

Закономерности структурообразования слоев Al вблизи фазового равновесия в системе плазма–конденсат

© В.И. Перекрестов, А.С. Корнющенко, Ю.А. Косминская

Сумский государственный университет,
40007 Сумы, Украина

E-mail: perv@phe.sumdu.edu.ua

(Поступила в Редакцию 3 мая 2007 г.

В окончательной редакции 24 октября 2007 г.)

Предложен принципиально новый технологический подход к формированию пористых структур металлов на изотропных подложках при конденсации обратных диффузионных потоков планарного магнетрона на постоянном токе. Проанализированы физические основы работы самосогласованных распылительных систем. При помощи растровой электронной микроскопии выявлены условия формирования таких основных вариантов пористости, как слабосвязанные между собой микро- и нанокристаллы, а также трехмерные лабиринтные структуры. Установлено, что необходимыми основными предпосылками порообразования являются стационарность процесса и близость к фазовому равновесию в системе плазма–конденсат.

Работа выполнена при финансировании Министерства образования и науки Украины (проект № 71.03.03.07-08).

PACS: 68.55.-a, 81.15.Ef

1. Введение

В последнее время широкий спектр функциональных возможностей пористых нано- и микроструктур вызывает у исследователей неослабевающий интерес. Наиболее часто для формирования пористых материалов используются химическое травление и компактирование из микро- и наночастиц. Наряду с этим определенные успехи были достигнуты при непосредственном формировании пористых слоев в условиях достаточно малых (меньше 0.07) коэффициентов стационарной конденсации [1–4]. Однако развитие этого нового весьма актуального направления не представляется возможным без установления взаимосвязи между механизмами порообразования и технологическими условиями конденсации. Решение этой задачи и определило цель настоящей работы.

2. Физические основы структурообразования в самосогласованных распылительных системах

Объяснение механизма зарождения конденсатов в условиях предельно малых пересыщений выходит за рамки равновесной термодинамики и определяется барьерной нуклеацией [5,6]. В последующем, реализуя максимально возможные энергии химических связей, вещество поатомно встраивается только на активных центрах ростовой поверхности. В качестве таковых могут выступать изгибы моноступенек роста кристаллов, дефекты кристаллической решетки, границы сращивания зерен и т.д. Одним из примеров подобного варианта

конденсации может служить послойный рост кристаллов. По причине ограниченного количества подобных центров усиливается дискретность соответствующего им спектра энергий химических связей. Все это в совокупности при малых пересыщениях определяет более резкую границу критической энергии химической связи E_c атома с ростовой поверхностью, ниже которой поатомная застройка конденсата становится маловероятной. С другой стороны, механизм формирования слоев вблизи равновесия весьма чувствителен к технологическим условиям [7], что предъявляет повышенные требования к стационарности процесса конденсации. В качестве критерия стационарности может выступать неизменность положения E_c в спектре энергий химических связей на активных центрах роста. Например, в отсутствие механизма Франка-ван дер Мерве необходимой предпосылкой воспроизводимого порообразования является неизменность положения E_c в спектре энергий химических связей E_{ai} атомов в положениях полукристалла. Действительно, при таких условиях поатомное встраивание на изгибах моноступенек роста реализуется только при выполнении неравенства $E_{ai} > E_c$ (знаки E_{ai} и E_c не учитываются), т.е. для отдельных кристаллографических плоскостей. Очевидно, набор таких кристаллографических плоскостей уменьшается по мере приближения к фазовому равновесию в системе окружающая среда–конденсат. Следовательно, опережающий рост конденсата в отдельных кристаллографических направлениях на некоторых локальных участках в конечном итоге может привести к образованию пористой структуры.

Необходимо подчеркнуть, что для создания условий объемного порообразования вполне логично использовать объемное диффузионное поле (равновероятное поступление вещества на различные грани кристаллов),

эффективность которого возрастает по мере увеличения давления рабочего газа. Поскольку поглощение ростовой поверхностью примесей может изменять спектр энергий химических связей, конденсация должна проходить в условиях предельно малых парциальных давлений химически активных газов.

Таким образом, необходимым условием формирования пористых металлических слоев является квазиравновесная стационарная конденсация при повышенном давлении высокоочищенной инертной среды.

Пренебрежимо малые равновесные давления ($\sim 10^{-7}$ Па [8]) алюминия при температуре плавления практически исключают возможность реализации условий, близких к равновесным, только за счет осаждения предельно слабых паровых потоков при максимально возможной температуре ростовой поверхности T_c . Другими словами, классический вариант молекулярно-лучевой эпитаксии для этого случая неприемлем. Обойти подобного рода проблему можно при использовании электролитического осаждения, конденсации с пересыщенных растворов, CVD-технологии или разложения металлоорганических соединений. В перечисленных выше хорошо известных технологиях близость к равновесию в основном достигается за счет зависимых от температуры химических процессов, соспособствующих повторному переходу адатомов конденсируемого вещества в раствор или газовую смесь. По сравнению с молекулярно-лучевой эпитаксией такие процессы менее чувствительны к изменениям T_c , а следовательно, легко управляемы. В этой связи представляется перспективным создание аналогичных более универсальных систем, работающих на физических принципах.

Первые системы подобного типа были созданы на базе полого катода. С их помощью удалось осуществить поэтапную сборку слоев с различными вариантами пористости [3] и даже синтезировать отдельные микрокристаллы алмазов [4]. Основой организации близких к равновесным условий в этом случае является интенсификация переходов адатомов в газообразное состояние под действием контактирующей с ростовой поверхностью низкотемпературной плазмы. В этой связи вместо E_{ai} целесообразно использовать эффективные энергии химических связей в виде $E_{ei} = -E_{ai} + (E_s \pm \Delta E)$ (ΔE — отклонение энергии, передаваемой адатомам облучаемыми частицами, от ее среднего значения E_s). Снижение E_{ai} до эффективных значений и позволяет получить близкие к равновесным условия при более низких и вполне доступных T_c , причем минимизация ΔE определяет более высокую стационарность процесса конденсации.

В работе использованы обратные диффузионные потоки планарного магнетрона на постоянном токе. В этом случае подложкодержатель и распыляемая мишень (рис. 1) находились под одним потенциалом, что обеспечивало синхронность изменения, а также организацию таких необходимых для близости к равновесию технологических параметров, как T_c , интенсивность осажда-

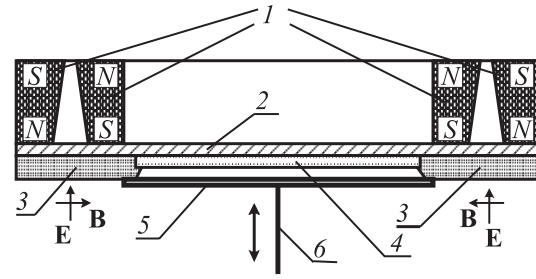


Рис. 1. Распылительная система. 1 — постоянные магниты, 2 — держатель мишени и подложки, 3 — распыляемая мишень, 4 — подложка, 5 — заслонка, 6 — штанга для перемещения заслонки.

емого потока, энергия и поток частиц, воздействующих на ростовую поверхность. Такой принцип работы также способствует самоорганизации стационарности процесса. Действительно, при изменении в определенных пределах мощности разряда синхронно меняются осаждаемый поток и энергия частиц, воздействующих на ростовую поверхность, что в совокупности и может сохранить неизменность положения E_c . Особенность работы самосогласованных ионных распылителей также состоит в том, что после повторного испарения атомы с большой вероятностью вновь ионизируются и осаждаются до тех пор, пока не реализуется достаточно прочная химическая связь [9]. Подобный кольцевой механизм массопереноса усиливает вблизи ростовой поверхности объемное диффузионное поле и позволяет более экономно использовать конденсируемый материал. Необходимо также отметить, что многократные столкновения ионов при повышенных давлениях рабочего газа не только формируют обратные диффузионные потоки, но и усредняют энергию частиц, воздействующих на поверхность роста [10], что является важной предпосылкой для усиления пространственно распределенного роста конденсата. Наряду с этим управлять близкой к равновесной стационарной конденсацией можно подводимой к разряду мощностью и давлением рабочего газа. Поскольку эти параметры достаточно контролируемы, воспроизводимые результаты конденсации легко достижимы.

В настоящей работе конденсация Al проводилась на стекло при давлении аргона (P_{Ar}) 15–25 Па, причем парциальное давление химически активных газов составляло всего $8 \cdot 10^{-8}$ Па. Последнее условие было достигнуто дополнительным распылением титана по методике, изложенной в [11].

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Атомы, находящиеся в положении полукристалла различных кристаллографических плоскостей, окружены различным количеством соседей первого, второго и третьего порядков. Очевидно, для таких положений

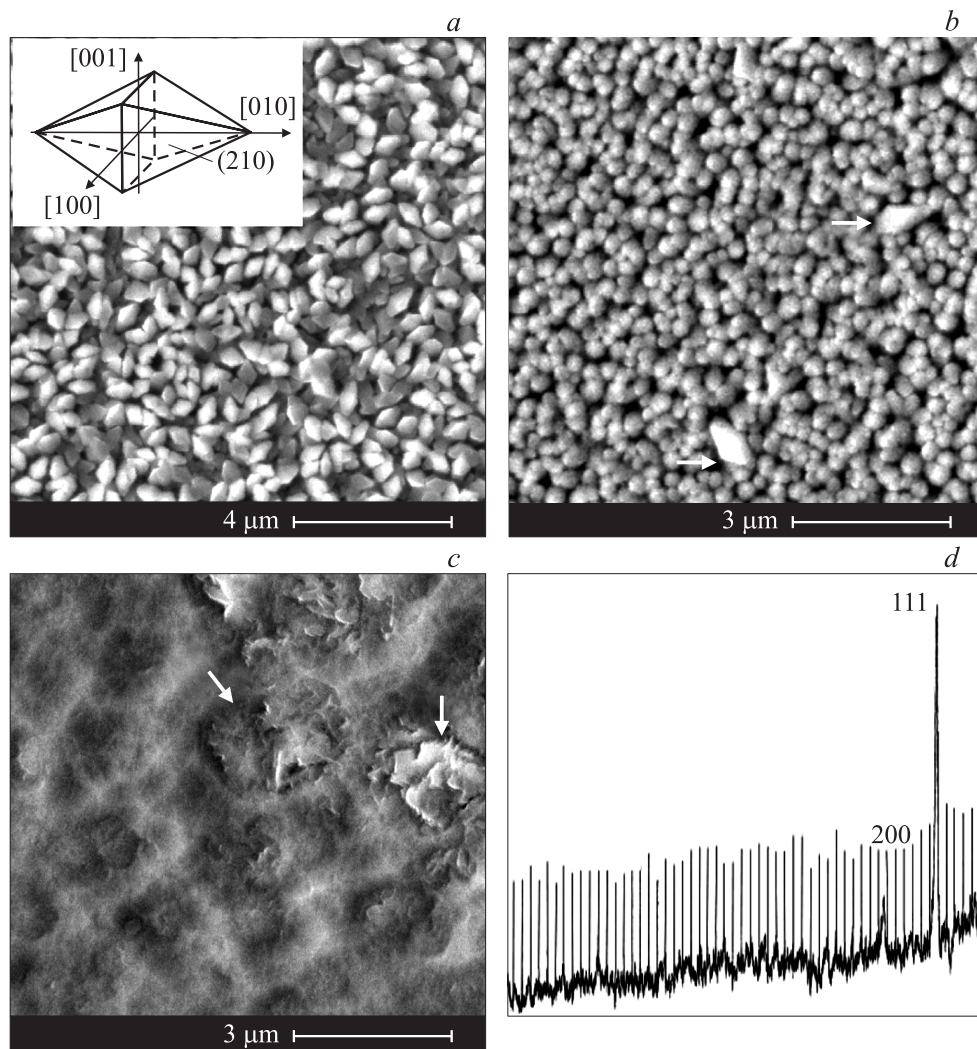


Рис. 2. Изменение структуры конденсатов Al при снижении пересыщения. *a* — $P_w = 1.8$ W, $P_{Ar} = 20$ Pa; *b* — $P_w = 1.8$ W, $P_{Ar} = 15$ Pa; *c* — $P_w = 1.8$ W, $P_{Ar} = 15$ Pa, без водяного охлаждения подложкодержателя; *d* — рентгенограмма, определяющая текстуру зарождения.

атомов E_{ai} будет пропорциональна количеству соседей j -го порядка (Z_j) и условно может быть представлена в виде $|Z_1Z_2Z_3|$. Для атомов алюминия, обладающего ГЦК-структурой значения $|Z_1Z_2Z_3|$ представлены в порядке убывания в таблице. Из приведенных данных следует, что в случае достаточной близости к равновесию формирование структуры должно происходить исключительно на базе застройки плоскостей типа (210). Другими сло-

Значения $|Z_1Z_2Z_3|$ для различных граней ГЦК-кристалла [7]

Грань	$ Z_1Z_2Z_3 $
(210)	6 2 10
(531)	6 3 0
(311)	5 3 10
(110)	5 2 10
(100)	4 1 2
(111)	3 3 9

вами, положение E_c между энергиями |6 2 10| и |6 3 0| (см. таблицу) определяет условия, при которых плоскость (210) является базовой для образования соответствующего габитуса кристаллов. В этой связи из общей массы экспериментального материала была выделена структура, полученная при охлаждении водой подложкодержателя, мощности разряда $P_w = 1.8$ W и $P_{Ar} = 20$ Pa. Важная особенность этой структуры (рис. 2, *a*) состояла в том, что она представляла собой слабо связанные кристаллы, равновесная форма которых соответствовала изложенным выше представлениям. Этот факт является прямым подтверждением выдвинутой концепции и высокой стационарности технологического процесса, а сама структура может использоваться в качестве основы для оценки положения E_c . Необходимо отметить, что статистическая однородность структуры, представленной на рис. 2, *a*, по толщине может составлять десятки микрометров, что объясняется чередой повторных

зародышеобразований на активных центрах ростовой поверхности.

Правильность изложенных выше представлений относительно механизма структурообразования подтверждается также тем, что дальнейшее приближение к равновесию (повышение E_c) путем снижения давления рабочего газа до 15 Pa (все остальные технологические параметры оставались неизменными) приводит к переходу от тангенциального к нормальному росту кристаллов (рис. 2, *b*). В этом случае приближение к равновесию объясняется тем, что понижение давления рабочего газа, с одной стороны, снижает обратный диффузионный поток конденсируемого вещества, а с другой — повышает энергию частиц, воздействующих на ростовую поверхность. Поскольку энергия $|6 \cdot 2 \cdot 10|$ для ГЦК-кристаллов является максимально возможной (см. таблицу), дальнейшее повышение E_c неизбежно должно привести к снижению свободной поверхностной энергии посредством трансформации формы кристаллов. Близость к переходу от тангенциального к нормальному росту кристаллов подтверждается тем, что отдельные кристаллы (на рис. 2, *b* выделены стрелками) сохранили огранку предыдущей структуры. Более строго подобную трансформацию механизма структурообразования можно объяснить на основании изменения свободной энергии α_i моноступеньки роста. Так, в простейшем случае [7]

$$\alpha_i = nE_{ai} - nkT_c \ln(1 + 2\chi),$$

где $\chi = \exp(-E_{ai}/kT_c)$; n — плотность атомов на торце моноступеньки.

Как уже отмечалось ранее, рост энергии частиц, облучающих ростовую поверхность, приводит к понижению E_{ai} до эффективных энергий, что наряду с возможным повышением T_c неизбежно обращает в нуль α_i . В этих условиях размытие моноступенек представляется столь значительным, что, по сути, ростовая поверхность превращается в структурно однородную атомно-шероховатую систему. На этих поверхностях в отличие от атомно-гладких конденсация с одинаковой вероятностью может происходить в любой точке кристалла, что и определяет нормальный рост, зависящий от локальной температуры поверхности роста, интенсивности ее облучения частицами и величины конденсируемого потока. Переход от ограненных к округлым формам кристаллов в нашем случае имеет резкую границу в силу формирования исходных кристаллов на базе одной плоскости с максимальным значением E_{ai} . Следует также подчеркнуть, что в отличие от тангенциального роста более близкие к равновесию условия исключают вторичное зарождение кристаллов. Этот вывод был сделан на основании неизменности плотности кристаллов на ростовой поверхности, что является предпосылкой формирования столбчатых структур.

Определенный интерес представляет механизм структурообразования в непосредственной близости к равновесию. В нашем случае такие условия были полу-

чены при отключении водяного охлаждения подложкодержателя и сохранении всех прочих технологических параметров предыдущего эксперимента. Как следует из микроструктуры, представленной на рис. 2, *c*, предельно близкая к равновесной конденсация исключает порообразование. Следуя логике изложенных выше представлений, механизм структурообразования в столь экстремальных условиях действительно должен привести к дальнейшему снижению свободной поверхностной энергии за счет уменьшения площади ростовой поверхности. Очевидно, формирование подобных непористых структур во многом определяется текстурой зарождения конденсата. В этой связи на основании рентгеновских исследований установлено, что на этапе зарождения плоскости (111) алюминия параллельна поверхности подложки (рис. 2, *d*). С учетом условий зарождения Фольмера–Вебера для пары алюминий–стекло, а также принимая во внимание наиболее плотную упаковку плоскости (111), можно говорить о том, что такая текстура зарождения определяет минимум свободной энергии границы раздела конденсат–подложка. Наряду с этим плоскости (111) соответствует минимальное значение E_{ai} (см. таблицу). Все эти условия в совокупности, с одной стороны, способствуют образованию конденсируемого тонкого слоя на всей поверхности подложки, а с другой — определяют нормальный рост кристаллов. При этом формирование волнистой морфологии поверхности (рис. 2, *c*) также обусловлено малыми значениями E_{ai} для базовой плоскости (111). Этот факт, а также предельное приближение к равновесию неизбежно должны привести к преобладающей направленности роста, отличной от [111], а следовательно, и к искривлению поверхности конденсата.

Обращает на себя внимание повторное зародышеобразование на углублениях ростовой поверхности (соответствующие участки отмечены на рис. 2, *c* стрелками), указывающее на зависимость пересыщения от кривизны ростовой поверхности. По-видимому, такое сглаживание поверхности возможно только в окрестности равновесия и объясняется отрицательным знаком приращения поверхностной энергии.

Предложенный в работе вариант использования магнетронного распылителя позволяет, увеличивая мощность разряда, снижать E_c не только за счет повышения потока ионов, воздействующих на зону эрозии, но и за счет роста коэффициента распыления. В то же время энергия и поток частиц, воздействующих на ростовую поверхность при повышенных P_{Ar} , с ростом мощности разряда претерпевают менее значительные изменения [10]. Следовательно, совокупные изменения технологических условий при увеличении в некоторых пределах мощности разряда (давление рабочего газа остается неизменным) должны привести к росту пересыщения осаждаемого потока, что и положено в основу дальнейших исследований. Так, на рис. 3 представлен ряд микроструктур, полученных при охлаждении подложкодержателя и изменении мощности разряда в

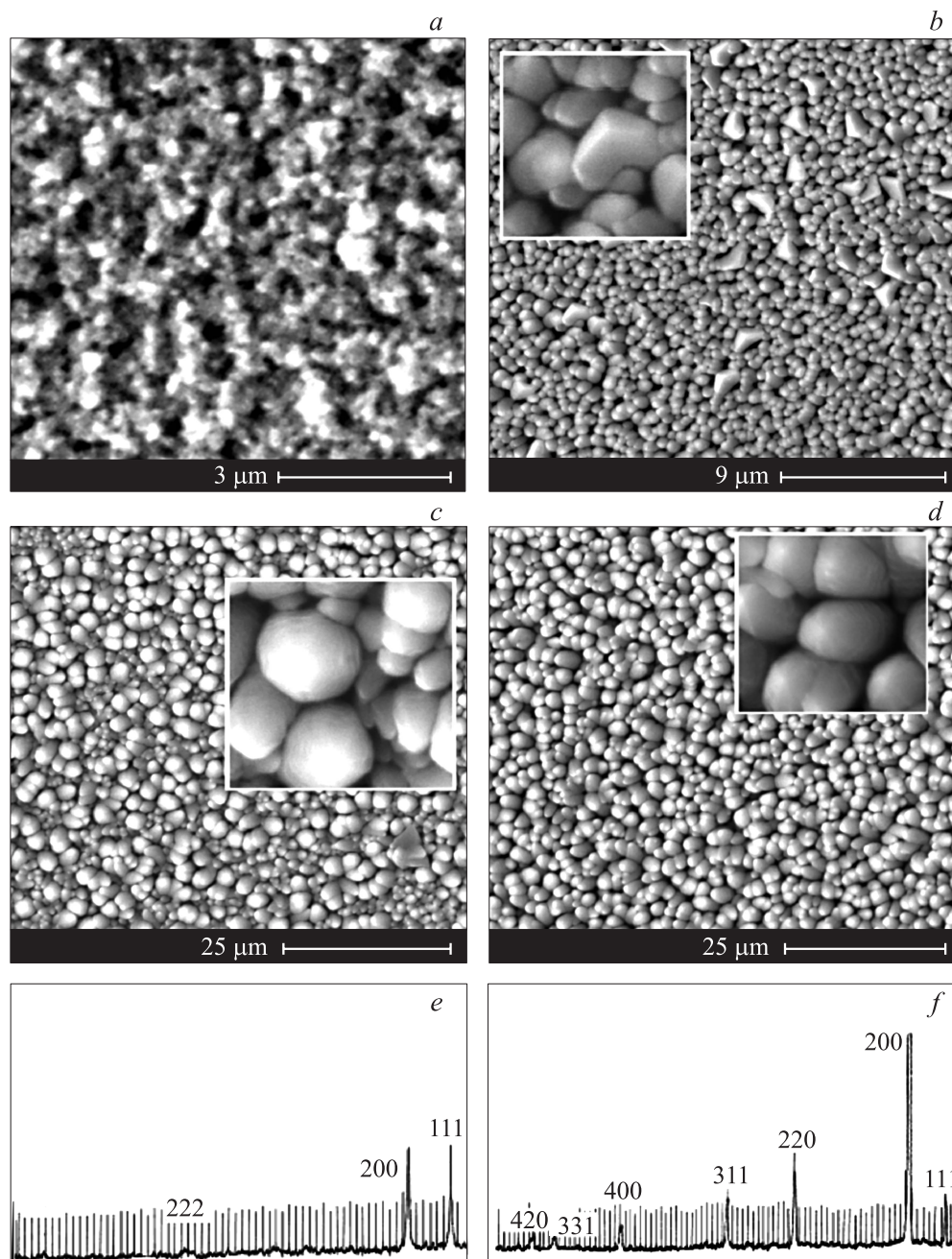


Рис. 3. Изменение структуры конденсатов Al при повышении мощности разряда (P_w, W : a — 1.4, b — 2.7, c — 3.24, d — 4) и рентгенограммы от пористой (e) и столбчатой (f) структур.

пределах от 1.4 до 4 W и $R_{Ar} = 15$ Pa. Анализируя эти микроstructures с точки зрения увеличения мощности разряда в указанных пределах, прежде всего необходимо отметить рост размеров фрагментных образований примерно от 300 nm до $2 \mu m$. При этом происходит переход от трехмерных лабиринтных структур (рис. 3, a) к столбчатым образованиям посредством нормального роста кристаллов (рис. 3, $b-d$). В случае предельно малых подводимых мощностей нельзя исключить из рассмотрения усиливающуюся при этом адсорбцию примесей кристаллографическими плоскостями. Поскольку

различные кристаллографические плоскости могут поглощать примеси в различных количествах, имеет место не только подавление роста отдельных кристаллов, но и более выраженная селективность конденсации, что в конечном итоге и определяет образование трехмерных лабиринтных наноструктур (рис. 3, a). С другой стороны, если не принимать во внимание размеры кристаллов, архитектура конденсатов, структура которых представлена на рис. 3, $b-d$, во многом одинакова, что подтверждает сохранение стационарности процесса конденсации при изменении мощности разряда. Следует также отметить,

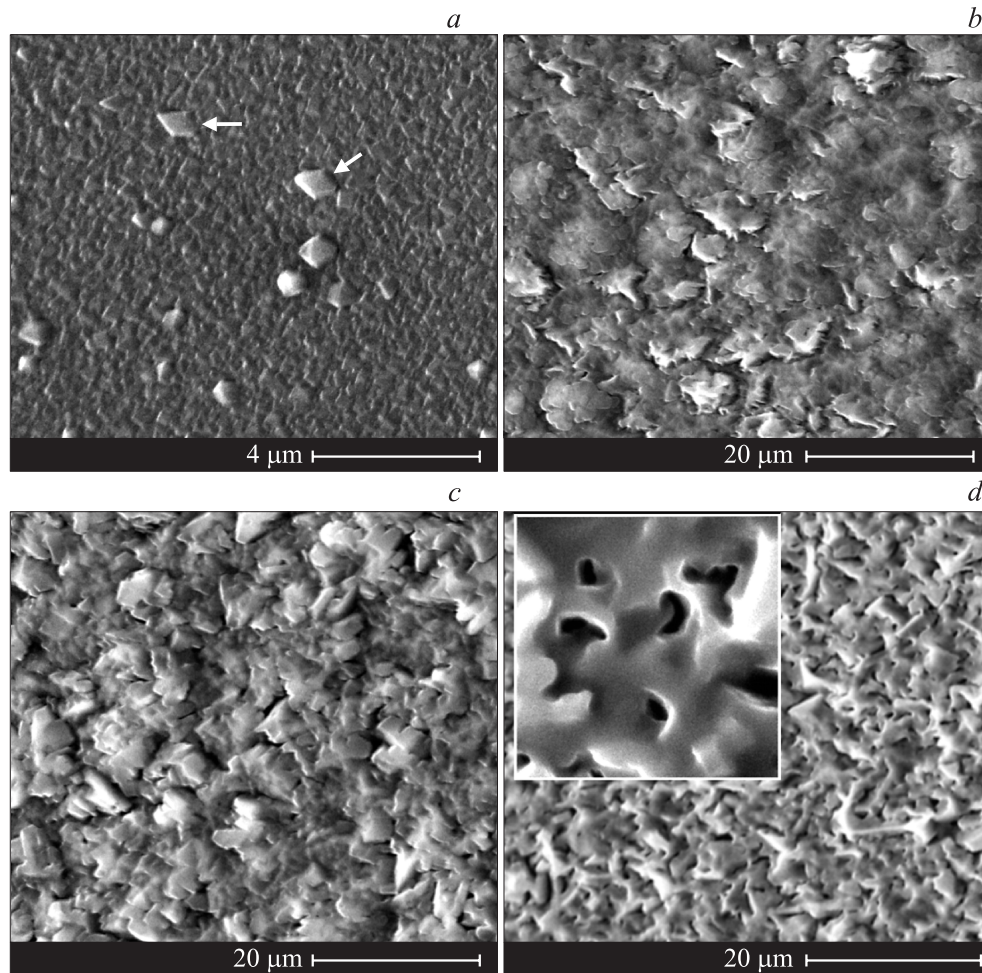


Рис. 4. Зарождение столбчатых (*a*) и лабиринтных (*b–d*) структур.

что переход от лабиринтных образований к столбчатым существенно изменяет текстуру конденсатов (см. рентгенограммы на рис. 3, *e, f*).

При мощности разряда 4.7 W ($P_{Ar} = 15$ Pa) происходят качественные изменения в механизме структурообразования, которые проявляют себя в переходе от столбчатых структур (рис. 3, *d*) к трехмерным лабиринтным (рис. 4, *d*). С целью выяснения столь значительных изменений в структурообразовании в работе проведены дополнительные исследования морфологии поверхности конденсатов и их текстуры, что позволило выделить два этапа формирования как столбчатых, так и лабиринтных структур. В обоих случаях на первом из них формируется покрывающий всю подложку слой, текстура зарождения которого, как правило, определяется параллельностью (111) Al плоскости подложки. При этом толщина базового слоя может составлять 200–1500 nm и возрастает по мере увеличения мощности разряда. Начало второго этапа характеризуется усилением пространственной селективности конденсации, что проявляет себя либо появлением на поверхности роста отдельных ограниченных кристаллов (в случае столбчатых структур

см. рис. 4, *a*), либо опережающим ростом продолговатых кристаллов в значительной мере параллельно поверхности подложки (рис. 4, *b*). По-видимому, эти две разновидности переходов имеют общие предпосылки и обусловлены постепенным снижением пересыщения в процессе конденсации и опережающим ростом только тех локальных участков, энергия связи атомов на которых выше E_c . Например, переход к столбчатым структурам происходит благодаря опережающему росту кристаллов на базе плоскости (210) (см. кристаллы, отмеченные на рис. 4, *a* стрелками). Переход к лабиринтным структурам характерен для более высоких мощностей разряда, причем степень пересыщения непосредственно над ростовой поверхностью в этом случае будет варьироваться более развитым рельефом базового непористого слоя (рис. 4, *b*). Последний факт может расширить спектр кристаллографических плоскостей, застройка которых определяет опережающий локальный рост конденсата, что в конечном итоге приводит к постепенному переходу к лабиринтным образованиям (рис. 4, *b–d*). Отметим, что образование трехмерных лабиринтных структур, подоб-

ных структуре, представленной на рис. 4, *d*, наблюдалось при увеличении мощности разряда вплоть до 10.9 W.

Таким образом, переходы к порообразованию являются следствием постепенного снижения пересыщения в период наращивания конденсата, что скорее всего определяется усилением разогрева ростовой поверхности за счет снижения теплоотвода из-за возрастающей толщины слоев. Очевидно, зарождение конденсата на водоохлаждаемых подложках происходит при более высоких значениях $\Delta\mu$ ($\Delta\mu$ — разность химических потенциалов окружающей среды и конденсата). Однако воздействие плазмы на поверхность роста повышает температуру конденсации, увеличивая при этом численное значение E_c . Подобное нарушение стационарности проявляет себя более ярко при повышенных мощностях разряда и охлаждении подложкодержателя. Наряду с этим формирование высокопористых структур, обладающих низкой теплопроводностью, быстрее восстанавливает стационарность процесса, что в конечном итоге позволяет формировать статистически однородные слои, толщина которых ограничивается только временем осаждения.

На основании варьирования мощности разряда при более высоких давлениях рабочего газа ($P_{Ar} = 20\text{--}25$ Pa) был получен широкий спектр структурных форм в виде слабо связанных между собой трехмерных слоев микроструктур (рис. 5, *a*), лабиринтных структур (рис. 5, *b*) или непористых слоев, которые содержат относительно крупные ограниченные кристаллы (рис. 5, *c*). Эту последовательность структурных изменений можно объяснить соответствующим увеличением пересыщения. Так, на основании габитуса кристаллов, определяющих структуру на рис. 5, *a*, можно утверждать, что рост конденсата происходит преимущественно при застройке плоскости типа (210), т.е. при относительно малых пересыщениях. Наряду с этим образование непористых структур, поверхность которых состоит из хорошо ограниченных кристаллов (рис. 5, *c*), соответствует условиям повышенных пересыщений, при которых в структурообразовании участвует значительное количество основных кристаллографических плоскостей. Очевидно, подобный скачок в повышении пересыщения определяется исключительно ростом P_{Ar} . Механизм образования трехмерной лабиринтной структуры при одновременном увеличении P_{Ar} и мощности разряда (рис. 5, *b*), по-видимому, объясняется замедлением роста коэффициента распыления и соответствующего осаждаемого потока при относительно большой мощности разряда [10].

К числу результатов, которые позволяют расширить представления о функциональных возможностях самосогласованных распылительных систем и также объясняются постепенным снижением пересыщения с повышением толщины слоев, следует отнести итог конденсации при использовании неохлаждаемого подложкодержателя, $P_{Ar} = 25$ Pa и мощности разряда 12.8–16.7 W. Отличительная особенность начального этапа роста полученных в этих условиях конденсатов состоит в формировании пористых структур в виде слабо связанных между

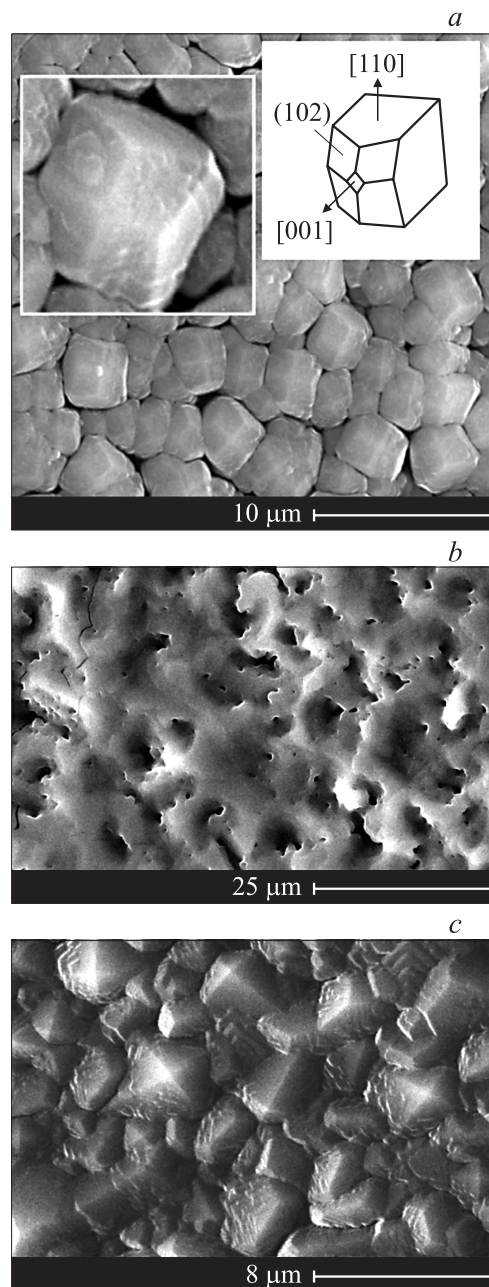


Рис. 5. Структура конденсатов Al, полученных при охлаждении водой подложкодержателя. *a* — $P_w = 9$ W, $P_{Ar} = 20$ Pa; *b* — $P_w = 70$ W, $P_{Ar} = 25$ Pa; *c* — $P_w = 2.4$ W, $P_{Ar} = 25$ Pa. На вставках — увеличенное изображение микроструктуры (слева) и схема расположения ряда его граней и направления [110] (справа).

собой микроструктур произвольной формы (рис. 6, *a*). При этом на основании анализа габитуса кристаллов установлено, что последующий этап формирования слоев характеризуется переходом к опережающему росту кристаллов, основная часть граней которых базируется на плоскости (210) (рис. 6, *a-c*). Подобные закономерности структурообразования еще раз подтверждают факт постепенного снижения пересыщения в процессе

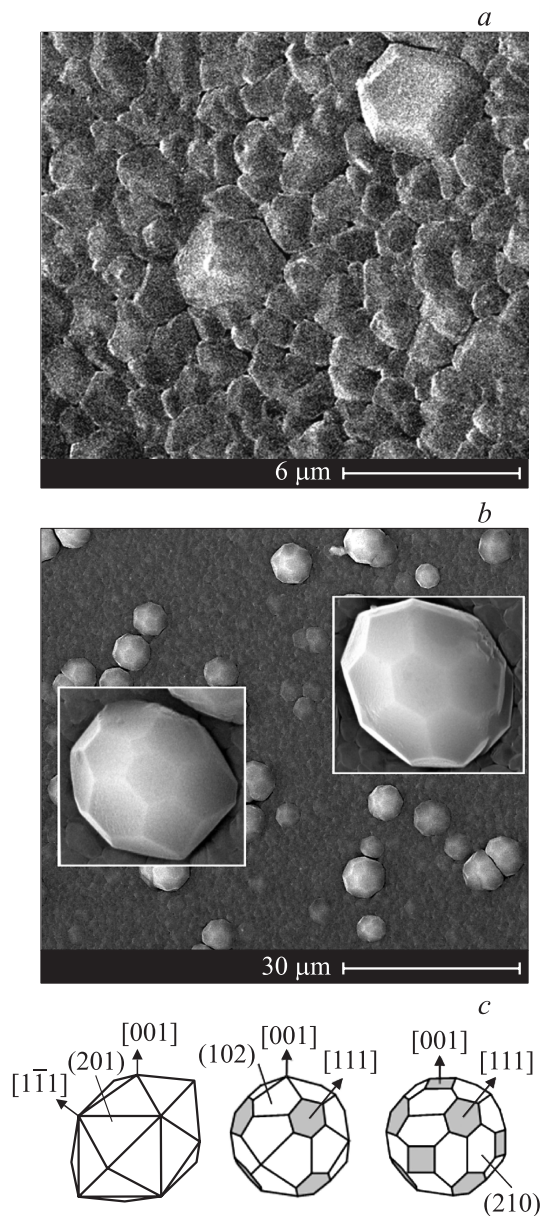


Рис. 6. Этапы формирования шаровидных кристаллов Al при использовании неохлаждаемого подложкодержателя при $P_{Ar} = 25$ Pa и мощности разряда 12.8–16.7 W (a, b) и соответствующие модельные представления (c).

наращивания слоя, а также позволяют объяснить переход к избирательному росту кристаллов на основании повышения критической энергии. Очевидно, округлые формы кристаллов (рис. 6, b) свидетельствуют также о равновероятном поступлении вещества на различные их грани, что представляет собой весьма важную характеристику самосогласованных ионных распылителей.

В заключение отметим, что, несмотря на малые мощности разряда, скорость наращивания слоев изменялась в пределах от 800 до 2000 nm/h, что обусловлено фокусирующим действием потоков плазмы, способствующим конденсации распыленных атомов на ограниченной пло-

щади подложки. С другой стороны, повышение скорости наращивания также обусловлено кольцевым массопереносом атомов вблизи ростовой поверхности [9].

4. Выводы

1) В работе впервые показано, что для получения близких к равновесным стационарным условий можно эффективно использовать не только уже хорошо известные системы кристалл–раствор, кристалл–расплав, или кристалл–газ (газовая смесь), но кристалл–плазма. При этом реализация последнего варианта возможна на основе самосогласованных ионных распылителей, отличительной особенностью которых является более высокая универсальность как перевода вещества в газообразное состояние, так и самоорганизации условий, близких к равновесным.

2) Такой критерий стационарности, как неизменность положения критической энергии в спектре энергий химических связей, может выполняться даже в случае меняющихся технологических макропараметров (например, мощности разряда) и, наоборот, нарушаться при постоянстве последних.

3) Установлены два основных механизма образования пористых структур. Первый из них приводит к формированию трехмерных лабиринтных слоев за счет анизотропии скорости роста кристаллов, а во втором случае высокопористые структуры представляют собой слои слабосвязанных между собой нано- и микрокристаллов, сформированных за счет зародышеобразования на активных центрах роста.

Список литературы

- [1] В.И. Перекрестов, С.Н. Кравченко, А.В. Павлов. ФММ **88**, 5, 72 (1999).
- [2] В.И. Перекрестов, А.В. Коропов, С.Н. Кравченко. ФТТ **44**, 1131 (2002).
- [3] В.И. Перекрестов. Письма в ЖТФ **39**, 19, 41 (2005).
- [4] В.И. Перекрестов, Ю.А. Косминская. Письма в ЖЭТФ **78**, 4, 258 (2003).
- [5] С.А. Кукушкин, А.В. Осипов. УФН **168**, 1083 (1998).
- [6] Ч. Пул, Ф. Оуэнс. Нанотехнологии. Техносфера, М. (2006). 336 с.
- [7] А.А. Чернов. Процессы кристаллизации. Наука, М. (1980). Т. 3. С. 7.
- [8] Технология тонких пленок. Справочник / Под ред. Л. Майсела, Р. Гленга. Сов. радио, М. (1977). Т. 1. 662 с.
- [9] А.Г. Жиглинский, В.В. Кучинский. Массоперенос при взаимодействии плазмы с поверхностью. Энергоатомиздат, М. (1991). 206 с.
- [10] Б.С. Данилин. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. Энергоатомиздат, М. (1989). 328 с.
- [11] В.И. Перекрестов, С.Н. Кравченко. ПТЭ **3**, 123 (2002).