

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

УДК 621/793.14

Поступила в редакцию 20.01.2017

Received 20.01.2017

А. Ф. Ильюшенко¹, М. А. Андреев², Л. В. Маркова¹, Ю. О. Лисовская¹

¹*Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

²*Обособленное хозяйственное структурное подразделение «Институт сварки и защитных покрытий»
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННО-ЛУЧЕВЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНО-
СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ХРОМА**

Целью данной работы является изучение механизма формирования монослоя в многослойном ионно-лучевом наноструктурном покрытии методом просвечивающей электронной микроскопии, а также разработка модели формирования и роста монослоя при ионно-лучевом распылении мишени с ионным ассистированием подложки.

Для исследования механизма формирования и роста монослоя в покрытии была разработана методика препарирования образцов для их последующего изучения с использованием электронного микроскопа Tescan MIRA (Чехия), позволяющего получить изображения поверхности исследуемого объекта с высоким разрешением, особенно при низких ускоряющих напряжениях. Для исследования тонких пленок метод просвечивающей электронной микроскопии используется гораздо чаще, чем сканирующей, поэтому разработана приставка, позволяющая получать изображения в проходящих электронах – ТЕ-детектор для исследования методом сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (STEM – Scanning Transmission Electron Microscopy).

При изучении монослоев методом просвечивающей электронной микроскопии с использованием ТЕ-детектора предложен механизм формирования монослоя в многослойном ионно-лучевом наноструктурном покрытии, состоящий из следующих этапов: адсорбция частиц хрома на поверхности подложки; поверхностная диффузия к ступени винтовой дислокации; 2D-рост монослоя хрома (формирование 2D-террас) из 2D-островков; 2D→3D-переход – переход в режим роста трехмерных островков (3D-рост) по механизму Странского – Крастанова.

Разработана модель формирования и роста монослоя при ионно-лучевом распылении мишени с ионным ассистированием подложки.

Ключевые слова: многослойное наноструктурное покрытие, ионно-лучевое покрытие, механизм Странского – Крастанова, когерентный островок, метод сканирующей просвечивающей электронной микроскопии

A. Ph. Ilyushchenko¹, M. A. Andreev², L. V. Markova¹, Y. O. Lisovskaya¹

¹*Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*Institute of Welding and Protective Coatings of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**APPLICATION OF TEM FOR EVALUATION OF FORMATION OF ION BEAM MULTILAYER
NANOSTRUCTURED COATINGS BASED ON CHROMIUM**

The aim of the work is to study a mechanism of formation of a monolayer in a multilayered ion beam nanostructured coating by transmission electron microscopy (TEM), and a model of formation and growth of a monolayer by ion beam sputtering of target substrate with an ion assisting.

To investigate the mechanism of formation and growth of monolayer in the coating a technique of sample preparation was developed for further study using electron microscopy Tescan MIRA (Czech Republic), allowing to obtain image surface of an object with high resolution, especially at low accelerating voltages. For the study of thin films, transmission electron microscopy is used much more frequently than scanning, so a console has been designed that allows to obtain images in the passing electrons – TE detector for study by scanning transmission electron microscopy (STEM – Scanning Transmission Electron Microscopy).

During study of monolayers by transmission electron microscopy using a TE detector, a mechanism of the formation of monolayer in multilayer ion-beam nanostructured coating has been proposed, consisting of the following steps: the adsorption

of chromium particles on the substrate surface; surface diffusion to the stage of a screw dislocation; 2D-growth of chromium monolayer (2D-formation terraces) of 2D-islands; 2D→3D transition – the transition to three-dimensional island growth mode (3D-growth) by the mechanism of Stransky – Krastanow.

The model of formation and growth of monolayer under ion-beam sputtering of a target with ion-assisted substrate has been developed.

Keywords: multilayer nanostructured coating, ion beam coating, mechanism of Stransky – Krastanow, a coherent island, scanning transmission electron microscopy method

Введение. Особенности роста пленок толщиной около 10 нм к настоящему времени почти не изучены. Несмотря на достаточное количество теоретических работ, экспериментальные данные получены лишь для образцов, имеющих атомарную гладкость.

При осаждении одного материала на подложку из другого материала возможны три механизма гетероэпитаксиального роста поверхностных структур в зависимости от параметров этих материалов [1].

Основные механизмы, реализующиеся в процессе гетероэпитаксиального роста, представлены на рис. 1. В случае, когда параметры кристаллических решеток подложки и осаждаемого материала совпадают и в растущей пленке не возникают механические напряжения, механизм эпитаксиального роста зависит от поверхностных энергий подложки, осаждаемого материала и энергии гетерограницы. Если поверхностная энергия подложки больше поверхностной энергии осаждаемого материала и энергии гетерограницы, то происходит послойный рост по механизму Франка – ван дер Мерве. При этом двумерный рост пленки приводит к уменьшению суммарной энергии системы за счет уменьшения поверхностной энергии. Если же выполняется обратное соотношение: поверхностная энергия подложки меньше поверхностной энергии осаждаемого материала и энергии гетерограницы, то происходит островковый трехмерный рост по механизму Вольмера – Вебера.

В гетеросистемах, растущих по механизму Странского – Крастанова, выполняется соотношение, при котором поверхностная энергия подложки больше поверхностной энергии осаждаемого материала и энергии гетерограницы, но постоянные кристаллических решеток осаждаемого материала и подложки различны. На начальном этапе роста по механизму Странского – Крастанова осаждаемый материал образует однородный «смачивающий» слой, что приводит к уменьшению суммарной энергии системы. Однако при дальнейшем увеличении количества осаждаемого материала происходит рост энергетического слагаемого, связанного с упругими напряжениями, которые вызваны рассогласованием кристаллических решеток пленки и подложки. С определенной толщины рост двумерной бездефектной пленки становится энергетически невыгоден, так как необходимо уменьшение этого слагаемого за счет релаксации упругих напряжений. Существуют два основных механизма релаксации упругих напряжений в пленке. Согласно первому

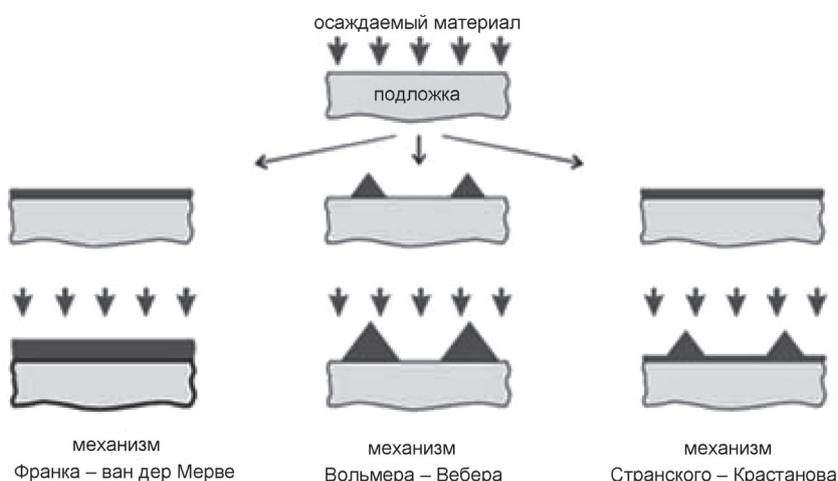


Рис. 1. Основные механизмы гетероэпитаксиального роста

Fig. 1. Basic mechanisms of heteroepitaxial growth

из них, классическому механизму роста Странского – Крастанова, рост бездефектной однородной пленки происходит до толщины, при которой накопленной упругой энергии достаточно для преодоления энергетического барьера формирования дислокации несоответствия. Второй механизм релаксации упругих напряжений (когерентный рост по механизму Странского – Крастанова) связан с тем, что при некоторой толщине пленки, меньшей, чем толщина, необходимая для образования дислокаций несоответствия, частичное снятие упругих напряжений может происходить за счет развития шероховатости поверхности растущей пленки. При этом механизме роста частичная релаксация упругих напряжений материала на вершинах шероховатостей приводит к уменьшению части энергии системы, связанной с упругими напряжениями [1–5].

Целью данной работы является изучение механизма формирования монослоя в многослойном ионно-лучевом наноструктурном покрытии (МНП) методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), а также разработка модели формирования и роста монослоя при ионно-лучевом распылении мишени с ионным ассистированием подложки.

Материал и методика исследования. Для исследования механизма формирования и роста монослоя в покрытии была разработана методика препарирования образцов для их последующего изучения с использованием электронного микроскопа Tescan MIRA (Чехия), позволяющего получить изображения поверхности исследуемого объекта с высоким разрешением, особенно при низких ускоряющих напряжениях. Для исследования тонких пленок метод просвечивающей электронной микроскопии используется гораздо чаще, чем сканирующей. Tescan разработал специальное устройство позволяющее получать изображения в проходящих электронах – Transmission Electron Detector (ТЕ-детектор). ТЕ-детектор используют для исследования методом сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (STEM – Scanning Transmission Electron Microscopy). Детектор размещается на стандартном столике образцов микроскопа и позволяет получать изображения такие же, как на просвечивающем электронном микроскопе, но со всеми преимуществами сканирующего электронного микроскопа. Исследования проводили в темном и светлом полях при ускоряющем напряжении 30 кВ.

На первоначальном этапе на предметные сетки (grid), представляющие собой медные заготовки диаметром 3 мм, наносили пленки из аморфного углерода, сформированные при помощи электрической дуги в вакууме 10^{-4} – 10^{-5} мм рт. ст. Пленки напыляли на поверхность монокристалла NaCl, растворимость в воде которого позволяет легко отделить пленку аморфного углерода от поверхности монокристалла путем медленного погружения в дистиллированную воду под определенным углом. Всплывшую углеродную пленку вылавливали и погружали на предметную сетку.

Предметные сетки с углеродной пленкой помещали в установку для нанесения покрытия и формировали необходимые для исследования монослои. Для изучения был выбран монослой хрома с добавкой ультрадисперсных алмазов (УДА), монослой хрома с добавкой MoS_2 и блок покрытия, состоящий из четырех пленочных монослойных покрытий толщиной примерно 10 нм. Все покрытия наносили на основу – угольную пленку, расположенную на предметной сетке из меди. Покрытия формировали на модернизированной вакуумной установке нанесения упрочняющих покрытий УВНИПА-1-001 (УРМЗ.239.070) производства ПО «Кварц» (г. Калининград, РФ) методом ионно-лучевого распыления, описанного в [6, 7].

Результаты и их обсуждение. Рассмотрен процесс формирования монослоя хрома в условиях ионно-лучевого осаждения на поверхности стали Р6М5. Рассогласование кристаллических решеток хрома и железа составляет менее 1 % ($a_{\text{Fe}} = 2,87 \cdot 10^{-10}$ м (или 0,287 нм), $a_{\text{Cr}} = 2,89 \cdot 10^{-10}$ м (или 0,289 нм)), поэтому можно предположить рост пленки по механизму послойного роста Франка – ван дер Мерве. Однако экспериментальные данные указывают на то, что происходит смешанный рост пленки по механизму Странского – Крастанова.

Изменение общей энергии системы, образуемой рассогласованными кристаллическими решетками, в зависимости от продолжительности нанесения материала схематически показано на рис. 2 [2]. Скорость нанесения материала мала для проявления динамических эффектов.

Материал мишени, подвергающийся сжатию на подложке, наносится с постоянной скоростью вплоть до момента времени, обозначенного X . Различимы три основных периода, обозначенные A , B и C . В начальный период A послойным ростом формируется двумерная эпитаксиальная

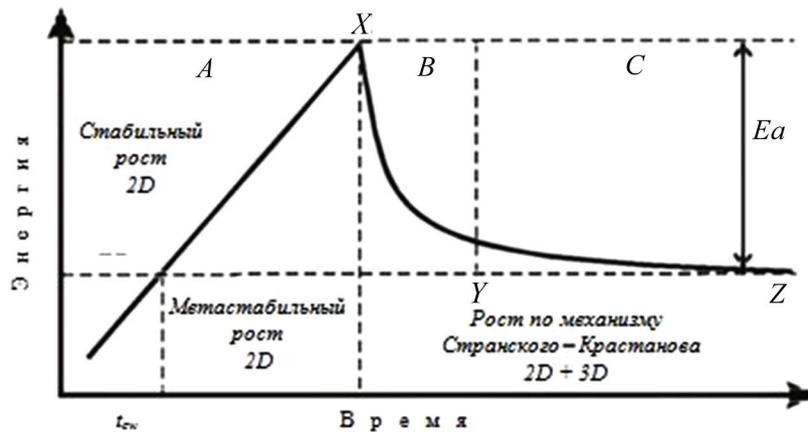


Рис. 2. Изменение полной энергии эпитаксиальной структуры, растущей в режиме Странского – Крастанова
 Fig. 2. Change in the total energy of the epitaxial structure, growing by the mechanism of Stransky – Krastanow

пленка [2, 3]. На данном этапе отсутствует необходимость возникновения зародышей и процесс состоит из следующих стадий:

- адсорбция частиц хрома на поверхности подложки в виде адатомов;
- поверхностная диффузия адатомов к ступени винтовой дислокации.

Тем самым реализуется спиральный механизм роста, который характерен для подложек с выходами дислокации на поверхность. Выход винтовой дислокации создает на поверхности подложки ступень с изломом, не исчезающую в процессе ее спиралевидного застраивания. Наличие неисчезающей ступени делает ненужным образование зародышей, так что рост осуществляется при любых, даже очень малых пересыщениях. Происходит 2D-рост монослоя хрома на поверхности стали Р6М5. Поверхность подложки идеально смочена наносимым материалом. Однако из-за наличия рассогласования кристаллических решеток растущая пленка хрома на поверхности стали Р6М5 имеет упругие напряжения сжатия (рис. 3).

Упругие напряжения линейно возрастают с увеличением объема наносимого материала. В момент времени $t_{кр}$ смачивающий слой достигает критической толщины, когда послойный рост становится метастабильным. При дальнейшем поступлении материала создаются условия, при которых сплошной эпитаксиальный слой готов к разрыву и переходу в режим роста трехмерных островков (3D-рост) по механизму Странского – Крастанова. Именно формирование трехмерных когерентных самоформирующихся островков приводит к частичной релаксации упругих напряжений сжатия в пленке хрома. Временной диапазон существования метастабильного состояния определяется высотой энергетического барьера для этого перехода Ea . Период B , представляющий 2D→3D-переход, то есть фрагментацию суперкритического смачивающего слоя, начинается, когда накопленной упругой энергии становится достаточно для преодоления энергетического барьера этого перехода в момент времени X . Предполагается, что, уже начавшись, 2D→3D-переход может продолжаться без дальнейшего поступления материала, используя материал, запасенный в суперкритическом смачивающем слое. Период B включает две стадии – зарождение островков и их последующий рост.

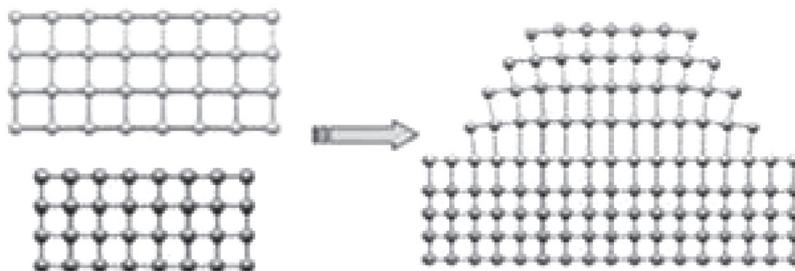


Рис. 3. Релаксация упругих напряжений при росте по механизму Странского – Крастанова
 Fig. 3. The relaxation of elastic stresses during the growth mechanism of Stransky – Krastanow

Флуктуации толщины пленки или напряжений по поверхности подложки приводят к зарождению островков в определенных местах. Толщина смачивающего слоя, при которой начинается спонтанное зарождение островков, зависит от рассогласования параметров решеток материалов, а также от наносимого материала и анизотропии свойств подложки. По данным [2, 5], эта величина составляет 0,5–1,0 нм. Стадия зарождения определяет поверхностную плотность островков. Образование первого сверхкритического зародыша немедленно приводит к фрагментации всего смачивающего слоя.

Предполагаемое распределение напряжений в окрестности когерентных островков показано на рис. 4.

Поверхность когерентного островка (КО) благоприятна для понижения напряжений, максимальная величина которых – у границы с подложкой. Благодаря релаксации напряжений в объеме КО на поверхности они минимальны.

Дальнейший рост когерентных островков в пределах периода C происходит по механизму дозревания.

На рис. 5, 6 представлены результаты исследования образца монослоя хрома с УДА и хрома с MoS_2 толщиной ~ 10 нм, полученные методом просвечивающей

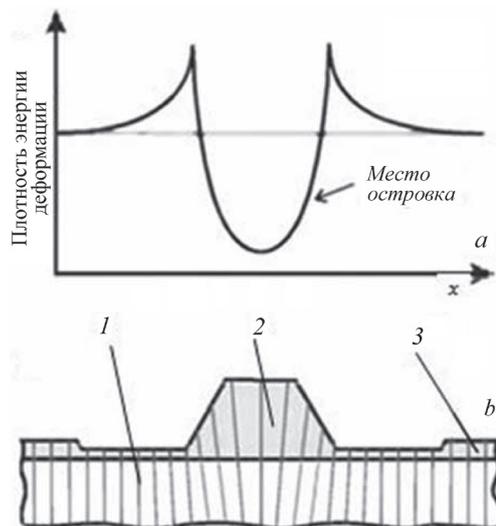


Рис. 4. Локальное напряжение на границе с подложкой (a) и деформация решетки в когерентном островке (КО) (b): 1 – сжатая область; 2 – релаксированная область; 3 – смачивающий слой
Fig. 4. Local voltage at the interface with the substrate (a) and the lattice deformation in a coherent island (CI) (b): 1 – compressed area; 2 – relaxed area; 3 – wetting layer

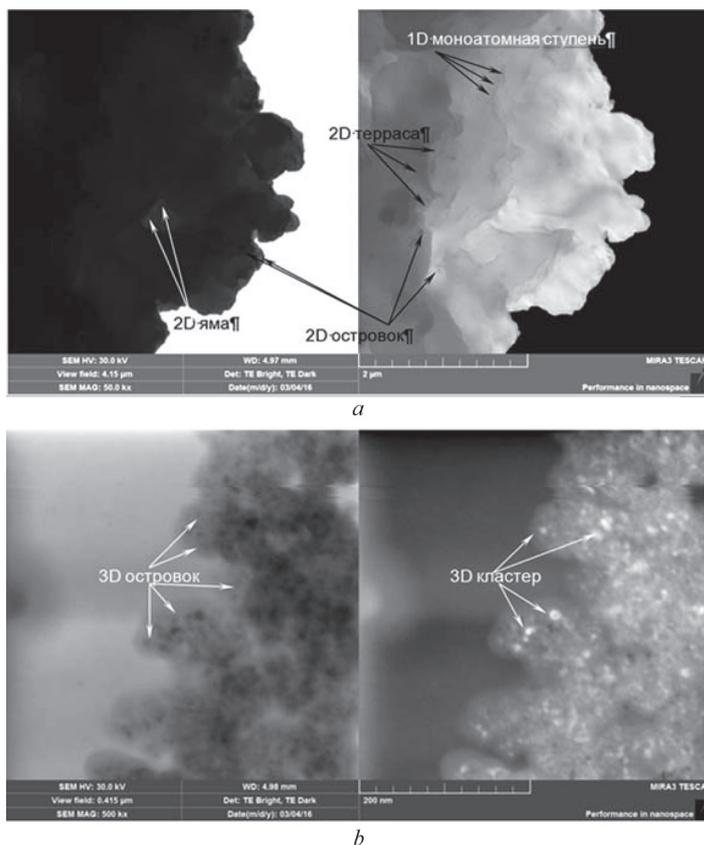


Рис. 5. Изображения, полученные методом просвечивающей микроскопии в светлом и темном полях образца монослоя хрома с УДА толщиной ~ 10 нм: a – $\times 50\,000$; b – $\times 500\,000$

Fig. 5. Images obtained by transmission electron microscopy in the bright and dark field sample monolayer chromium UDD thickness of ~ 10 nm: a – $\times 50\,000$; b – $\times 500\,000$

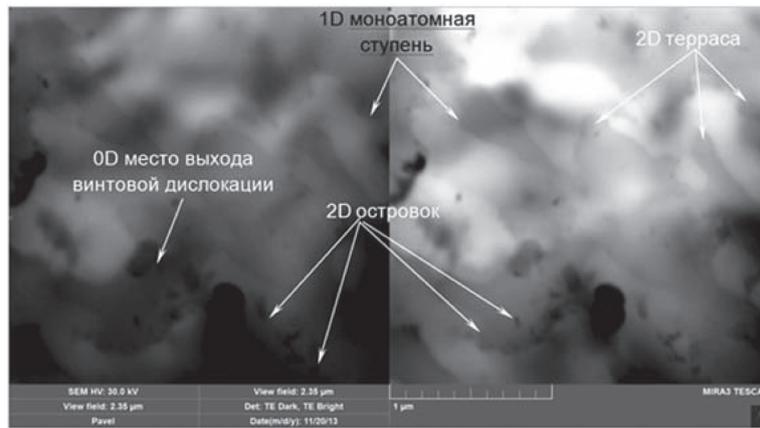


Рис. 6. Образец монослоя хрома с дисульфидом молибдена толщиной ~ 10 нм (изображение получено методом просвечивающей микроскопии в темном/светлом поле)

Fig. 6. Sample monolayer of chromium with molybdenum disulfide with thickness of ~ 10 nm (image is obtained by transmission electron microscopy in a dark / bright field)

микроскопии в светлом и темном полях. На фотографиях видны ступени послойного 2D-роста пленки (2D-террасы), образующиеся в месте выхода винтовой дислокации. Отмечено, что вблизи моноатомных ступеней сформировались зоны обеднения, где зарождения 2D-островков не произошло. Это связано с тем, что взаимодействие диффундирующих по поверхности атомов хрома со ступенями приводит к встраиванию атомов в них и подавлению зарождения 2D-островков в данных областях.

Дальнейшее поступление материала мишени обуславливает рост и коалесценцию 2D-островков и, соответственно, формирование нового слоя, ограниченного моноатомной ступенью. Формирование КО (рост пленки по механизму Странского – Крастанова) приводит к образованию наноструктуры, в которой КО, находящиеся в покровном 2D-слое хрома, прекращают свой рост при технологической смене режима распыления, образуя нанозерна в пределах одного монослоя.

При формировании монослоев из композиционных мишеней (хром с добавкой УДА, хром с дисульфидом молибдена), имеющих в своем составе соединения с ковалентной связью, помимо релаксации напряжений по вышеописанным механизмам, возникает возможность релаксации упругих напряжений сжатия за счет переноса из мишени в растущую пленку трехмерных когерентных кластерных соединений (УДА- и MoS_2 -кластеров).

Данные 3D-кластеры формируются на границе роста моноатомной ступени хрома. В случае дополнительного стимулирования растущего монослоя в покрытии ионами аргона при ионном ассистировании более полно реализуется склонность наноструктур к образованию КО за счет увеличения подвижности атомов.

На рис. 7 представлено полученное методом сканирующей микроскопии изображение образца блока покрытия, состоящего из четырех монослоев. На фотографии можно различить зеренное строение покрытия, причем размер зерен не превышает 10 нм.

Заключение. При изучении монослоев, сформированных методом ионно-лучевого распыления, с использованием ТЕ-детектора предложен механизм роста пленок, состоящий из следующих этапов:

адсорбция частиц хрома на поверхности подложки;

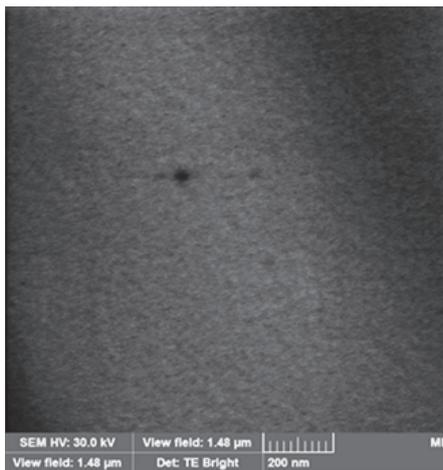


Рис. 7. Образец блока покрытия, состоящего из четырех монослоев (изображение получено методом просвечивающей микроскопии в светлом поле)

Fig. 7. A sample of the coating unit, consisting of four monolayers (the image is obtained by transmission electron microscopy in bright field)

поверхностная диффузия к ступени винтовой дислокации;
 2D-рост монослоя хрома (формирование 2D-террас) из 2D-островков;
 2D→3D-переход – переход в режим роста трехмерных островков (3D-рост) по механизму Странского – Крастанова.

Данный механизм подтвержден экспериментальными исследованиями. Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для оптимизации технологии формирования ионно-лучевых многослойных наноструктурных покрытий на основе хрома.

Список использованных источников

1. Лобанов, Д. Н. Рост Ge(Si) самоформирующихся наноструктур на подложках Si(001) методом молекулярно пучковой эпитаксии : электр. метод. пособие [Электронный ресурс] / Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, М. В. Шалеев. – Режим доступа: <http://www.pnn.unn.ru/User Files/manuals/GeSi.pdf> – Н. Новгород: ННГУ, 2010.
2. Борисенко, В. Е. Нанoeлектроника : в 3 ч. / В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева. – Минск: БГУИР, 2003. – Ч. 2: Нанотехнология. – 76 с.: ил.
3. In situ growth of nano-structures by metal-organic vapour phase epitaxy / W. Seifer [et al.] // J. Crystal Growth. – 1997. – Vol. 170, N 1–4. – P. 39–46.
4. Пичугин, В. Ф. Материаловедение поверхности и тонких пленок / В. Ф. Пичугин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 173 с.
5. Baskaran, A. Mechanisms of Stranski–Krastanov growth / A. Baskaran, P. Smereka // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 111, N 4. – P. 044321-1 – 044321-6.
6. On the properties of PVD coating based on nanodiamond and molybdenum disulfide nanolayers and its efficiency when drilling of aluminum alloy / A. Ilyuschenko [et al.] // Surface & Coatings Technology. – 2015. – Vol. 270. – P. 190–196.
7. Многослойные наноструктурные покрытия, сформированные методом ионно-лучевого распыления в вакууме / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2013. – № 2. – С. 10–21.

References

1. Lobanov D. N., Novikov A. V., Shaleev M. V. *The growth of Ge(Si) self-assembled nanoislands on Si(001) substrates by molecular beam epitaxy*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University named after N. I. Lobachevsky, 2010. – Available at: <http://www.pnn.unn.ru/UserFiles/manuals/GeSi.pdf> (in Russian).
2. Borisenko V. E., Vorob'eva A. I. *Nanoelectronics. Part 2: Nanotechnology*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2003. 76 p. (in Russian).
3. Seifer W., Carlsson N., Johansson J., Pistol M.-E., Samuelson L. In situ growth of nano-structures by metal-organic vapour phase epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 1997, vol. 170, no. 1–4, pp. 39–46. Doi: 10.1016/s0022-0248(96)00518-0
4. Pichugin V. F. *Material science of surfaces and thin films*. Tomsk, Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2008. 173 p. (in Russian).
5. Baskaran A., Smereka P. Mechanisms of Stranski–Krastanov growth. *Journal of Applied Physics*. 2012, vol. 111, no. 4, pp. 044321-1 – 044321-6. Doi: 10.1063/1.3679068
6. Ilyuschenko A., Feldshtein E., Lisovskaya Y., Markova L., Andreyev M., Lewandowski A. On the properties of PVD coating based on nanodiamond and molybdenum disulfide nanolayers and its efficiency when drilling of aluminum alloy. *Surface & Coatings Technology*, 2015, vol. 270, pp. 190–196. Doi: 10.1016/j.surfcoat.2015.03.004
7. Ilyuschenko A. F., Andreyev M. A., Markova L. V., Lisovskaya Y. O. Multilayered nanostructured coverings generated by a method of ion beam sputtering in vacuum. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2013, no 2, pp. 10–21 (in Russian).

Информация об авторах

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор, Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Alexil@mail.belpak.by

Андреев Михаил Анатольевич – кандидат физико-математических наук, директор, Обособленное хозяйственное структурное подразделение «Институт сварки и защитных покрытий» (ул. Платонова, 12Б, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: andreyev.mikhail@gmail.com

Information about the authors

Ilyuschenko Alexandre Phedorovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director, Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Alexil@mail.belpak.by

Andreyev Mikhail Anatol'evich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Director, Separate Self-Supporting Structural Subdivision “Institute of Welding and Protective Coatings” (12B, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andreyev.mikhail@gmail.com

Маркова Людмила Владимировна – кандидат технических наук, заведующая отделением № 4 (начальник Испытательного центра), Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: iscentr@tut.by

Лисовская Юлия Олеговна – заведующая группой химико-спектрального анализа, Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lisovskayauliya@hotmail.com

Для цитирования

Применение метода просвечивающей электронной микроскопии для оценки формирования ионно-лучевых многослойных наноструктурных покрытий на основе хрома / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 2. – С. 7–14.

Markova Ludmila Vladimirovna – Ph. D. (Engineering), Head of Division “Material Research & Testing” (Chief of Accredited Test Center), Institute of Powder Metallurgy of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: iscentr@tut.by

Lisovskaya Yuliya Olegovna – Head of the Group of Chemical and Spectral Analysis, Institute of Powder Metallurgy of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lisovskayauliya@hotmail.com

For citation

Ilyushchenko A. Ph., Andreev M. A., Markova L. V., Lisovskaya Y.O. Application of tem for evaluation of formation of ion beam multilayer nanostructured coatings based on chromium. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnych navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 2, pp. 7–14 (in Russian).