Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 11

ТВЕРЬ 2019

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2019. – Вып. 11. – 680 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2019

© Тверской государственнй университет, 2019

УДК 544.722.3:532.64

Оригинальная статья

ПРИМЕНЕНИЕ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АНИЗОТРОПИИ МЕЖФАЗНОЙ ЭНЕРГИИ НА ГРАНИЦЕ МЕТАЛЛ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ПОДЛОЖКА

Л.П. Арефьева¹, И.Г. Шебзухова², Т.А. Сахно¹, Л.С. Шахова¹

¹ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

344000, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

²ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Ludmilochka529@mail.ru, Irina.Shebzukhova@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.016

Аннотация: Разработанный нами метод определения анизотропии межфазной энергии в твердой системе применен для исследования нанокристаллов никеля на ориентированной подложке кремния. Частицы никеля были получены по механизму пар-жидкость-твердое тело методом осаждения в вакууме на подложку. Поверхность образца визуализировалась атомно-силовой микроскопией в полуконтактном режиме. Проведенный анализ АСМ-изображений позволил установить геометрические характеристики кристаллов никеля, исследовать рельеф. По полученным данным определена модельная форма и положение точки Вульфа равновесных кристаллов на подложке. Построены зависимости характеристической величины $A/V^{2/3}$ от эффективного контактного угла в двух направлениях и показано, что в данной системе межфазная энергия границы кристалл-подложка сильно анизотропна.

Ключевые слова: межфазная энергия, смачивание, нанокристаллы, атомно-силовая микроскопия, никель.

1. Введение

В последнее десятилетие в связи с дальнейшим развитием нанoeлектроники и смежных отраслей возрос интерес к явлению смачивания в твердой системе и возможности его экспериментального изучения. Однако, работы по изучению межфазных свойств в системе частица-подложка немногочисленны [1-9]. При создании и эксплуатации композиционных материалов или покрытий, важным параметром, характеризующим качество, надежность и долговечность является термодинамическая работа адгезии твердых поверхностей, которую описывает уравнение Дюпре-Юнга.

Одним из экспериментальных методов изучения межфазной энергии кристаллов является метод равновесной формы частиц, который базируется на известной теореме Гиббса-Кюри-Вульфа. Одни из первых работ в данном направлении принадлежат Сандкуисту, который изучал равновесную форму металлических частиц методом реплик просвечивающей электронной микроскопией [1, 2]. В работе [3] был предложен метод построения равновесной формы кристалла на твердой плоской подложке, который учитывал не только поверхностную энергию

кристалла, но и межфазную энергию поверхности кристалл-подложка, и поверхностную энергию подложки. Позднее для изучения формы и свободной поверхностной энергии металлических частиц начали использовать сканирующую электронную и зондовую микроскопии [4-11]. В ряде работ [8-11] для исследования влияния размера частиц на смачивание металлами аморфной подложки использовали уравнение Юнга и показали, что при кристаллизации капле происходит малое изменение угла смачивания ($< 2^\circ$).

Также получили развитие методы, позволяющие проводить моделирование процессов смачивания в твердой системе методом молекулярной динамики [12, 13], и непосредственное моделирование равновесной формы кристалла на подложке [14]. Например, в работах [12, 13] были установлены зависимости процесса растекания твердых наночастиц металлов по металлической подложке (свинец/медь, медь/медь) и обоснованы механизмы смачивания в твердом состоянии и процессы деградации нанорельфа.

2. Постановка задачи и методика эксперимента

Уравнение Юнга, справедливое для жидкой капли на твердой поверхности, не может быть использовано для описания системы наночастица – подложка, так как не учитывает анизотропию кристалла и подложки. Для анализа поведения твердой системы необходимо в первую очередь исследовать равновесную форму кристалла. На рис. 1 показан самый простой вариант равновесной формы кристалла – центрально симметричный, с параллельной подложке фасеткой. Мы принимаем, что в системе не происходит взаимного растворения фаз или оно незначительно, и реальная форма кристалла не отличается от модельной формы Вульфа. Тогда отношение расстояний от точки Вульфа O до межфазной границы R_1 и от точки Вульфа до верхней грани R_2 позволяет определить характер смачивания частицей подложки как отношение межфазных энергий подложки на границе с газообразной средой $f_{\omega 13}$, частицы на границе с газообразной средой $f_{\omega 23}$ и границы контакта твердых фаз $f_{\omega 12}$ [14]:

$$\frac{R_1}{R_2} = - \left(\frac{f_{\omega 12} - f_{\omega 13}}{f_{\omega 23}} \right). \quad (1)$$

В отличие от свободных частиц, у частиц на подложке положение точки Вульфа зависит от контактного угла: при $\theta_{ef} > 90^\circ$ точка O находится внутри кристалла (см. рис. 1 а), при $\theta_{ef} < 90^\circ$ точка O лежит вне кристалла, ниже поверхности раздела твердых фаз (см. рис. 1 б). В последнем случае над подложкой расположено меньше половины полной равновесной формы Вульфа.

Рис. 1. Схема равновесных частиц на плоской подложке и положение точки Вульфа:
а – $\theta_{ef} > 90^\circ$, б – $\theta_{ef} < 90^\circ$.

Выражение (1) является аналогом уравнения Юнга для случая контакта твердых тел при $\theta_{ef} = \arccos(R_1/R_2) < 90^\circ$.

Разработанный нами метод оценки анизотропии межфазной энергии и смачивания в системе «кристалл-подложка» с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) [7, 15, 16] мы применили для исследования частиц никеля на подложке Si(111), полученных осаждением в вакууме по механизму пар-жидкость-твердое тело. Методика получения образцов и АСМ-изображений их поверхности описана в работе [7]. Далее в соответствии с разработанным нами методом [15, 16] проводился анализ профилей образцов в направлениях X и Y осей АСМ-изображения (функция Section Analysis программного пакета Nova_Px_2.0). В результате выбирались относительный уровень отсчета геометрических характеристик и модель частиц на подложке. Методом Grain Analysis для отдельных частиц, их скоплений или агломераций получали набор геометрических характеристик и гистограмм их распределения. Области артефактов сканирования и частицы, не полностью относящиеся к области сканирования, исключались из дальнейшего анализа данных.

Если равновесная форма частицы стремится к шаровому или сфероидальному сегменту, то R_1 и R_2 в выбранном направлении рассчитываются по следующим формулам [15, 16]:

$$R_{2x} = \frac{1}{2h} \left(\frac{a_x^2}{4} + h^2 \right) \text{ и } R_{2y} = \frac{1}{2h} \left(\frac{a_y^2}{4} + h^2 \right), \quad (2)$$

где h – высота частицы (параметр LocalMaxZ), a_x и a_y – длина частицы в направлениях X и Y (параметр XSize, YSize).

Расстояние от точки Вульфа до межфазной границы

$$R_{1x} = R_{2x} - h \text{ и } R_{1y} = R_{2y} - h. \quad (3)$$

При равновесной форме частицы, стремящейся к эллипсоидальному сегменту, R_1 рассчитывается по (3), а R_2 в заданном направлении по формулам

$$R_{2x} = \sqrt{\frac{x_1^2 z_2^2 - x_2^2 z_1^2}{x_1^2 - x_2^2}} \text{ и } R_{2y} = \sqrt{\frac{y_1^2 z_2^2 - y_2^2 z_1^2}{y_1^2 - y_2^2}}. \quad (4)$$

Здесь (x_i, y_i, z_i) координаты двух точек на поверхности частицы, принадлежащих выбранному направлению и выбираемые при помощи функции Point Tool (Nova_Px).

3. Результаты измерений и их анализ

На рис. 2 показано АСМ-изображение поверхности образца кристаллов никеля на подложке Si(111) (30×30 мкм). Видно, что частицы не имеют четко выраженной ориентации. Также имеются несколько частиц, не полностью относящихся к области сканирования.

Рис. 2. Трехмерное изображение рельефа поверхности островковой пленки никеля, осажденного на подложку Si(111).

Анализ 3d-изображения образца и 256 профилей в каждом направлении, показал, что на поверхности имеются отдельные частицы, имеющие одну вершину и неупорядоченные каким-либо образом, и протяженные области, не имеющие частиц. Плотность распределения частиц на подложке в направлениях X и Y низкая. Горизонтальное сечение частиц проводили на локальном нулевом уровне, соответствующем плоскости контакта частица-подложка. Гистограммы распределения 493 наночастиц никеля по геометрическим характеристикам показаны на рис. 3. Анализ геометрических характеристик позволяет сделать вывод, что частицы никеля имеют высоту (LocalMaxZ) менее 100 нм и их форма стремится к сфероидальному сегменту.

Рис. 3. Распределения нанокристаллов никеля по геометрическим характеристикам: а – размер сечения частиц по оси X на нулевом относительном уровне; б – размер сечения частиц по оси Y на нулевом относительном уровне; в – высота частицы, отсчитанная от локального нулевого уровня; г – площадь сечения частицы A на высоте, соответствующей нулевому значению относительного уровня; д – эффективный объем частицы V .

В соответствие с выбранной моделью частицы по выражениям (1)-(3) мы определили эффективные контактные углы нанокристаллов никеля в направлениях X и Y относительно координатной системы АСМ-изображения образцов. Расчеты показали, что точка Вульфа равновесных кристаллов никеля на подложке расположена ниже границы частица-подложка.

Гистограммы распределения нанокристаллов никеля по величине эффективных контактных углов θ_{ef}^x или θ_{ef}^y с шагом 1° приведены на рис. 4. В направлении X максимум распределения соответствует значению $\theta_{ef}^x 5^\circ$ и содержит 36 частиц, при этом среднее значение отношений межфазных энергий составляет 0,91969, что соответствует $\overline{\theta_{ef}^x} = 6 \div 7^\circ$. В интервале углов θ_{ef}^x от 24° до 88° лежит 95,9% частиц. Максимум распределения θ_{ef}^y приходится $23,12^\circ$ и содержит 28 частиц. В интервале от 2° до 34° содержится 83% частиц при среднем значении отношения межфазных энергий 0,89684 ($\overline{\theta_{ef}^y} = 26,25^\circ$).

Для большинства наночастиц никеля значения эффективного контактного угла в направлении оси Y меньше, чем в направлении оси X .

Рис. 4. Распределение частиц никеля по величине эффективного контактного угла: а – в направлении оси X , б – в направлении оси Y .

Зависимость отношения площади контакта A к $V^{2/3}$ от эффективного контактного угла описывает процесс смачивания в системе и показывает анизотропию относительной межфазной энергии (см. рис. 5). На графиках приведены также доверительные интервалы значений. Погрешность оценки θ_{ef}^x и θ_{ef}^y мала, порядка десятых долей процента, для большинства точек.

Как видно из графиков (см. рис. 5), при увеличении относительной межфазной энергии отношение площади контакта к $V^{2/3}$ нелинейно увеличивается. В системе «частицы никеля – Si(111)» наблюдается эффект неполного смачивания. Величина $A/V^{2/3}$ для одинаковых отношений межфазной энергии в направлении X выше, чем в направлении Y .

Зависимость, приведенная на рис. 5, хорошо согласуется с зависимостью величины $A/V^{2/3}$ кристаллов от эффективного контактного угла, полученной методами моделирования [14].

Рис. 5. Зависимость величины $A/V^{2/3}$ от характеристических расстояний (относительной межфазной энергии) нанокристаллов никеля на подложке Si(111): а – направление оси X , б – направление оси Y .

4. Заключение

В работе изучены анизотропия относительной межфазной энергии и эффективного контактного угла для системы «наночастицы никеля-Si(111)», полученной осаждением в вакууме. Предложенная нами методика базируется на применении высокотехнологичного метода исследования поверхности – атомно-силовой микроскопии. Используя экспериментальные данные о геометрических параметрах частиц, полученные АСМ, выбирается модель частиц и рассчитывается относительная межфазная энергия в выбранных направлениях. Исследование наночастиц никеля на подложке кремния показало, что в данной системе вследствие заданной ориентации подложки и анизотропии самих кристаллов наблюдается анизотропия относительной межфазной энергии и эффективных углов смачивания. Также установлено, что нанокристаллы никеля смачивают подложку кремния частично.

Библиографический список:

1. **Sundquist, B.E.** A direct determination of the anisotropy of the surface free energy of solid gold, silver, copper, nickel, and alpha and gamma iron / B.E. Sundquist // *Acta metallurgica*. – 1964. – V. 12. – I. 1. – P. 67-86.
2. **Sundquist, B.E.** The effect of metallic impurities and temperature on the anisotropy of the surface free energy of solid metals / B.E. Sundquist // *Acta metallurgica*. – 1964. – V. 12. – I. 5. – P. 585-592.
3. **Winterbottom, W.L.** Equilibrium shape of a small particle in contact with a foreign substrate / W. L. Winterbottom // *Acta Metallurgica*. – 1967. – V. 15. – I. 2. – P. 303-310.
4. **Heyraud, J.C.** Equilibrium shape and temperature; Lead on graphite / J.C. Heyraud, J.J. Métois // *Surface Science*. – 1983. – V. 128. – I. 2-3. – P. 334-337.
5. **Surnev, S.** Scanning tunneling microscopy of equilibrium crystal / S. Surnev, K. Arenhold, P. Coenen, et al. // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 1998. – V. 16. – I. 3. – P. 1059-1065.
6. **Emudts, A.** Continuous and discontinuous transitions on 3D equilibrium crystal shapes: a new look at *Pb* and *Au* / A. Emudts, H.P. Bonzel, P. Wynblatt, et al. // *Surface Science*. – 2001. – V. 481. – I. 1-3. – P. 13-24.
7. **Арефьева, Л.П.** Анизотропия поверхностной энергии кристаллов никеля / Л.П. Арефьева, И.Г. Шебзухова // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. – 2008. – Т. 8. – № 2. – С. 106-109.
8. **Чижи́к, С.П.** Размерный эффект при смачивании островковыми пленками висмута и свинца углеродных подложек / С.П. Чижи́к, Н.Т. Гладких, Л.К. Григорьева и др. // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1981. – № 4. – С. 73-79.
9. **Чижи́к, С.П.** Размерные эффекты при смачивании в ультрадисперсных системах / С.П. Чижи́к, Н.Т. Гладких, В.И. Ларин и др. // *Поверхность. Физика, химия, механика*. – 1985. – № 12. – С. 111-121.
10. **Durakov, S.** Surface energy and wetting in island film / S. Durakov, A. Kryshstal, V. Sukhov. In: *Wetting and Wettability*; ed.by M. Aliofkhazraei. – IntechOpen, 2015. – Ch. 7. – P. 169-206.
11. **Гладких, Н.Т.** Поверхностные явления и фазовые превращения в конденсированных средах / Н.Т. Гладких, С.В. Дукаров, А.П. Крышталь и др.; под ред. проф. Н.Т. Гладких. – Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2004. – 276 с.
12. **Чирков, А.В.** Молекулярно-динамическое исследование смачивания поверхности меди твердыми частицами свинца / А.В. Чирков, В.М. Самсонов // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2017. – Вып. 9. – С. 510-517.
13. **Бембель, А.Г.** Смачивание в твердом состоянии и динамика нанорельефа твердой поверхности / А.Г. Бембель, И.В. Талызин, В.М. Самсонов // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2018. – Вып. 10. – С. 83-92.
14. **Kaplan, W.D.** A review of wetting versus adsorption, complexions, and related phenomena: the rosetta stone of wetting / W.D. Kaplan, D. Chatain, P. Wynblatt, W.C. Carter // *Journal of Materials Science*. – 2013. – V.48. – I. 17. – P. 5681-5717.
15. **Арефьева, Л.П.** Смачивание и анизотропия межфазной энергии на границе контакта нанокристаллов индия с ориентированной подложкой / Л.П. Арефьева, И.Г. Шебзухова // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2018. – Вып. 10. – С. 27-34.

16. **Aref'eva, L.P.** Features wetting and anisotropy of interfacial energy in a metal particle-silicon system / L.P. Aref'eva, A.V. Blinov, A.A. Kravtsov, I.G. Shebzukhova, A.V. Serov // MATEC Web of Conferences. – 2018. – V. 226. – Art. № 03009. – 7 p.

References:

1. **Sundquist, B.E.** A direct determination of the anisotropy of the surface free energy of solid gold, silver, copper, nickel, and alpha and gamma iron / B.E. Sundquist // *Acta metallurgica*. – 1964. – V. 12. – I. 1. – P. 67-86.
2. **Sundquist, B.E.** The effect of metallic impurities and temperature on the anisotropy of the surface free energy of solid metals / B.E. Sundquist // *Acta metallurgica*. – 1964. – V. 12. – I. 5. – P. 585-592.
3. **Winterbottom, W.L.** Equilibrium shape of a small particle in contact with a foreign substrate / W. L Winterbottom // *Acta Metallurgica*. – 1967. – V. 15. – I. 2. – P. 303-310.
4. **Heyraud, J.C.** Equilibrium shape and temperature; Lead on graphite / J.C. Heyraud, J.J. Métois // *Surface Science*. – 1983. – V. 128. – I. 2-3. – P. 334-337.
5. **Surnev, S.** Scanning tunneling microscopy of equilibrium crystal / S. Surnev, K. Arenhold, P. Coenen, et al. // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 1998. – V. 16. – I. 3. – P. 1059-1065.
6. **Emudts, A.** Continuous and discontinuous transitions on 3D equilibrium crystal shapes: a new look at *Pb* and *Au* / A. Emudts, H.P. Bonzel, P. Wynblatt, et al. // *Surface Science*. – 2001. – V. 481. – I. 1-3. – P. 13-24.
7. **Aref'eva, L.P.** Anisotropy of the surface energy of nickel crystals / L.P. Aref'eva, I.G. Shebzukhova // *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya*. – 2008. – V. 8. – № 2. – P. 106-109. (In Russian).
8. **Chizhik, S.P.** Dimensional effect of amorphous carbon substrates with small islands of bismuth and lead films / S.P. Chizhik, N.T. Gladkikh, L.K. Grigor'eva et al. // *Izvestiya AN SSSR. Metally*. – 1981. – № 4. – P. 73-79. (In Russian).
9. **Chizhik, S.P.** Dimensional effects during wetting in ultrafine systems / S.P. Chizhik, N.T. Gladkikh, V.I. Larin et al. // *Poverkhnost'. Fizika, khimiya, mekhanika*. – 1985. – № 12. – P. 111-121. (In Russian).
10. **Durakov, S.** Surface energy and wetting in island film / S. Durakov, A. Kryshthal, V. Sukhov. In: *Wetting and Wettability*; ed.by M. Aliofkhazraei. – IntechOpen, 2015. – Ch. 7. – P. 169-206.
11. **Gladkikh, N.T.** Surface phenomena and phase transformations in condensed matter / N.T. Gladkikh, S.V. Dukarov, A.P. Kryshthal' et al.; pod red. prof. N.T. Gladkikh. – Khar'kov: KhNU im. V.N. Karazina, 2004. – 276 p. (In Russian).
12. **Chirkov, A.V.** Wetting of copper surface by solid nanosized lead particles: molecular dynamics study / A.V. Chirkov, V.M. Samsonov // *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. – 2017. – I. 9. – P. 510-517. (In Russian).
13. **Bembel', A.G.** Solid state wetting and dynamics of solid surface nanorelief / A.G. Bembel', I.V. Talyzin, V.M. Samsonov // *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. – 2018. – I. 10. – P. 83-92. (In Russian).
14. **Kaplan, W.D.** A review of wetting versus adsorption, complexions, and related phenomena: the rosetta stone of wetting / W.D. Kaplan, D. Chatain, P. Wynblatt, W.C. Carter // *Journal of Materials Science*. – 2013. – V.48. – I. 17. – P. 5681-5717.
15. **Aref'eva, L.P.** Wetting and anisotropy of interfacial energy on the contact boundary of indium nanocrystals and orientied substrate / L.P. Aref'eva, I.G. Shebzukhova // *Physical and*

chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2018. – I. 10. – P. 27-34. (In Russian).

16. Arefeva, L.P. Features wetting and anisotropy of interfacial energy in a metal particle-silicon system / L.P. Arefeva, A.V. Blinov, A.A. Kravtsov, I.G. Shebzukhova, A.V. Serov // MATEC Web of Conferences. – 2018. – V. 226. – Art. № 03009. – 7 p.

Original paper

**APPLICATION OF ATOMIC-FORCE MICROSCOPY FOR INVESTIGATION OF
ANISOTROPY OF INTERPHACIAL ENERGY ON THE BOUNDARY OF THE METAL-
ORIENTED SUBSTRATE**

L.P. Arefeva¹, I.G. Shebzukhova², T.A. Sakhno¹, L.S. Shakova¹

¹*Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia*

²*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.016

Abstract: A method we developed for determining anisotropy of the interfacial energy in a solid system was used to investigate nickel nanocrystals on an oriented silicon substrate. Nickel particles were obtained by the vapor-liquid-solid mechanism, i.e. by vacuum deposition on a substrate. The surface of the sample was visualized by the atomic force microscopy in the tapping mode. A analysis of AFM images made it possible to establish the geometric characteristics of nickel crystals and to investigate the relief. Based on the data obtained, the model shape and position of the Wulff point of the equilibrium crystals on the substrate are determined. The dependences of the characteristic value $A/V^{2/3}$ on the effective contact angle in two directions are constructed and it is shown that in this system the interfacial energy of the crystal-substrate interface is highly anisotropic.

Keywords: interface energy, wetting, nanocrystals, nickel, atomic-force microscopic.

Арефьева Людмила Павловна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФБГОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Шебзухова Ирина Гусейновна – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики ФБГОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Сахно Татьяна Андреевна – магистрант кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФБГОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Шахова Лилия Сергеевна – магистрант кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФБГОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Ludmila P. Arefeva – Ph. D., Docent, Department of Physical and Applied Material Science, Don State Technical University

Irina G. Shebzukhova – Dr. Sc., Professor, Department of Theoretical and Experimental Physics, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Tatiana A. Sakhno – undergraduate student, Department of Physical and Applied Material Science, Don State Technical University

Liliya S. Shakhova – undergraduate student, Department of Physical and Applied Material Science, Don State Technical University

Поступила в редакцию/received: 10.09.2019; после рецензирования/revise: 19.10.2019; принята/accepted 04.11.2019.