

ВАКАНСИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ РАЗВИТИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КРИСТАЛЛОВ И ТОНКИХ ПЛЁНОК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ЧАСТИЦ

VACANCY MECHANISMS OF MORPHOLOGICAL INSTABILITY OF CRYSTALLINE THIN FILMS UNDER THE INFLUENCE OF PARTICLE FLOW

А.В.Редьков, С.А.Кукушкин / avredkov@gmail.com

A.V.Redkov, S.A.Kukushkin

Институт Проблем Машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург

В работе рассмотрено возникновение морфологической неустойчивости кристаллической поверхности и тонких пленок под воздействием потока частиц. Возникновение вызвано наличием вакансий в объеме кристалла, которые могут диффундировать к поверхности. Показано, что описанный эффект может вызывать появление шероховатости и волнистости на поверхности кристалла с характерными масштабами, определяемыми свойствами потока частиц. Получено аналитическое выражение для критерия возникновения неустойчивости и описаны различные последствия развития неустойчивости. Результаты могут быть использованы для оценки условий роста тонких плёнок, при которых поверхность устойчива к возникновению шероховатости по вакансионному механизму.

The paper considers the appearance of morphological instability of the crystalline surface and thin films under the influence of a particle flow. The appearance is caused by the presence of vacancies in the bulk of the crystal, which can diffuse to the surface. It is shown that the described effect can cause the appearance of roughness and waviness on the crystal surface with characteristic scales determined by the particle flow. An analytical expression is obtained for the criterion for the occurrence of instability. The results can be used to assess the growth conditions of thin films under which the surface is resistant to roughness by the vacancy mechanism.

Ключевые слова: вакансия, кристалл, разрушение, морфологическая неустойчивость.

Keywords: vacancy, crystal, destruction, morphological instability.

Ввиду широкого применения различных кристаллических покрытий и тонких пленок в промышленности и технологии, представляется важным изучение процессов, которые приводят к изменению их морфологии и разрушению. Подобные процессы могут проходить вследствие различных внешних факторов: нагрева, лазерного излучения, механической нагрузки. Помимо перечисленных факторов, в вакуумно-физических установках большую роль также могут играть пучки ионов, молекул, или иных частиц, падающих на поверхность. Их исследованию также посвящено большое количество работ [1,2] Отметим, что при изучении воздействия пучка частиц на поверхность обычно рассматривают частицы высоких энергий, в диапазоне 0.1 - 100 кЭв [3], которые значительно превышают энергии связей в кристалле (единицы эВ). Выбор этого диапазона обусловлен тем, что при столкновении таких частиц с поверхностью эффективно происходит нагрев, «выбивание» атомов из поверхности [3], образование в объеме различных дефектов и др. Однако, в [4] было показано, что и низкоэнергетичные частицы могут оказывать существенное влияние на морфологию поверхности. Так в [4] было продемонстрировано, что под действием потока частиц с низкой энергией, сопоставимой с энергией активации миграции вакансий (доли-единицы эВ), может происходить дрейф

вакансий к поверхности к месту падения пучка за счет последовательных перескоков, вызванных вакансионно-фононным взаимодействием (рис. 1). Такой механизм может привести к постепенному изменению рельефа поверхности даже при эффективном охлаждении образца и малых интенсивностях пучка.

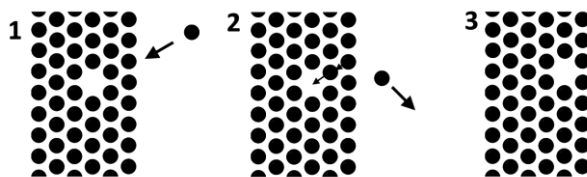


Рис. 1. Вакансионный механизм дрейфа вакансий к поверхности кристалла под воздействием падающих частиц, предложенный в [4].

В настоящем докладе приведены расширенные результаты по анализу этого процесса и показано, что предложенный в [4] вакансионный механизм может в некоторых случаях привести к росту сколь угодно малых возмущений на поверхности тонкой пленки или кристалла, и таким образом, привести к развитию шероховатости, а в других случаях, наоборот, приводит к сглаживанию поверхности. Рассмотрено изменение морфологии поверхности кристаллических тел как под локальным воздействием пучка низкоэнергетических частиц, так и при равномерном облучении всей поверхности кристалла. Показано, что такое изменение может происходить вследствие рассеяния генерируемых у поверхности колебаний решетки на вакансиях, которое вызывает дрейф вакансий к месту падения пучка. Продемонстрированы два режима: баллистический и диффузионный, показаны их отличия и найдена зависимость скорости изменения профиля поверхности от времени. Показано, что длина свободного пробега фононов l_i и некоторые другие характеристики процесса, например, величины Q (интенсивностью зарождения фононов под воздействием пучка) и p (вероятность перескока вакансии при взаимодействии с фононом), могут быть найдены из анализа этой зависимости. Обнаруженный механизм изменения морфологии наиболее эффективен, если к кристаллу приложены растягивающие напряжения, увеличивающие концентрацию вакансий. Рассмотрен процесс развития шероховатости на поверхности упруго-напряженного кристалла и показано, что сколь угодно малое возмущение формы поверхности может при определенных условиях неограниченно разрастаться вследствие неоднородного потока вакансий к поверхности. Неустойчивость возникает на пространственных частотах, меньших критической ω_{cr} , которая определяется интенсивностью зарождения фононов Q у поверхности под воздействием падающего пучка частиц, концентрацией вакансий n_0 , величиной и знаком механических напряжений σ_0 , а также другими параметрами системы согласно выражению:

$$\omega_{cr} = \sqrt[3]{\frac{2\sigma_0\Omega Qpn_0}{DC_0\theta}}$$

где Ω – объем, занимаемый вакансией, p – вероятность перескока вакансии при взаимодействии с фононом, D -коэффициент диффузии кристалла по объему, θ – поверхностная энергия кристалла, C_0 – поверхностная концентрация адатомов.

В случае, если механические напряжения имеют отрицательный знак (являются сжимающими), то дрейф вакансий приводит к уменьшению шероховатости. Это явление может быть использовано при выборе рабочих режимов обработки и роста кристаллов и тонких плёнок с целью получения гладких поверхностей и подавления развития морфологической неустойчивости по другим механизмам даже в области низкочастотных возмущений.

А.В. Редьков благодарит за поддержку Совет по грантам Президента РФ (проект МК-1574.2019.2).

ЛИТЕРАТУРА

1. A.A. Manenkov, A.M. Prokhorov, Laser-induced damage in solids, *Physics-Uspekhi* 29 (1986) 104.
2. W.L. Chan, E. Chason, Making waves: kinetic processes controlling surface evolution during low energy ion sputtering, *Journal of Applied Physics* 101 (2007) 121301.
3. K. Nordlund, J. Keinonen, M. Ghaly, R.S. Averbach, Recoils, flows and explosions: surface damage mechanisms in metals and semiconductors during 50 eV–50 keV ion bombardment, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 148 (1999) 74.
4. A.V. Redkov, A.V. Osipov, S.A. Kukushkin, Evolution of crystal morphology under flow of low-energy particles: vacancy mechanism, *Materials Physics and Mechanics* 29 (2016) 82-92

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ГИБРИДНЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ СТРУКТУРАХ

PHYSICAL AND CHEMICAL BASES OF ENERGY STORAGE IN HYBRID CAPACITOR STRUCTURES

В.В.Слепцов, Д.Ю.Кукушкин, А.О.Дителева, / anna.diteleva@mail.ru, Чжо Зо Лвин

V.V.Sleptsov, D.Yu.Kukushkin, A.O.Diteleva, Jo Zo Alvin

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

*В данной статье рассматриваются механизмы накопления энергии в системе с последующим ее преобразованием в электрическую энергию и теоретическое осмысление процессов, позволяющих подойти к созданию накопителей электрической энергии со значительно более высокой энергоемкостью, чем существующие в настоящее время (250 Вт*ч/кг и выше).*

*This article discusses the mechanisms of energy storage in the system with its subsequent conversion to electrical energy and theoretical understanding of the processes that allow to approach the creation of electric energy storage with a significantly higher energy intensity than currently existing ones (250 W*h/kg and higher).*

Ключевые слова: *Гибридные источники питания сверхъёмкие конденсаторные структуры, химические источники тока, конденсаторы с псевдоемкостью, энергоемкость.*

Keywords: *hybrid power supplies ultra-high-capacity capacitor structures, chemical current sources, capacitors with pseudo-capacity, energy intensity.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важной необходимостью стало вести наблюдение за возобновляемыми источниками энергии, такими как солнце, ветер, геотермальные источники, океан и