсация частиц из плазменного облака, близкие к условиям задач, решения которых описаны в [1], могут быть реализованы в высокоэнтальпийном потоке неравновесной плазмы, генерируемом дисковым МГД-ускорителем. В [10] приводятся следующие параметры потока метановой плазмы, генерировавшейся импульсным дисковым МГД-ускорителем: скорость потока на выходе $3 \div 4$ км/с, статическое давление от 1 до 0,5 кПа, плотность электронов n_e от $\approx 10^{-16}$ см⁻³ на выходе из ускорителя до $2 \cdot 10^{-15}$ см⁻³ на расстоянии 100 мм от него. Оценочные измерения температуры на выходе из сопла по отношению к интенсивностям водородных линий дали величину порядка 4000 К. Длину свободного пробега атомов, считая их твердыми шарами, оценим как $\lambda = 1/\sigma N \sim 1$ см, где σ — сечение сталкивающихся частиц. Диаметр частиц составляет величину порядка 0,2 нм, а $N \approx 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³ — их плотность, оцененная по измеренным значениям температуры и давления для потока метановой плазмы. То есть столкновениями между нейтральными частицами можно пренебречь.

Обмен кинетической энергией между атомами происходит через их столкновения с ионами, так как ионы не экранированы и их плотность ненамного уступает плотности нейтралов, а сечения столкновений велики вследствие заряд-дипольного взаимодействия. Далее будет выполнена соответствующая оценка. Характеристики потока, генерируемого ускорителем, зависят от расхода газа, его молекулярной массы, величины разрядного тока и прочих управляющих параметров.

Изначально ускоритель использовался для получения высокоэнтальпийного потока метановой плазмы и изучения пиролиза метана в этих условиях. При натекании метановой плазмы на преграду было обнаружено образование качественного углеродного покрытия на ней [10].

В ускоряемый газ, в этом случае называемый транспортным газом, можно внести газообразные прекурсоры, которые в результате нагрева в разряде диссоциируют (происходит их пиролиз) с последующим образованием соединений или элементарных веществ после выхода потока из области разряда. Если эти вещества или соединения обладают достаточно высокой температурой испарения, то они будут конденсироваться вне ускорителя в расширяющейся струе транспортного газа. В результате на выходе можно получить двухфазный поток. Например, если внести моносилан SiH_4 в аргон, то в разрядном промежутке ускорителя будет протекать диссоциация $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 4\text{H}$ с образованием газообразного кремния. После истечения плазмы из ускорителя температура в потоке снижается, уменьшается также плотность электронов — десятикратное снижение n_e происходит за время, превышающее 25 мкс. При этом в результате расширения плазменной струи имеет место конденсация кремния. Оценим скорость роста частиц кремния в поле ионов. Нейтральные атомы, попадая в электрическое поле ионов, поляризуются, приобретая дипольный момент $p = \alpha E = ea/r^2$, и притягиваются к иону с силой $F = -4ea/r^5$. Здесь α — поляризуемость атома, r — текущее расстояние между атомом и ионом, e — заряд иона. Поляризуемость атомов α может быть оценена величиной их атомного объема [11]. Расстояние r меняется в пределах максимально от $r \approx n^{-1/3}$ до 0, для оценки примем заниженное значение для плотности ионов $n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Время, которое требуется нейтральному атому для притяжения к иону, составляет величину $t \approx (r^7 m / (60 e^2 a))^{0,5} \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, где m — масса атома. Таким образом, время конденсации всего кремния, находящегося в потоке, в поле иона составляет несколько десятков микросекунд. Размер образовавшейся частицы составит около 10 нм, если концентрация моносилана в начальной смеси с аргонном была 10 % при 10 %-ной ионизации аргона. При уменьшении коэффициента ионизации размер образующихся частиц увеличивается. Приведенные грубые оценки позволяют определить, что область конденсации будет иметь протяженность примерно 100 мм при характерной скорости потока, получаемого в МГД-ускорителе, составляющей порядка нескольких километров в секунду. Приведенная оценка не учитывает теплопередачу от конденсирующихся частиц атомам аргона, уносящим теплоту парообразования и потерь на излучение. Предполагается, что поскольку плотность аргона много больше плотности газообразного кремния, столкновения атомов аргона с образующейся частицей происходят достаточно часто для ее эффективного охлаждения.

Поскольку частицы конденсируются в потоке, имеющем скорость порядка нескольких километров в секунду, они также движутся со скоростью потока. Поэтому при высокоскоростном столкновении частиц с твердой поверхностью могут происходить их внедрение в мишень, частичное или полное их плавление и химические реакции

между веществами подложки и частиц. Эти процессы способствуют высокой адгезии наносимого слоя с подложкой.

Оценим величину скорости частицы, проникающей в материал подложки при столкновении с поверхностью.

В случае, когда адгезия обеспечивается внедрением твердой частицы в менее твердый материал подложки (например, частицы карбида вольфрама в стальную поверхность), оценка осуществляется следующим образом: $G \approx p/\tau S$, где p — импульс частицы, S — площадь ее сечения, τ — время торможения частицы при соударении, G — модуль сдвига стали. Считая частицу сферической с плотностью $\rho = 15,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и полагая $\tau = 2d/c_{\text{wc}}$, где c_{wc} — скорость продольного звука в монокристалле вольфрама, получим оценку скорости, при которой происходит внедрение частицы в стальную подложку: $v \approx 2300 \text{ м/с}$. Частицы с меньшей плотностью должны быть ускорены до пропорционально большей скорости. Соответственно, скорость течения газа, содержащего прекурсора, должна быть такой же и иметь статическую температуру, превышающую температуру испарения целевого продукта (например, 6000 К для монокристалла вольфрама). Чтобы обеспечить такую величину статической температуры в потоке аргона, ускоренного в сопле Лавала, требуется нагревать ускоряемый газ (аргон) в форкамере до 11000 К. Кроме технической сложности нагрева газа в форкамере до указанной величины, возникает проблема загрязненности потока испарившимся материалом стенок форкамеры. Использование МГД-ускорителя в качестве генератора струи, содержащей напыляемые частицы, позволяет придавать последним достаточную скорость для их внедрения в поверхность.

2. Экспериментальная установка

На рис. 1 приведена схема установки. Канал ускорителя образован двумя диэлектрическими дисками — 1 и 2 — с радиусами $R = 100$, расположенными на расстоянии 20 мм друг от друга. В центре канала находится сверхзвуковое сопло 3. Величина зазора

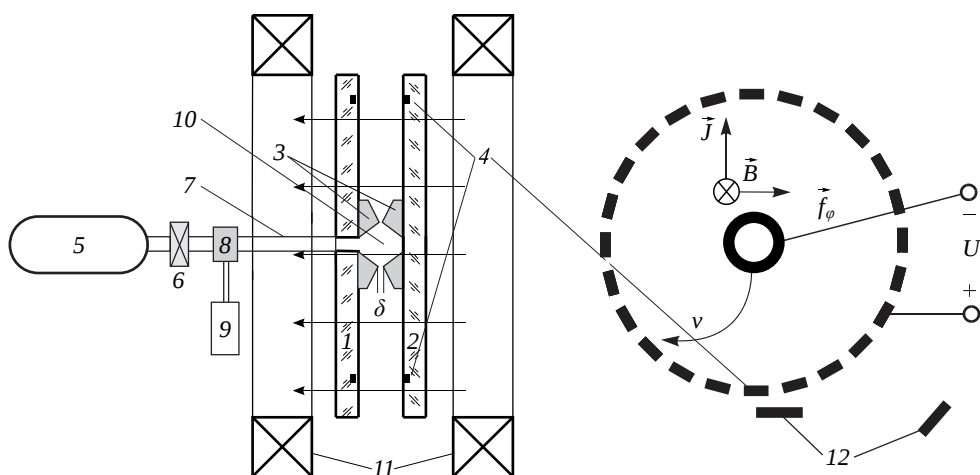


Рис. 1. Схема ускорителя.

Осевой разрез: 1, 2 — стенки канала, 3 — сверхзвуковое сопло-катод, 4 — аноды, 5 — емкость для транспортного газа и газообразного прекурсора, 6 — клапаны, 7 — трубка, 8 — смеситель, 9 — емкость для жидкого прекурсора, 10 — форкамера, 11 — катушки электромагнита, 12 — обрабатываемые подложки, пунктир — аноды, сплошная линия — сопло-катод; $\vec{J}$, $\vec{B}$, $\vec{f}_\varphi$ — векторы тока, магнитной индукции и силы, действующей на поток.

критического сечения сопла равна δ . На схеме слева показана система внесения жидкого прекурсора (подробное описание см. ниже). Плазмообразующие газы и жидкости подаются из емкостей 5 и 9 соответственно, снабженных клапанами 6. Цифрой 8 обозначен смеситель, являющийся частью системы внесения жидкого прекурсора. После открывания затворов и установления течения на электроды подается импульсное напряжение U . На разрядный ток, нормальный к магнитному полю, действует сила Ампера, ускоряющая поток (на схеме справа). Ускорение происходит только в случае осуществления режима объемного разряда. Снаружи ускорителя могут располагаться подложки 12 на различных расстояниях от ускорителя. Ускоритель установлен внутри откачиваемого до давления менее 10 Па ресивера с объемом 5 м³, поэтому можно считать, что ускоренный поток истекает в вакуум. Дискковый МГД-ускоритель без радиального потока и существенно меньшей мощности изучался в работе [12] в качестве источника низкотемпературной плазмы.

Покрытие толщиной до 300 нм за один пуск ускорителя при использовании только газообразного прекурсора (метана) образовывалось при конденсации димеров углерода, образовавшихся в разрядном промежутке ускорителя, на холодной поверхности (кремний, стекло, сапфир, металлы). Основные результаты содержатся в публикациях [10, 13–17]. Кратко перечислим некоторые из них. Характерное значение скорости метановой плазмы на выходе из ускорителя порядка 5 км/с, расход метана 0,3 моль/с, продолжительность работы ускорителя 48 мс. Статическая температура на выходе из ускорителя около 3500 К, статическое давление около 700 Па, плотность электронов около 10¹⁶ см⁻³, температура торможения 9000 К. Очевидно, плазма на выходе из ускорителя сильно неравновесная, поскольку при измеренной статической температуре равновесное значение плотности электронов должно быть исчезающе малым. Было также обнаружено, что поток плазмы благородных газов, генерируемый ускорителем, способен протравить кремниевую пластинку на глубину в несколько микрон за один импульс [10]. В дальнейшем была проверена возможность нанесения покрытия из какого-либо химического соединения. В качестве прекурсоров была выбрана стехиометрическая смесь моносилана и метана. Поскольку использовалась 10%-ная смесь моносилана с аргоном, плазмообразующий ускоряемый газ состоял примерно на 80 % из аргона. Почти все образцы покрылись гладкой пленкой, но некоторые из них оказались покрыты наноразмерными кристаллами карбида кремния.

Объяснить наблюдавшийся эффект можно следующим образом. Поверхность преграды, располагавшейся вблизи ускорителя, обтекалась плазмой, содержащей кремний и углерод в газообразной и диссоциированной фазе, поскольку статическая температура потока достаточно высока. При контакте с холодной поверхностью происходила быстрая конденсация с образованием аморфного карбида кремния, создававшего гладкую поверхность покрытия. На удалении от ускорителя газ расширялся, остывая и создавая условия для образования карбида кремния и его конденсации. Эффективными центрами конденсации служат ионы, выделяющаяся теплота парообразования уносится аргонном. Поэтому преграда, установленная на достаточном удалении, покрывалась нанокристаллами карбида кремния.

В случае, когда прекурсор при нормальных условиях находится в конденсированном состоянии, установка (см. рис. 1) содержит испаритель, инжектирующий пары прекурсора в канал подачи транспортного газа. В качестве прекурсора был выбран четыреххлористый титан, имеющий достаточно низкую температуру кипения — $T_{\text{кип}} = 136,3$ °C [18]. Следует отметить, что многие галогениды имеют низкую температуру кипения и могут

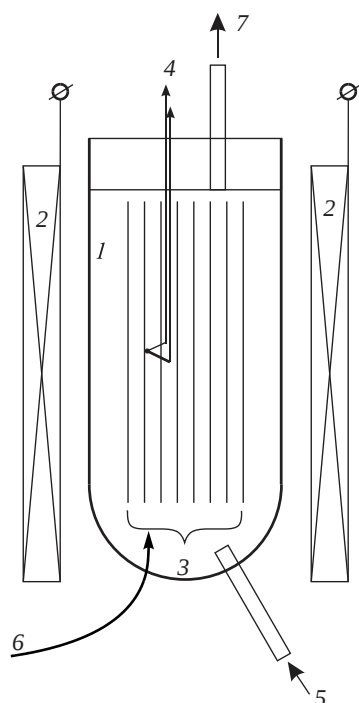


Рис. 2. Схема испарителя.

- 1 — корпус испарителя, 2 — нагреватель,
3 — пакет из листов никелевой фольги,
4 — термопара, 5 — смеситель,
6 — никелевая фольга, 7 — выпускной штуцер.

быть использованы для нанесения покрытий как источники индивидуальных веществ, так и их соединений. Поскольку галогениды химически активны, это выдвигает требование к химической инертности материалов, из которых сконструирована система их инъекции и подачи смеси в форкамеру 10. Применение галогенидов может приводить к загрязнению образующегося покрытия галогенидами. Чтобы уменьшить или исключить присутствие галогенов в покрытии, в транспортный газ (азот) добавлялся водород.

На рис. 2 показана схема испарителя жидкого прекурсора. Цифрой 1 обозначен его корпус, размещенный внутри нагревателя 2. Внутри испарителя находится пакет из листов никелевой фольги 3, нагреваемых до температуры, превышающей температуру кипения хлорида титана. Никель выбран ввиду его инертности к галогенидам. Температура нагрева контролируется с помощью термопары 4. Через штуцер 5 в испаритель подается транспортный газ, который также может содержать газообразные прекурсоры. Через трубку 6 внутри пакета из листов фольги впрыскивается жидкий прекурсор. Через штуцер 7 полученная нагретая смесь транспортного газа и прекурсоров подается в форкамеру ускорителя. Для поддержания температуры используется терморегулятор 2ТРМ1. Рабочий цикл установки начинается с подачи жидкого прекурсора в испаритель и, с некоторой задержкой, транспортного газа. После установления давления в форкамере включается МГД-ускоритель.

3. Нанесение покрытий

На рис. 3 представлена схема расположения образцов при нанесении покрытий. Цифрой 1 указано положение центра ускорителя, 2 — его выхода. Образцы 3 располагались на расстоянии d от края и могли нагреваться до температуры 1000 °С омическим нагревателем 4. Нагрев контролировался регулятором ТРМ2 с помощью термопары 5. Стрелками 6 показано направление плазменного потока. На обтекаемой плазмой подложке образуется покрытие из химических элементов, содержащихся в потоке и (или) их соединений. Расстояние d может быть выбрано в диапазоне от 0 до 1500 мм.

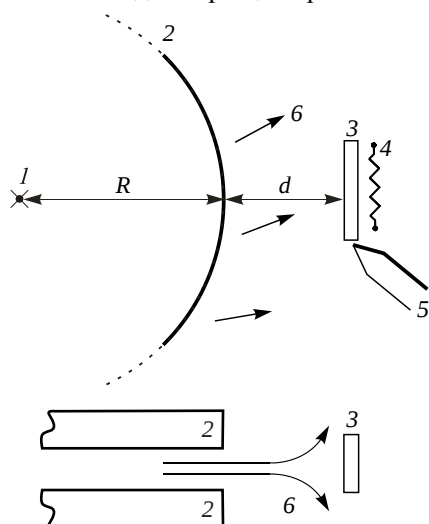


Рис. 3. Схема нанесения покрытия.

- 1 — центр ускорителя, 2 — край канала ускорителя,
3 — нагреваемый образец (до 6 штук), 4 — омический нагреватель, 5 — термопара, 6 — холодный образец,
 d — расстояние от края ускорителя (0–1500 мм).

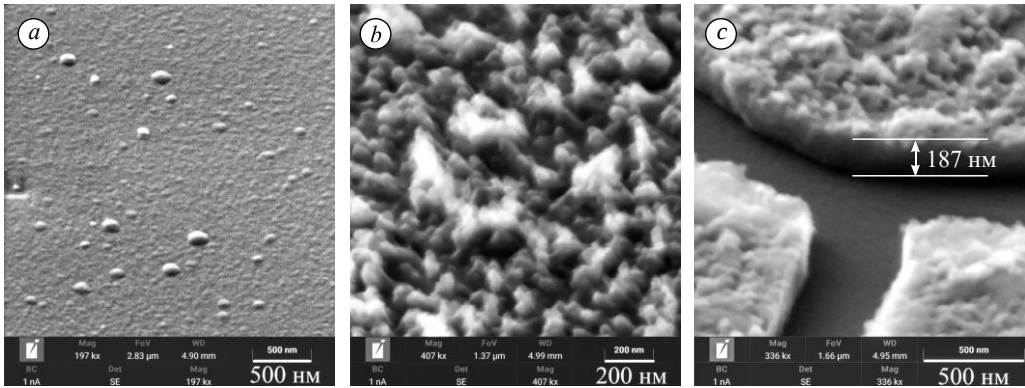


Рис. 4. Изображение покрытий, полученных на расстояниях от края ускорителя $d = 40$ (a), 240 (b), 340 (c) мм.

В качестве подложек в описываемых экспериментах использовались пластинки площадью $1 \div 2$ см², отколотые от трехдюймовых кремниевых планаров с шероховатостью менее 50 нм.

Были получены снимки поверхности нескольких напылений с помощью электронного микроскопа (рис. 4). На рис. 4a наблюдается относительно гладкая поверхность, полученная, по-видимому, из газовой фазы потока, при расположении образца на расстоянии 140 мм от центра ускорителя. При увеличении времени пролета газа наблюдается уже осаждение частиц из двухфазного потока (см. рис. 4b), что подтверждает возможность получения и нанесения наночастиц, размер которых составляет около 50 нм, в едином процессе, в данном случае на расстоянии 340 мм. На рис. 4c показана трещина в покрытии, по которой можно оценить скорость роста пленок в этом процессе. При толщине 186 нм и длительности процесса 48 мс скорость роста составляет 3,6 мкм/с.

С помощью рентгеновской приставки электронного микроскопа проведен анализ элементного состава полученных покрытий (см. таблицу). Обнаружено наличие титана, однако присутствие азота не выявлено, что свидетельствует об отсутствии реакции образования нитрида титана.

Нанесение покрытия на растворимую подложку позволяет изготавливать тонкие пленки. Так, путем внесения паров вольфрама в поток аргона с добавкой метана были получены покрытия на сколах кристаллов хлорида калия. Пары вольфрама образуются в результате электроэрозии вольфрамовых проволок диаметром 0,5 мм, установленных на катоде. После погружения сколов в воду пленки всплывали, затем их помещали под сканирующий электронный микроскоп для изучения. На рис. 5 приведены изображения пленок карбида вольфрама, полученных в результате четырехкратного нанесения покрытий на сколах, установленных на расстоянии 20 и 120 мм от ускорителя. Толщина

Таблица
Элементный состав

Элемент	Символ	Массовая доля, %	Атомная доля, %
Углерод	C	6,08	12,4
Азот	N	0,0	0,0
Кислород	O	11,96	18,31
Кремний	Si	75,12	65,53
Хлор	Cl	1,44	0,99
Титан	Ti	5,41	2,77

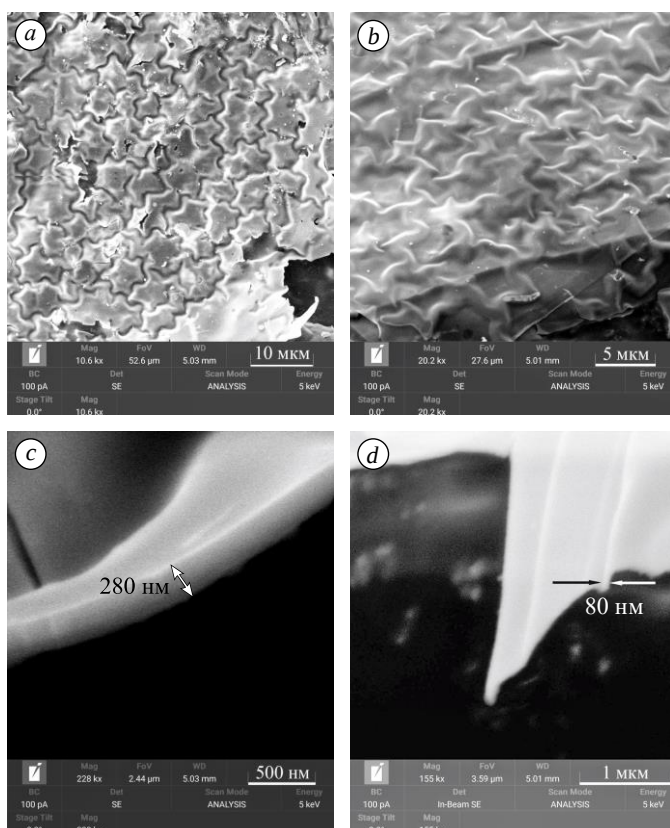


Рис. 5. Изображение пленок из карбида вольфрама, полученных на расстояниях $d = 20$ (a, c) и 120 (b, d) мм.

этих пленок составляла 80 и 280 нм соответственно, их площадь после нанесения увеличивалась с образованием складок. Причина такого поведения неясна. Пленки имеют небольшое количество отверстий, но при наложении двух пленок они могут образовывать мембраны без сквозных отверстий.

На описанный в работе способ получения покрытий получен патент [19].

Закключение

В потоке высокоэнтальпийной плазмы, генерируемом дисковым МГД-ускорителем, могут образовываться наночастицы в результате конденсации химических элементов, внесенных в поток. Модель образования наночастиц, описанная ранее авторами в статье [20], уточнена в настоящей работе, и приведены дополнительные данные о нанесении покрытия из карбида вольфрама. При натекании этого потока на твердую поверхность на последней может образовываться покрытие. На достаточном удалении поверхности от ускорителя покрытие состоит из наноразмерных кристаллов.

Большая доля кремния объясняется тем, что регистрируется рентгеновское излучение приповерхностного слоя подложки глубиной порядка 2 мкм. Из этого слоя только 0,18 мкм приходится на покрытие. Большое количество кислорода регистрируется из-за химических реакций между кислородом воздуха с материалом образца после извлечения его из вакуумного объема. Видно также, что не весь хлор удален из покрытия, возможно, необходимо увеличить содержание водорода в транспортном газе.

Авторы благодарны В.Н. Снытникову за содействие в проведении исследований на электронном микроскопе.

Список литературы

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений // М.: Наука, 1966. 687 с.
2. Ген М. Я., Зискин М. С., Петров Ю.И. Исследование дисперсности аэрозолей алюминия в зависимости от условий их образования // Докл. АН СССР. 1959. Т. 127, вып. 2. С. 366–368.
3. Ген М.Я., Петров Ю.И. Дисперсные конденсаты металлического пара // Успехи химии. 1969. Т. 38, вып. 12. С. 2249–2278.
4. Yacamán M. J., Ocaña Z.T. High-resolution dark-field electron microscopy of small metal particles // Physica Status Solidi A. 1977. Vol. 42, Iss. 2. P. 571–577.
5. Hagena O. F., Obert W. Cluster formation in expanding supersonic jets: Effect of pressure, temperature, nozzle size, and test gas // J. Chem. Phys. 1972. Vol. 56, Iss. 5. P. 1793–1802.
6. Golomb D., Good R.E., Bailey A.B. et al. Dimers, clusters, and condensation in free jets. II // J. Chem. Phys. 1972. Vol. 57, Iss. 9. P. 3844–3852.
7. Петров Ю. И. Кластеры и малые частицы. М: Наука, 1986. 386 С.
8. Bowles R.S., Kolstad J.J., Coilo J.M. Generation of molecular clusters of controlled size // Surface Sci. 1981. Vol. 106, Iss. 1–3. P. 117–124.
9. Ульяницкий В.Ю., Ненашев М.В., Калашников В.В. и др. Опыт исследования и применения технологии нанесения детонационных покрытий // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2010. Т. 12, вып. 1–2. С. 569–575.
10. Golubov A.I., Katsnelson S.S., Pozdnyakov G.A. Interaction of a high-enthalpy jet with surfaces and chemically active media plasma science // IEEE Transactions on, 2010. Vol. 38, Iss. 8. P. 1840–1849.
11. Физическая энциклопедия / Ред. А.М. Прохоров. М: Большая Российская энциклопедия. 1994. Т. 4. 704 с.
12. Makrinich G., Fruchtmann A. Experimental study of a radial plasma source // Phys. Plasmas. 2009. Vol. 16, No. 4. P. 043507–043508.
13. Svitashva S.N., Pozdnyakov G.A. Monitoring technological conditions for preparing dlc films in supersonic flow of hydrocarbon plasma // Key Engng Mater. 2013. Vol. 538. P. 281–284.
14. Fedoseeva Yu.V., Pozdnyakov G.A., Okotrub A.V., Kanygin M.A., Nastaushev Yu.V., Vilkov O.Y., Bulusheva L.G. Effect of substrate temperature on the structure of amorphousoxygenated hydrocarbon films grown with a pulsed supersonic methane plasma flow // Applied Surface Sci. 2016. Vol. 385. P. 464–471.
15. Dultsev F.N., Kolosovsky E.A., Nastaushev Y.V., Pozdnyakov G.A. Investigation of the properties of amorphous carbon films obtained in a supersonic gas jet // Surface and Coatings Technology. 2014. Vol. 246. P. 46–51.
16. Nastaushev Yu.V., Gavrilova T.A., Fedosenko E.V., Dultsev F.N., Pozdnyakov G.A. Diamond-like carbon films formed by means of pulsed supersonic plasma flow deposition // Solid State Phenomena. 2014. Vol. 213. P. 137–142.
17. Свиташева С.Н., Щеглов Д.В., Настаушев Ю.В., Поздняков Г.А. Оптические свойства и морфология алмазоподобных пленок, полученных в сверхзвуковом потоке углеводородной плазмы // Автотметрия. 2011. Т. 47, вып. 5. С. 59–66.
18. Химическая энциклопедия / Гл. ред. Н.С. Зефирова. М: Большая Российская энциклопедия. 1995. Т. 4. 639 с.
19. Пат. на изобретение RU 21812939. Способ плазменного получения покрытия из наноразмерных частиц и устройство для плазменного получения покрытия из наноразмерных частиц для осуществления способа / Поздняков Г.А., Гареев Т.И. / Патентообладатель ИТПМ СО РАН, заявл. 10.04.2023; опубл. 05.02.2024, Бюл. № 4.
20. Gareev T.I., Pozdnyakov G.A. Nanoparticles fabrication in high-enthalpy plasma flow and covering them on a surface // 6th Intern. Conf. on Gas Discharge Plasma and Their Applications (GDPA-2023). 2023. Vol. 5, No. 3. P. 8–15.

*Статья поступила в редакцию 20 ноября 2024 г.,
после доработки — 29 марта 2024 г.,
принята к публикации 11 апреля 2024 г.*