

**ARC DEPOSITION OF COATINGS BASED ON ALUMINUM OXIDE
IN ELION MODE**

*Vladimir Viktorovich Shugurov, Ilya Viktorovich Lopatin ^a,
Yuriy Khalyafovich Akhmadeev, Ivan Igorevich Merzlyakov*

Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskyy pr. 2/3,
634055, Tomsk, Russia

^a lopatin@opee.hcei.tsc.ru

ABSTRACT

Experiments on the synthesis of a coating based on aluminum oxide using arc deposition and a gridless ion acceleration system were carried out. The studies were carried out on an experimental bench based on the NNV-6.6-11 setup using two plasma generators: PINK for gas plasma generating and an arc evaporator with an A7 aluminum alloy cathode for gas-metal plasma generating. The substrate temperature was controlled by using the elion mode of plasma-physical devices operation. The possibility of deposition of a non-conductive coating based on aluminum oxide while maintaining a given temperature by use of the elion mode of system operation is shown. The phase composition of the obtained films and its change depending on the substrate temperature and other deposition conditions have been studied. It is important to note that no negative bias was applied to the substrate during deposition. The substrate temperature affects the phase composition of the resulting coating.

KEYWORDS

Bulk plasma; ion extraction; arc deposition; aluminum oxide; phase composition.

**ДУГОВОЕ НАПЫЛЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ
В ЭЛИОННОМ РЕЖИМЕ**

*Владимир Викторович Шугуров, Илья Викторович Лопатин ^a,
Юрий Халяфович Ахмадеев, Иван Игоревич Мерзляков*

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, Томск,
пр. Академический, 2/3

^a lopatin@opee.hcei.tsc.ru

АННОТАЦИЯ

Проведены эксперименты по синтезу покрытия на основе оксида алюминия с использованием электродугового осаждения и бессеточной системы ускорения ионов. Исследования проводились на экспериментальном стенде на базе установки ННВ-6.6-И1 с использованием двух генераторов плазмы: ПИНК для генерации газовой плазмы и дугового испарителя с катодом из алюминиевого сплава А7 для генерации газометаллической плазмы. Температуру подложки

задавали с помощью элионного режима работы плазмофизических устройств. Показана возможность нанесения непроводящего покрытия на основе оксида алюминия при поддержании заданной температуры за счет использования элионного режима работы системы. Проведено исследование фазового состава полученных пленок и его изменение в зависимости от температуры подложки и других условий напыления. Важно отметить, что во время осаждения к подложке не прикладывалось отрицательное смещение. Температура подложки влияла на фазовый состав получаемого покрытия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Объемная плазма; извлечение ионов; дуговое напыление; оксид алюминия; фазовый состав.

Введение

Оксид алюминия (Al_2O_3) является технологически значимым и распространенным материалом благодаря высокой твердости и механической стойкости, электроизоляционным, а также термическим свойствам [1–3]. При этом известно несколько метастабильных фаз оксида алюминия, к ним относятся гамма, дельта, тета, эта, каппа, бета и йота [4]. Износостойкими являются только фазы альфа или каппа из-за их относительно высокой твердости [5]. В связи с вышесказанным, перспективными выглядят покрытия на основе оксида алюминия [6–8]. Функциональные покрытия широко используются в промышленности, так как изделия с такими покрытиями приобретают улучшенные трибологические, химические либо термические свойства [9]. Покрытия на основе оксида алюминия получают как CVD методами [10], так и PVD с использованием магнетронного [11], дугового [12] и других методов. Пленки на основе оксида алюминия также могут иметь разный фазовый состав. Единственной термостабильной фазой при этом является α -фаза [13], что, наравне с ее низким коэффициентом теплопроводности, определяет ее особую значимость для получения термобарьерных покрытий. Такой тип покрытий востребован, например, в авиационной промышленности при производстве авиадвигателей. В этих условиях требуемая температура рабочей среды значительно превышает допустимые рабочие температуры конструктивных элементов [14]. Проблемой получения таких покрытий является высокая температура получения α -фазы оксида

алюминия в равновесных условиях (свыше $1200\text{ }^\circ\text{C}$) [15]. Такая температура недостижима для абсолютного большинства используемых для подложек материалов. Это приводит к необходимости использовать методы воздействия потоками ускоренных частиц на растущую пленку при формировании покрытий на основе оксида алюминия. Самым простым и наиболее распространенным методом воздействия ускоренными частицами на поверхность является иммерсионный метод. Метод предполагает, что в объемную плазму помещается обрабатываемая подложка и на нее подается отрицательное смещение. Это обеспечивает ускорение ионов из плазмы на подложку с энергией, определяемой величиной электрического смещения. Такое ионное воздействие позволяет влиять на элементный и фазовый состав получаемых покрытий в условиях, когда и подложка, и покрытие являются электропроводящими. Однако, оксид алюминия является диэлектриком, что осложняет использование такого метода ускорения ионов. Частично эта проблема решается при подаче импульсного смещения [16], однако с ростом толщины получаемого покрытия до десятков микрометров простота реализации и эффективность такого подхода снижается. Альтернативным подходом к решению проблемы сообщения энергии ионам, приходящим на обрабатываемую поверхность, является предварительное формирование ионного пучка с использованием соответствующей плазмы. Далее уже сформированным ионным пучком производится облучение растущей пленки. Существует множество конструкций источ-

ников ионного пучка с плазменным эмиттером [17], важной их конструктивной особенностью является наличие ускоряющего электрода. Данные электроды, чаще всего выполняются в виде сетки, на которую при работе с негелевыми ионами осаждаются покрытия, изменяя ионную прозрачность системы формирования пучка и исключая их длительную и надежную работу. Однако, как показано нами ранее, возможно формирование ионного пучка в системе, не предполагающей наличие ускоряющего электрода как конструктивного элемента [18]. В этом случае роль ускоряющего электрода выполняет плазма дополнительного разряда, зажигаемого в рабочей камере. Дополнительным фактором в такой системе оказывается то, что заряд ионов, приходящих на обрабатываемую поверхность, компенсируется электронами из плазмы вспомогательного разряда. Это исключает отражение ускоренных ионов от обрабатываемой поверхности, так как сама поверхность оказывается под «плавающим» потенциалом, который в нашем случае всегда ниже потенциалов плазмы и анода вспомогательного разряда за счет высокой подвижности электронов в плазме вспомогательного разряда. Таким образом, предлагаемый подход позволяет производить напыление покрытий, в том числе непроводящих, с регулируемой энергией бомбардирующих подложку ионов без подачи на нее отрицательного смещения. Однако известно, что подача отрицательного смещения используется не только для придания ионам заданной энергии, но и для поддержания необходимой температуры подложки, от которой зависит структура и свойства получаемых покрытий. Отсутствие отрицательного смещения подложки исключает возможности использования регулируемого ионного нагрева. Ранее нами была показана возможность использования для нагрева подложки электронной компоненты плазмы при электронно-ионной (элионной) обработке [19, 20].

В данной работе приведены результаты исследований, направленных на разработку метода напыления покрытий на основе окси-

да алюминия с использованием бессеточного формирования пучка в двойном электростатическом слое, образованном между плазмой двух разрядов: дугового с катодным пятном и несамостоятельного дугового с накаливаемым катодом. Поддержание температуры подложки в процессе напыления обеспечивалось электронной компонентой плазмы с использованием схемы элионной обработки.

1. Описание экспериментальной установки

Эксперименты проводились на экспериментальном стенде, созданном на базе промышленной технологической установки ННВ 6.6-И1 с размерами вакуумной камеры 600×600×600 мм (рис. 1). Откачка камеры производилась турбомолекулярным насосом с производительностью 500 л/с. В процессе напыления пленок использовались два плазмофизических устройства. Для генерации газовой плазмы использовался генератор ПИНК [21], а для создания газо-металлической плазмы использовался дуговой катодный испаритель с расходуемым катодом из алюминиевого сплава А7. Газовое питание системы осуществлялось с помощью двух регуляторов РРГ 10. Один из них обеспечивал подачу аргона одновременно в полость генератора плазмы ПИНК и дуговой испаритель, а второй подавал кислород в рабочую камеру через трубку, конец которой был подведен непосредственно к эмиссионному окну системы формирования ионного пучка. Особенностью использования генератора плазмы ПИНК в представленной работе было использование в процессе напыления покрытий кислорода, который химически активен и эффективно окисляет нагретый до температуры термоэмиссии (свыше 2000 °К) вольфрамовый катод, существенно сокращая срок его службы. Для уменьшения этого эффекта на торец полого катода помещалась диафрагма из нержавеющей стали с отверстием Ø 25 мм, что в условиях подачи аргона в катодную полость генератора затрудняло проникновение в нее кислорода из рабочей камеры.

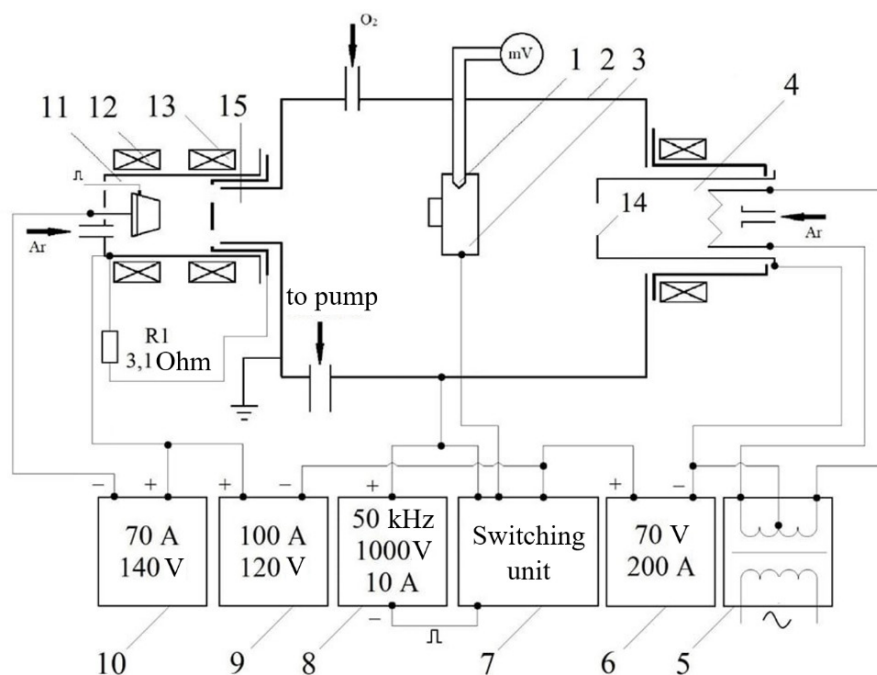


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

- 1 – термопара; 2 – вакуумная камера; 3 – подложкодержатель; 4 – генератор газовой плазмы ПИНК;
 5 – источник питания накала термокатода; 6 – источник питания газового разряда;
 7 – блок переключения; 8 – источник питания смещения; 9 – источник ускоряющего напряжения;
 10 – источник питания дугового разряда; 11 – поджигающий электрод; 12 – стабилизирующая катушка;
 13 – фокусирующая катушка; 14 – диафрагма; 15 – экран

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup:

- 1 – thermocouple; 2 – vacuum chamber; 3 – substrate holder; 4 – gas plasma generator PINK;
 5 – thermionic cathode power supply; 6 – gas discharge power supply; 7 – switching block; 8 – bias power supply; 9 – accelerating voltage source; 10 – arc discharge power supply; 11 – ignition electrode; 12 – stabilizing coil;
 13 – focusing coil; 14 – diaphragm; 15 – shield

Система питания разряда и смещения образцов включает в себя блок переключения, обеспечивающий элионный режим работы. Этот режим включает два подрежима: подрежим ионной очистки образцов (ионный подрежим, использовался лишь на этапе первичной очистки), когда анодом разряда являются стенки вакуумной камеры с площадью поверхности $\approx 20 \times 10^3 \text{ см}^2$, а на держатель образцов подается отрицательное электрическое смещение, и подрежим электронного нагрева образцов (электронный подрежим), когда держатель образцов с площадью поверхности $\approx 200 \text{ см}^2$ играет роль анода разряда генератора ПИНК. Держатель образцов находился на оси источника ионов, на расстоянии

200 мм от плоскости эмиссионного окна. Электронный подрежим работы системы характеризуется повышенным напряжением горения разряда генератора плазмы ПИНК, что обусловлено образованием положительного анодного падения в плазме вблизи анода малой площади. Такое распределение потенциала в разряде обеспечивает эффективный нагрев держателя образцов электронной компонентой плазмы. Необходимо отметить, что в процессе напыления непроводящего слоя оксида алюминия на лицевую сторону держателя, ток разряда генератора газовой плазмы в электронном подрежиме замыкался лишь на обратную поверхность держателя, обращенную от эмиссионного окна.

Блок переключений электронного и ионного подрежимов способен работать с частотой 1–100 Гц с задаваемым коэффициентом заполнения (долей электронного подрежима работы, k) в диапазоне 15–80%. Электрическое питание газового разряда генератора плазмы ПИНК осуществлялось промышленным сварочным выпрямителем марки ВД 201. Питание вольфрамового накала генератора плазмы ПИНК осуществлялось от стабилизированного источника питания переменного тока с частотой 2 кГц и выводом средней точки выходного трансформатора. Для питания дугового катодного испарителя использовался источник питания со стабилизацией выходного тока. Ускоряющее напряжение подавалось от источника питания с возможностью стабилизации выходного тока, напряжения либо мощности, а предварительная очистка поверхности образцов осуществлялась импульсным источником питания с амплитудой до 1000 В, частотой 50 кГц и коэффициентом заполнения импульса 15–80%.

Работа системы ускорения ионов обеспечивается конфигурацией электродов и магнитных полей, при которой замыкание полного тока разряда генератора газовой плазмы через эмиссионное окно $\varnothing 65$ мм затрудняется. Таким образом обеспечивается встречная эмиссия ионов из газо-металлической плазмы разряда дугового испарителя в направлении подложки и электронов из газовой плазмы в направлении анода дугового разряда.

В качестве подложки использовались образцы с размерами $\varnothing 18 \times 5$ мм, изготовленные из стали Ст20 (С – 0,17 – 0,24%, Si – 0,17 – 0,37%, Mn – 0,35 – 0,65%, Ni – 0,25%, S – 0,04%, P – 0,04%, Cr – 0,25%, Cu – 0,25%, As – 0,08%, Fe ~98%) с предварительно нанесенным подслоем Cr_2O_3 . В соответствии с литературными данными [22] такой подслоем используется для получения пленки оксида алюминия в α модификации в силу близости их структуры и параметров решет-

ки. Измерение толщины пленки проводилось на универсальном профилометре TriboTEST от производителя TRIBOTechnic. Для исследования элементного состава полученных пленок оксида алюминия использовался ретровый электронный микроскоп Philips SEM 515, оснащенный микроанализатором EDAX ECON IV. Исследование фазового состава и структурных параметров образцов проводилось на дифрактометре XRD-6000 на CuK_α -излучении. Анализ фазового состава проведен с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4.

2. Напыление покрытий на основе оксида алюминия и их исследование

Перед нанесением покрытий во всех режимах проводилась ионная очистка поверхности в аргоновой плазме при величине отрицательного смещения 500 В в течение 10 минут. В процессе очистки подавалось ускоряющее напряжение до 50 В, что увеличивало величину фиксируемого ионного тока на подложке, дуговой испаритель не включался. После предварительной ионной очистки источник смещения подложки отключался и производился электронный нагрев подложки до заданной температуры. После этого в камеру подавался кислород и включался дуговой катодный испаритель.

На первом этапе была проведена серия из трех процессов напыления, в которых температура менялась за счет изменения доли времени замыкания на держатель образцов электронной компоненты газовой плазмы, при этом энергии ускоренных ионов оказывалось достаточно для попадания на обрабатываемую поверхность и ее бомбардировки. Остальное время и держатель и образец находились под «плавающим» потенциалом. Были проведены процессы напыления при температуре подложки $T = 500$ °С, 600 °С и 700 °С. Условия напыления для всех образцов приведены в табл. 1. Толщина подслоя

Cr_2O_3 для этой серии образцов составляла 1 мкм. Давление рабочей смеси в камере при соотношении $\text{Ar}:\text{O}_2$ равном 1:10 составляло $p = 0,35$ Па. Ток разряда дугового источника оставался неизменными и составлял $I_{\text{arc}} = 35$ А. Ускоряющее напряжение в первой серии экспериментов составляло $U_{\text{acc}} = 35$ В, ток в ускоряющем промежутке $I_{\text{acc}} = 30$ А. Напыление для каждого температурного режима проводилось в течение часа. Ток разряда генератора плазмы ПИНК составлял $I_{\text{d}} = 100$ А. По прошествии двух часов после напыления остывшие образцы извлекались из камеры.

Измерение толщины полученных пленок показало, что, несмотря на одинаковое время напыления при равном токе разряда и давлении рабочей смеси, толщина полученных пленок при разных температурах подложки оказалась различной: 0,65 мкм, 1,25 мкм и 1,65 мкм для 500 °С, 600 °С и 700 °С соответственно. Исследование элементного состава показало наличие алюминия, кислорода и хрома, атомная доля которого достигала 10% ат. Фазовый состав пленки на образцах № 1–3 исследовался в геометрии «скользящего пучка» ввиду малой толщины полученных слоев, результаты рентгенофазного анализа приведены в табл. 2.

Рост толщины пленки по мере увеличения температуры подложки, вероятно, связан с увеличением эффективности окисления напыляемого алюминия, что косвенно подтверждается ростом доли кислородосодержащих фаз и, соответственно, снижением доли чистого алюминия по мере роста температуры подложки. Также необходимо отметить, что во всех случаях фиксируется железосодержащая фаза Al_2FeO_4 , наличие которой может объясняться диффузией железа из подложки через дефекты Cr_2O_3 подслоя. Видно, что α -фаза оксида алюминия фиксируется во всех трех случаях и максимальная ее доля выявляется при температуре 600 °С. Такие соотношения представленных

фаз можно объяснить следующим образом: по мере роста температуры подложки растет эффективность окисления алюминия, однако при температуре подложки 700 °С диффузия железа через дефекты подслоя значительно активизируется, возможно в т.ч. за счет увеличения количества таких дефектов, что приводит к интенсивному образованию кубической фазы Al_2FeO_4 , снижающей долю α -оксида алюминия. Низкотемпературной кубической γ -фазы оксида алюминия достоверно выявлено не было ни на одном из образцов, обработанных в первой серии экспериментов, однако наличие кубической железосодержащей фазы Al_2FeO_4 не позволило однозначно утверждать о невозможности ее образования в приведенных условиях. В связи с этим на втором этапе проведения экспериментов толщина подслоя Cr_2O_3 была увеличена до 3,5 мкм для предотвращения диффузии железа в наносимый слой оксида алюминия. Ток разряда дугового источника при этом был увеличен до $I_{\text{arc}} = 50$ А с целью увеличения скорости напыления и стабильности работы системы, с этой же целью был увеличен суммарный поток аргона (с 0,6 до 0,7 л/с), подаваемый в равной мере в дуговой испаритель и генератор плазмы ПИНК, соотношение $\text{Ar}:\text{O}_2$ при этом составило 1:8,5 соответственно, а давление рабочей смеси в камере $p = 0,38$ Па. Температура подложки также регулировалась за счет элионного режима работы системы и была выбрана равной 600 °С на основании первой серии экспериментов. Ускоряющее напряжение при напылении образца № 4 было установлено равным 25 В, ток в ускоряющем промежутке в такой конфигурации составил 23 А при токе разряда генератора ПИНК 100 А. В этих условиях скорость роста пленки увеличилась до 5,6 мкм/ч. Исследование элементного состава пленки на образце № 4 показало наличие алюминия, кислорода и до 7 % ат. хрома, который, вероятно, диффундировал сквозь растущее покрытие в процессе

его осаждения. Рентгенофазный анализ покрытия на образце № 4 приведен в табл. 2, а на рис. 2 приведен участок рентгенограммы для этого образца.

Видно, что на образце № 4 подслои и его элементы обнаруживаются, несмотря на значительную (5,6 мкм) толщину полученного слоя. Также обнаруживается алюминий, что может объясняться наличием микрокапель в полученном слое, так как напыление в рамках представленной работы проводилось без систем сепарации микрокапельной фракции. Содержание α -фазы оксида алюминия составило всего 16% масс., при этом интересным является появление большой доли (41% масс.) моноклинной θ -фазы оксида алюминия, равновесная температура образования которой превышает 1000 °С [23], при этом низкотемпературных фаз, включая кубическую γ -фазу оксида алюминия, не обнаружено, полученные результаты позволили предположить, что энергии бомбардирующих ионов достаточно для предотвращения ее образования, но для получения однофазного покрытия, состоящего из термостабильной α -фазы оксида алюминия (без учета наличия микрокапельной фракции), необходимо увеличение энергии бомбардирующих ионов за счет увеличения ускоряющего напряжения. Наличие же элементов подслоя показало, что в данных условиях диффузия хрома полностью не предотвращается. В связи с этим был проведен процесс напы-

ления № 5. Напыление производилось поверх ранее полученного покрытия на образце № 4, на который был нанесен штрих для дальнейшего определения толщины полученной пленки. Процесс напыления № 5 производился в тех же условиях, что и процесс № 4, но с увеличенным до 35 В ускоряющим напряжением, ток в ускоряющем промежутке составил 34 А, время напыления, как и во всех предыдущих экспериментах, составило 1 час. Измеренная толщина покрытия составила 5,4 мкм. Элементный анализ полученного покрытия показал наличие 61 % ат. алюминия и 38% ат. кислорода и менее половины процента хрома. Результаты рентгенофазного анализа покрытия на образце № 5 также приведены в табл. 1. Исследование покрытий № 4 и № 5 проводилось в стандартной геометрии Брегга-Брентано. Видно, что покрытие № 5 содержит 36% алюминия, вероятно за счет микрокапель, 63% α -фазы оксида алюминия и менее процента нестехиометрического оксида алюминия $Al_{2,67}O_4$, доля хромосодержащих фаз ниже предела чувствительности прибора.

Таким образом показано, что представленная система позволяет регулировать фазовый состав получаемого покрытия на основе оксида алюминия, вплоть до практически полного исключения его низкотемпературных метастабильных фаз, путем изменения величины ускоряющего напряжения.

Таблица 1. Условия напыления

Table 1. Deposition conditions

Процесс	p , Па	Ar:O ₂	T, °C	κ , %	I_{arc} , А	U_{acc} , В	I_{acc} , А	I_d , А
№ 1	0,35	1:10	500	25	35	35	30	100
№ 2	0,35	1:10	600	55	35	35	30	100
№ 3	0,35	1:10	700	75	35	35	30	100
№ 4	0,38	1:8,5	600	55	50	25	23	100
№ 5	0,38	1:8,5	600	55	50	35	34	100

Таблица 2. Фазовый состав покрытий

Table 2. Phase composition of coatings

Процесс	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, мас. %	Параметры решетки, Å	Размер ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^{-3}$
№ 1	Al_2O_3 -167	17	a = 4,7677 c = 12,9738	76	1,6
	Cr_2O_3 -167	10	a = 4,9532 c = 13,5931	66	2,1
	Al-225	55	a = 4,0496	57	0,4
	Al_2FeO_4 -227	18	a = 8,2530	96	1,3
№ 2	Al_2O_3 -167	45	a = 4,7653 c = 12,8700	45	5,8
	Cr_2O_3 -167	16	a = 4,9681 c = 13,5547	33	1,3
	Al-225	26	a = 4,0488	12	2,6
	Al_2FeO_4 -227	13	a = 8,1601	12	3,8
№ 3	Al_2O_3 -167	12	a = 4,7631 c = 12,9838	36	1,9
	Cr_2O_3 -167	25	a = 4,9539 c = 13,5756	85	2,2
	Al-225	20	a = 4,0498	71	1,4
	Al_2FeO_4 -227	43	a = 8,2530	94	2,0
№ 4	Al-225	28	a = 4,0605	68	2,3
	Cr-229	8	a = 2,8813	10	7,0
	Al_2O_3 -167	16	a = 4,7675 c = 12,9511	10	6,3
	Cr_2O_3 -167	7	a = 4,9686 c = 13,4780	12	5,5
	Al_2O_3 -12	41	a = 11,9052 b = 2,8985 c = 5,5220 $\beta = 103,0125$	21	1,6
№ 5	Al-225	36	a = 4,0569	96	0,1
	Al_2O_3 -167	64	a = 4,7326 c = 12,8947	10	5,6
	$Al_{2,67}O_4$ -186	<1	–	–	–

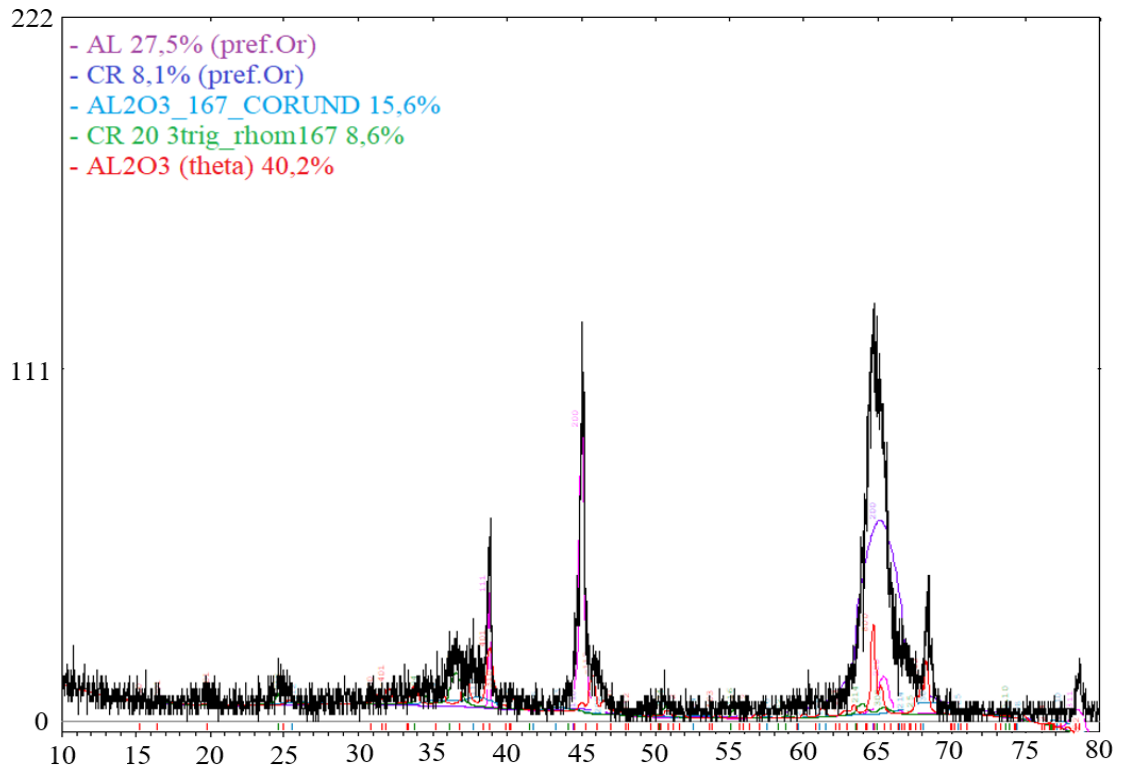


Рис. 2. Участок дифрактограммы покрытия № 4

Fig. 2. Section of the diffraction pattern of coating No. 4

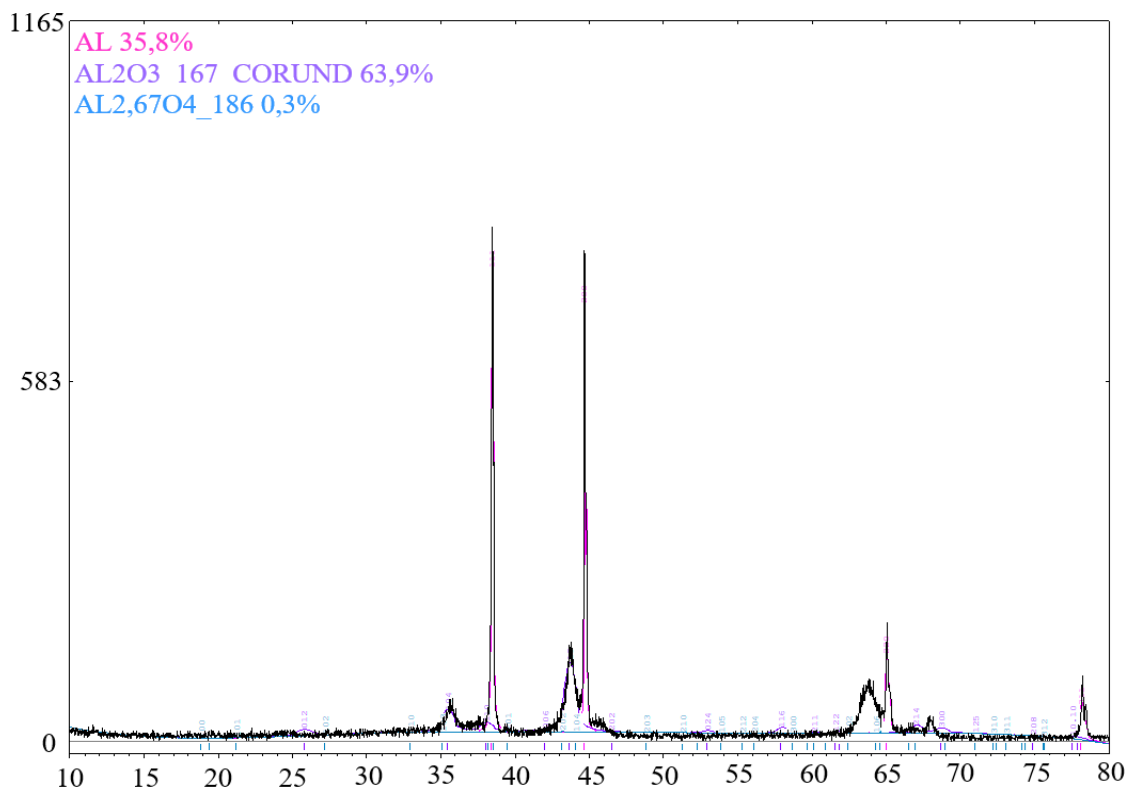


Рис. 3. Участок дифрактограммы покрытия № 5

Fig. 3. Section of the diffraction pattern of coating No. 5

Выводы

Эксперименты показали, что реализованная схема позволяет проводить напыление в эллионном режиме без подачи отрицательного смещения на подложку. Показано, что скорость роста пленки увеличивается в 2,5 раза при увеличении температуры подложки с 500 °С до 700 °С, при этом фазовый состав пленки также изменяется. Также показано, что напыление с использованием данной системы обеспечивает получение покрытий на основе оксида алюминия в т.ч. θ - и α -модификаций без нагрева подложки до температуры равновесного образования этих фаз. Фазовый состав получаемого покрытия на основе оксида алюминия может существенно изменяться не только при изменении температуры подложки, но и при изменении других параметров напыления, включая энергию ускоренных ионов, при этом низкотемпературных фаз, в т.ч. кубической γ -фазы оксида алюминия, достоверно выявлено не было ни на одном из образцов. Также показана возможность напыления покрытия практически не содержащего метастабильных модификации низкотемпературных фаз оксида алюминия.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер: FWRM-2021-0006).

The work was funded by State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FWRM-2021-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Malekshahi M., Sabbaghi S., Rasouli K. Pre-paration of α -alumina/ γ -alumina/ γ -alumina-titania ceramic composite membrane for chloride ion removal // *Materials Chemistry and Physics*. 2022. V. 287. Article number 126218. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126218.
2. Haynes A., Reinhardt L., Lim C. Design and processing of alumina plate composites for ballistic nacre alumina structures // *MRS Advances*. 2018. V. 3, Iss. 18. P. 957–962. DOI: 10.1557/adv.2017.631.
3. Hart LeRoy D. Alumina chemicals: science and technology handbook. New York: Wiley, 2006. P. 618.
4. Wefers K., Misra C. Oxides and hydroxides of aluminum // *Alcoa Technical Paper*. 1987. V. 19. P. 75–92.
5. Schneider, J. M., Sproul W. D. Effect of ion irradiation during deposition on the structure of alumina thin films grown by plasma assisted chemical vapour deposition // *Technol.* 1997. V. 94. P. 172–179.
6. Ghosh S. S., Sil A. Porous alumina thermophotovoltaic film for output voltage enhancement of silicon solar cell at room temperature // *Optical Materials*. 2022. V. 123. Article number 111844. DOI: 10.1016/j.optmat.2021.111844.
7. Shinonaga T., Takata M., Okada A., Inoue M. Alumina film sputter deposition on mold steel by large-area electron beam irradiation // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*. 2021. V. 8. P. 1393–1404. DOI: 10.1007/s40684-020-00243-1.
8. Jiang D., Zhang J., Zhang W., Xin L., Zhu S., Fu Y., Wang F. Preparation and properties of alumina ceramic film on ti-alloy surface // *Journal of the Chinese Society of Corrosion and Protection*. 2019. V. 39, Iss. 6. P. 469–476. DOI: 10.11902/1005.4537.2018.173.
9. Abdel Aal A. Hard and corrosion resistant nanocomposite coating for al alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2008. V. 474, Iss. 1–2. P. 181–187. DOI: 10.1016/j.msea.2007.04.058.
10. Ishida M., Katakabe I., Nakamura T., Ohtake N., Epitaxial Al_2O_3 films on Si by low pressure chemical vapor deposition // *Appl. Phys. Lett.* 1988. V. 52. P. 1326–1328. DOI:10.1063/1.99685.
11. Santos A. M., Catapan R. C., Duarte D. A. Deposition of Ni thin films on alumina foams by magnetron sputtering for application as heterogeneous catalysts // *Vacuum*. 2021. V. 194. Article number 110565. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110565.
12. Rosén J., Mráz S., Kreissig U., Music D., Schneider J. M. Effect of ion energy on structure and composition of cathodic arc deposited alumina thin films // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2005. V. 25. P. 303–317. DOI: 10.1007/s11090-004-3130-y.
13. Gitzen W. N. Alumina as a Ceramic Material. New York: Wiley, 1970. P. 264.
14. Stathopoulos V., Sadykov V., Pavlova S., Bespal'ko Yu., Fedorova Yu., Bobrova L., Salanov A., Ishchenko A., Stoyanovsky V., Larina T., Ulianitsky V., Vinoku-

rov Z., Kriventsov V. Design of functionally graded multilayer thermal barrier coatings for gas turbine application // *Surface and Coatings Technology*. 2016. V. 295. P. 20–28. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.11.054.

15. Rупpi S. Deposition, microstructure and properties of texture-controlled CVD α -Al₂O₃ coatings // *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2005. V. 23, Iss. 4–6. P. 306–316. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2005.05.004.

16. Prenzel M., Kortmann A., Stein A., Von Keudell A., Nahif F., Schneider J. M., Bimodal substrate biasing to control γ -Al₂O₃ deposition during reactive magnetron sputtering // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 114, Iss. 11. Article number 113301. DOI: 10.1063/1.4819227.

17. Щанина П. М. (ред.). Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером. Екатеринбург: УИФ НАУКА, 1993. 150 с.

18. Лопатин И., Ахмадеев Ю., Петров А. Бессеточная система генерации низкоэнергетического ионного пучка на основе тлеющего разряда с полым катодом и внешней инжекцией электронов // *Сборник трудов 8-го международного конгресса «Потоки энергии и радиационные эффекты»*. Томск, 2022. С. 791–796. DOI: 10.56761/EFRE2022.C1-P-022503.

19. Lopatin I. V., Akhmadeev Yu. H., Petrikova E. A., Rygina M. E., Ivanov Yu. F. Evolution of the structure

and properties of AISI 1020 steel subjected to elion nitriding in a low-pressure gas discharge plasma // *Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (Tomsk)*, 2022. P. 921–926. DOI: 10.56761/EFRE2022.C3-P-012501.

20. Lopatin I. V., Akhmadeev Yu. H., Kovalsky S. S., Ignatov D. Yu. Arc discharges operation in “ELION” mode // *Journal of Physics: Conference Series, Proceedings of 15th International Conference on “Gas Discharge Plasmas and Their Applications”*, (GDP 2021), 2021. Article number 012029.

21. Lopatin I. V., Akhmadeev Y. H., Koval N. N., Kovalsky S. S. Plasma generation in the arc discharge with a thermionic cathode in current stabilization conditions // *Journal of Physics: Conference Series. Proceeding 14th International Conference Gas Discharge Plasmas and Their Applications*, (GDP 2019), 2019. V. 1393. Article number 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012046.

22. Gavrilov N. V., Kamenetskikha A. S., Tretnikova P. V., Chukin A. V. Ion assisted deposition of α -Al₂O₃ coatings by anodic evaporation in the arc discharge // *Surface & Coatings Technology*. 2018. V. 337. P. 453–460. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.01.058.

23. Патент РФ 2401856С2, № 2008114107/04, заявл. 13.10.2006; опубл. 20.10.2010.