5. НАНОХИМИЯ

УДК 538.971 *Оригинальная статья*

Изменение массового состава кластеров щелочных металлов при изменении геометрии поверхности полевого источника

Д.П. Бернацкий, В.Г. Павлов
ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»
194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
bernatskii@ms.ioffe.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.787

Аннотация: Исследовано влияние структуры поверхности металлического кристалла на образование кластеров из адсорбированных на поверхности атомов щелочных металлов. Исследование проводилось с помощью методов полевой электронной, полевой десорбционной микроскопии и времяпролетного масс-анализа десорбируемых электрическим полем ионов. В качестве подложек использовались кристаллы из вольфрама и рения. Адсорбатами были натрий, калий и цезий. Атомы щелочных металлов на поверхность вольфрамового или рениевого полевого эмиттера наносились из внешнего напылителя. Эксперименты проводились в сверхвысоком вакууме ($p < 10^{-9}$ Torr). Для определения масс производилась импульсная полевая десорбция кластеров с поверхности и измерение времени пролета ионизированных кластеров от поверхности образца до детектора. В результате измерений были зафиксированы кластеры, в которых содержалось до семи атомов. Для определения влияния структуры металлических кристаллов на количество атомов в кластерах проводили нагревание металлического кристалла в электрическом поле (термополевую обработку). В результате такой обработки изменялась форма острия и структура его поверхности. Уменьшалось количество кристаллических ступеней вплоть до полного их исчезновения, форма кристалла постепенно переходила от близкой к полусфере скруглённой формы (формы отжига) к форме многогранника. Измерение состава кластеров проводилось на разных стадиях перехода от круглой формы кристалла к многограннику, и соответственно, с разным количеством ступеней на поверхности. При уменьшении количества ступеней уменьшалось и количество атомов в кластере. На поверхности полностью огранённого плотноупакованными кристаллическими плоскостями образце без ступеней образовывались только одноатомные кластеры. Из полученных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что для образования кластеров из атомов щелочных металлов на металлической поверхности необходимо наличие кристаллических ступеней на поверхности.

Ключевые слова: полевая десорбция, цезий, калий, натрий, вольфрам, рений, электрическое поле, ионные кластеры.

Бернацкий Дмитрий Петрович – к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник, ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»
Павлов Виктор Георгиевич – д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»

Original paper

Changes in the mass composition of alkali metal clusters caused by the geometry of the field source surface changes

D.P. Bernatskii, V.G. Pavlov
Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia
bernatskii@ms.ioffe.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.787

Abstract: The effect of the surface structure of a metallic crystal on the formation of clusters of alkali metal atoms adsorbed on the surface has been studied. The study was carried out using field electron microscopy, field desorption microscopy, and time-of-flight mass analysis of ions desorbed by an electric field. Crystals of tungsten and rhenium were used as substrates. The adsorbates were sodium,

© Д.П. Бернацкий, В.Г. Павлов, 2026

potassium, and cesium. Alkali metal atoms were deposited on the surface of a tungsten or rhenium field emitter from an external spray. The experiments were carried out in an ultrahigh vacuum ($p < 10^{-9}$ Torr). To determine the masses, pulsed field desorption of clusters from the surface and measurement of the time of flight of ionized clusters from the sample surface to the detector were performed. As a result of the measurements, clusters containing up to seven atoms were detected. To determine the effect of the structure of metal crystals on the number of atoms in clusters, a metal crystal was heated in an electric field (thermal field treatment). As a result of this treatment, the shape of the tip and the structure of its surface changed. The number of crystal steps decreased until they completely disappeared, and the crystal shape gradually shifted from a rounded shape close to a hemisphere (annealing shape) to a polyhedron shape. The cluster composition was measured at different stages of the transition from a round crystal shape to a polyhedron, and, accordingly, with a different number of steps on the surface. As the number of steps decreased, so did the number of atoms in the cluster. Only monatomic clusters were formed on the surface of a sample completely faceted with densely packed crystal planes without steps. From the experimental results obtained, it can be concluded that the formation of clusters of alkali metal atoms on the metal surface requires the presence of crystalline steps on the surface.
Keywords: field desorption, cesium, potassium, sodium, tungsten, rhenium, electric field, ion clusters.

Dmitrii P. Bernatskii – Ph. D., Docent, Senior Researcher, Ioffe Institute, ORCID: 0009-0003-2028-061X
Victor G. Pavlov – Dr. Sc., Senior Researcher, Ioffe Institute, ORCID:0000-0002-3297-9255

Поступила в редакцию/received: 19.07.2026; после рецензирования/revised: 21.08.2026; принята/accepted: 22.08.2026.

1. Введение

Эмиссия ионов в сильном электрическом поле позволяет получать пучки заряженных частиц с большой плотностью тока [1]. Их использование перспективно для ряда областей науки и технологии, таких как ионная литография, легирование полупроводников, обработка различных материалов ионными пучками, ускорители заряженных частиц [2-7]. Одним из способов получения ионных пучков является использование полевой десорбции. Полевая десорбция это удаление и ионизация атомов или молекул, адсорбированных на поверхности ионного эмиттера, при приложении к эмиттеру электрического поля. Полевая десорбции происходит при напряженности электрического поля порядка 10^7-10^9В/см. Такое поле создается на поверхности проводящего острия с радиусом закругления вершины 10÷1000 нм. Наиболее легко ионизуемыми веществами являются щелочные металлы, адсорбированные на поверхности металла. Полевая десорбция щелочных металлов происходит при более низких напряженностях электрического поля и температурах по сравнению с другими адсорбатами. Поэтому их удобно использовать в качестве материала для получения ионных пучков. Для разработки и успешного применения ионных эмиттеров необходимо знать состав частиц в получаемых пучках и возможности его изменения.

Полевая десорбция щелочных металлов используется для получения изображений в полевой десорбционной микроскопии [8, 9] Интерес представляет также возможность использования ионизированных

кластеров. Отмечается перспективность применения малых ионных кластеров в первичном пучке во вторично-ионной масс-спектрометрии для увеличения чувствительности анализа[10].

При изучении полевой десорбции атомов щелочных металлов адсорбированных на поверхности вольфрама и рения в области субмонослойных покрытий с помощью полевого десорбционного микроскопа в режиме широкоугольного атомного зонда были обнаружены ионные кластеры [11]. Эти кластеры состояли из небольшого количества атомов щелочных металлов. Идентификация масс наблюдаемых кластеров осуществлялась путем измерения времени пролета десорбируемых адатомов с поверхности образца до регистрирующей системы.

В работах по изучению адсорбции атомов щелочных металлов на поверхности тугоплавких металлов с помощью дифракционных методов не наблюдалось образование каких-либо ассоциатов из атомов щелочных металлов на плоской поверхности образцов [12, 13]. Для атомов щелочных металлов образование многоатомных структур на поверхности металлов считалось маловероятным из-за наличия диполь-дипольного отталкивания между адсорбированными на металлической поверхности атомами[12-15]. Дипольный момент возникает вследствие малого потенциала ионизации атомов щелочных металлов. Наиболее сильно диполь-дипольное взаимодействие проявляется при малых покрытиях адсорбатом поверхности (порядка десятых долей моноатомного слоя) [12, 13].

В полевом десорбционном микроскопе образец имеет форму острия с радиусом закругления вершины меньше 1 мкм, а исследуемая поверхность представляет собой квазисферическую монокристаллическую поверхность. Такая форма образца позволяет создавать необходимую для десорбции адсорбированных атомов напряженность электрического поля 10^6-10^8 В/см. На квазисферической монокристаллической поверхности образца расположены низкоиндексные и высокоиндексные кристаллические плоскости и ступени моноатомной высоты, расположенные между плоскими гранями. Наличие ступеней может приводить к образованию потенциальных ям и барьеров [16, 17] и скоплению адсорбированных атомов у края ступени и образованию ассоциатов. В этой связи представляет интерес изучение влияния геометрии поверхности монокристаллов на образование кластерных ионов при полевой десорбции с их поверхности. Эту цель можно достичь, изменяя количество моноатомных ступеней между плоскими гранями кристалла и площади плоских граней. В полевом десорбционном микроскопе это можно сделать с помощью термополевой обработки острия [18, 19]. При термополевой обработке низкоиндексные плоские грани разрастаются, поглощая моноатомные ступени. В результате

квазисферическая поверхность может преобразоваться в многогранник с поверхностью из низкоиндесных плоскостей. В этом случае, получая масс-спектры десорбированных атомов в режиме широкоугольного атомного зонда, можно установить влияние геометрии поверхности на образование кластеров.

2. Методика эксперимента

Исследования проводились с помощью полевого электронного и десорбционного микроскопа с широкоугольным атомным зондом [8]. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

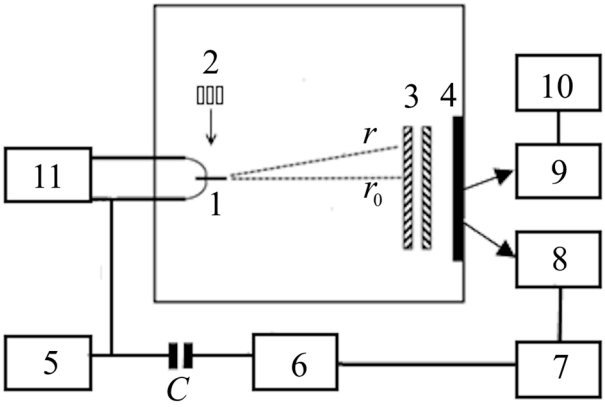
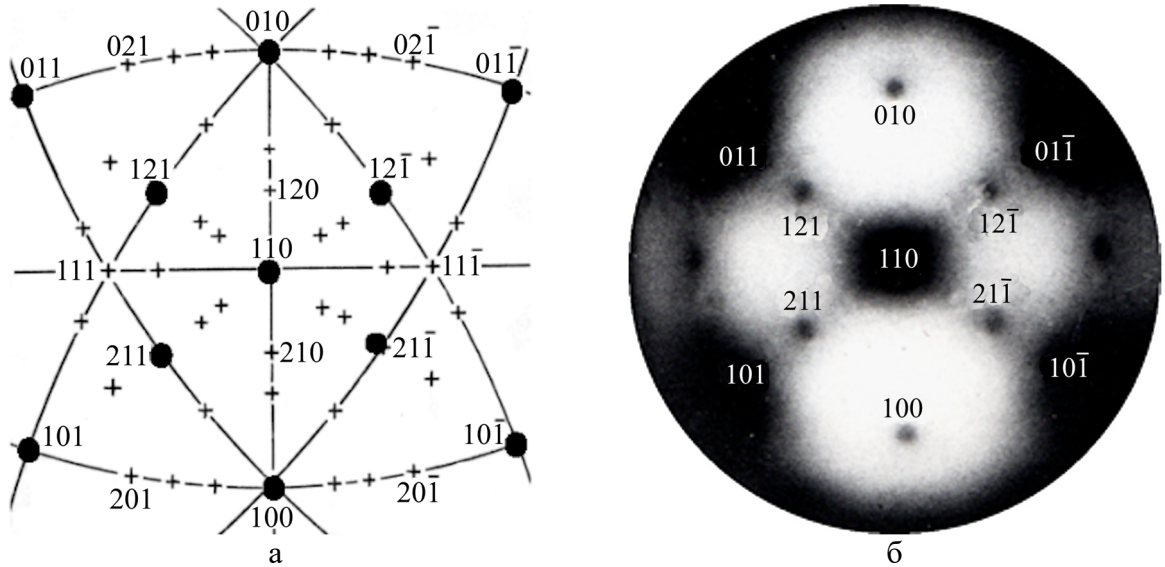


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, где 1 – образец, 2 – испарители щелочных металлов, 3 – микроканальные пластины, 4 – люминесцентный экран, 5 – источник постоянного напряжения, 6 – генератор импульсов, 7 – запоминающий осциллограф, 8 – фотоумножитель, 9 – видеокамера, 10 – компьютер, 11 − нагрев образца.



а б

Рис. 2. Стереографическая проекция вольфрамового острия формы отжига с изображением плоскостей на квазисферической поверхности (а) и полевое электронное изображение (б) этой поверхности в полевом электронном микроскопе.

Образцы в виде острия изготавливались из вольфрамовой и рениевой проволоки диаметром 0,1 мм путем электрохимического травления.

Полученные образцы отжигали при температуре 2500 K непосредственно в вакуумной камере микроскопа. Во время отжига происходила очистка образца и формирование монокристаллической квазисферической поверхности вершины острия с плоскими гранями размером 1-100 нм и ступенями моноатомной высоты (форма отжига). Формирование монокристаллической вершины полевого эмиттера контролировали по появлению стандартного полевого электронного изображения поверхности [20,21]. На рис. 2 приведена стереографическая проекция с обозначением плоскостей для кубических кристаллов вольфрама с центральной осью (110) (см. рис. 2 а) и соответствующее полевое электронное изображение, которое появляется после отжига острия (см. рис. 2 б).

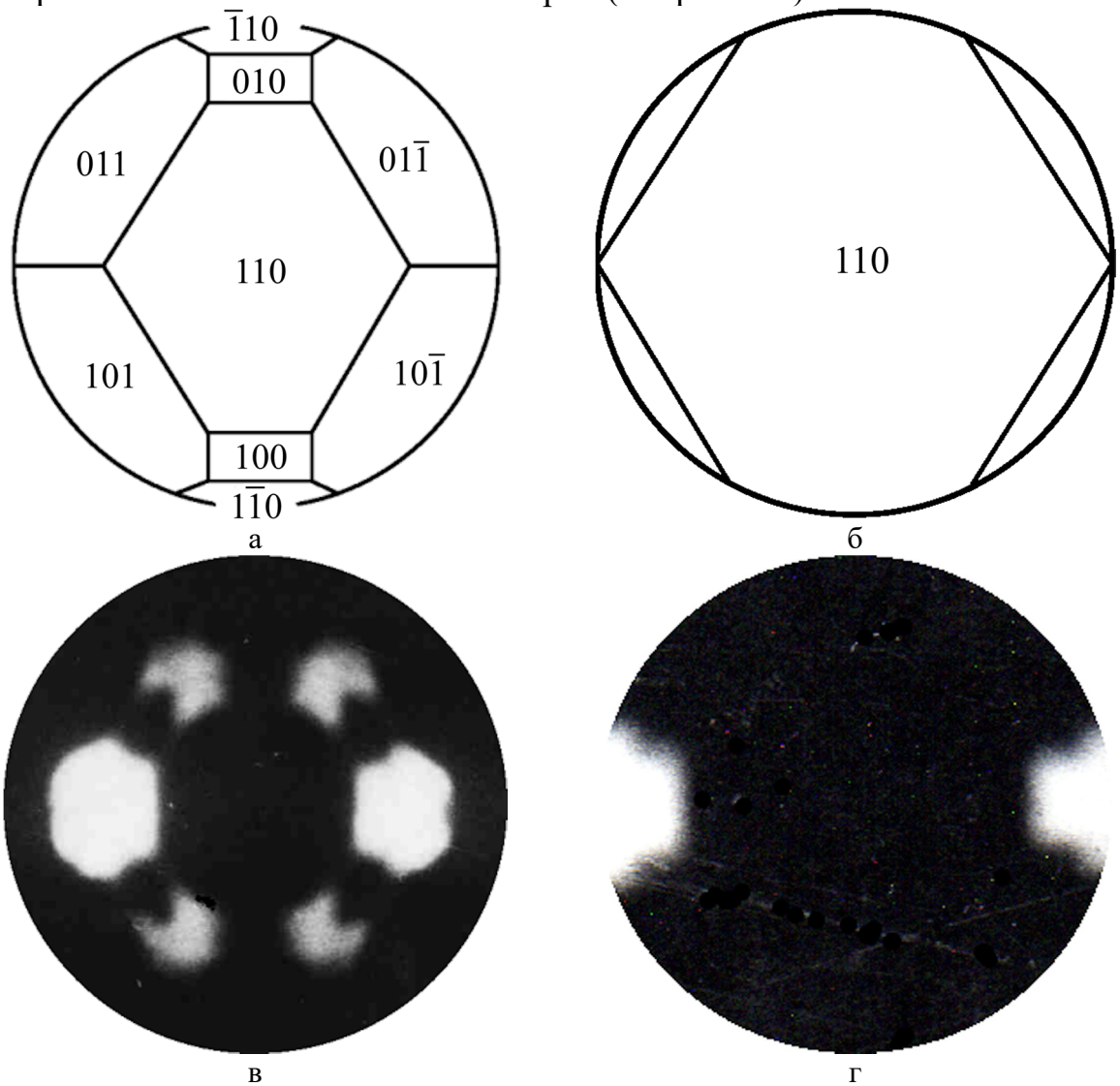


Рис. 3. Изображения поверхности после термополевой обработки, схемы с изображением низкоиндексных плоскостей (а, б) и соответствующие им полевые электронные изображения (в, г).

Для изменения формы образца и выявления влияния структуры и формы поверхности на массовый состав эмитируемых ионов

использовался известный процесс перестройки острия в электрическом поле [18, 19]. Образец нагревался до температуры, активирующей поверхностную самодиффузию материала образца, в присутствии электрического поля. На острие не было адсорбатов, и оно находилось под отрицательным потенциалом. При таком воздействии скругленные участки поверхности ограняются плотноупакованными плоскостями. Изменение формы острия происходит за счет компенсации положительного давления поверхностного натяжения отрицательным давлением электрического поля на поверхность металла. Монокристаллическое остриё приобретает новую, равновесную в электрическом поле форму (см. рис. 3). На рис. 3 а и 3 б представлены схемы и полевые электронные изображения вольфрамового острия после первой стадии термополевой перестройки, при которой расширяются имевшиеся на исходном образце плоские низкоиндексные плотноупакованные грани. Рис. 3 в и 3 г относятся к конечной стадии перестройки, в результате которой поверхность вершины острия превращается в многогранник, состоящий из наиболее плотноупакованных кристаллографических плоскостей (в случае вольфрама плоскостей типа {110}).

Увеличенное изображение поверхности острия на люминесцентном экране образуется либо за счет полевой электронной эмиссии (полевое электронное изображение), либо в результате полевой эмиссии ионов щелочных металлов десорбированных с поверхности (полевое десорбционное изображение). Усиление слабых эмиссионных токов осуществлялось с помощью сборки из двух микроканальных пластин (диаметром 56 мм), расположенных перед люминесцентным экраном.

Нанесение атомов щелочных металлов на поверхность острия осуществлялось с помощью прямонакальных испарителей, в которых находились соли исследуемого металла и восстановитель.

В режиме полевого электронного микроскопа регистрировали полевое электронное изображение поверхности, измеряли зависимости тока полевой электронной эмиссии от напряжения, из которых строили графики Фаулера-Нордгейма, с помощью которых определяли работу выхода поверхности и полевые параметры (фактор электрического поля) острия. В режиме полевой десорбционной микроскопии осуществлялась визуализация распределения полевой десорбции адсорбированных атомов щелочных металлов в виде ионов по поверхности острия в нанометровом масштабе и определялась напряженность электрического поля, при которой происходила десорбция.

Для определения масс десорбированных ионов в режиме широкоугольного атомного зонда (регистрация всех десорбированных ионов с поверхности попадающих в зону регистрации) измерялось время

пролета t ионов с поверхности образца до детектора (до микроканальных пластин). Время пролета связано с массой иона формулой [22]:

$$t = r_0(2q\sum U/m)^{-1/2}, \quad (1)$$

где r_0 – расстояние от поверхности образца до детектора, q – заряд иона, $\sum U = U_0 + U_p$ – разность потенциалов между образцом и МКП, U_0 – постоянное напряжение, U_p – импульсное напряжение, m – масса иона. Постоянное напряжение U_0 регулировалось в пределах 0-30 кВ. Параметры импульса напряжения могли варьироваться по амплитуде (0÷4 кВ) и длительности (2÷20 нс).

Для того, чтобы оценить напряженность электрического поля необходимую для десорбции однократно заряженных ионов щелочных металлов использовали выражение для энергетического барьера $Q(F)$, который в модели сил изображения определяется выражением [5]

$$Q(F) = \Lambda(\theta) + I + \varphi(\theta) - e^{3/2}F^{1/2} + \Delta E_p(\theta), \quad (2)$$

где Λ – теплота десорбции атома, I – потенциал ионизации атома, φ – работа выхода поверхности, e – заряд электрона, F – напряженность приложенного электрического поля, θ – степень покрытия адсорбатом поверхности, ΔE_p – поляризационная поправка, равная $1/2(\alpha_a - \alpha_i)\cdot F^2$, где α_a – поляризуемость адсорбированного атома, α_i – поляризуемость десорбирующегося иона. Для адсорбированных атомов щелочных металлов поляризуемость α_a мала и не превышает 5Å^3 [16]. Для десорбированных ионов α_i тоже не превышает 3Å^3 [17]. Поэтому поляризационная поправка ΔE_p в выражении $Q(F)$ для атомов щелочных металлов не оказывает существенного влияния. Время τ необходимое для полевой десорбции при термической активации определяется уравнением Аррениуса:

$$\tau = 1/v_0 \exp(Q/kT), \quad (3)$$

где v_0 – вибрационная частота, k – постоянная Больцмана, T – температура. Из соотношений (2) и (3) можно написать выражение для оценки величины напряженности электрического поля F необходимого для десорбции выбранного адсорбата:

$$e^{3/2}F^{1/2} = \Lambda + I - \varphi - kT\ln(\tau v_0), \quad (4)$$

где температурная поправка $kT\ln(\tau v_0)$ находится в пределах 0,78÷0,5 эВ для комнатной температуры T = 300 K образца [23,24].

Для идентификации десорбированных ионов по массам, к образцу прикладывается постоянное напряжение U_0 и импульсное U_p. Величина постоянного напряжения выбирается исходя из расчетного порогового

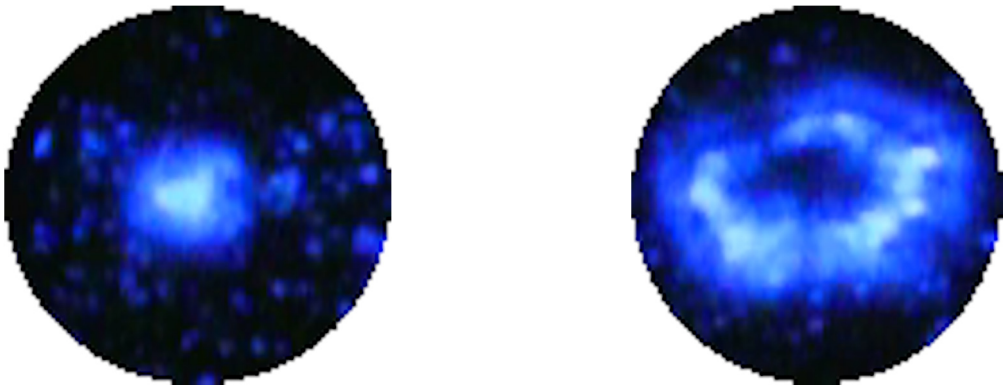
значения напряженности электрического поля. Для десорбции адатомов натрия, калия и цезия в области малых покрытий (с учетом фактора электрического поля, получаемого из характеристик Фаулера-Нордгейма для каждого образца), требуется постоянное напряжение 5-10 кВ. Импульс напряжения (1-1,5 кВ) от генератора 9 (см. рис. 2) поступает на образец, инициирует десорбцию адсорбата и осуществляет запуск развертки запоминающего осциллографа 8. Через время t десорбированные ионы попадают на детектор, где происходит усиление и формирование импульса напряжения, поступающего на запоминающий осциллограф. Измеряя время пролета ионов t на калиброванной развертке осциллографа можно оценить массу ионов.

3. Описание результатов

Изучение полевой десорбции атомов щелочных металлов проходило при комнатной температуре. При комнатной температуре образца при адсорбции на его поверхности атомов щелочных металлов (цезий, калий, натрий) устанавливается миграционное равновесие на наноструктурированной и неоднородной по работе выхода поверхности [15]. При выполнении данного условия распределение концентрации адсорбата на участках поверхности образца (вследствие поверхностной диффузии) соответствует теплоте испарения адатомов Λ (чем больше Λ, тем больше поверхностная концентрация адсорбата в данном месте поверхности), что оказывает влияние на величину напряженности электрического поля необходимую для полевой десорбции. Поэтому при десорбции адсорбированных атомов, с какой либо области поверхности и уменьшении их концентрации в данной области, происходит диффузия адатомов в зону десорбции в неоднородном электрическом поле. В результате идет восстановление концентрации адсорбата в зоне десорбции за счет поступления адатомов с боковой поверхности. При этом величина десорбирующего поля F, зависящая от степени покрытия, не изменяется, и процесс полевой десорбции может идти достаточно долго вследствие существенно большей площади боковой поверхности по сравнению с площадью вершины образца.

На рис. 4 а приведено полевое десорбционное изображение начала полевой десорбции цезия с грани типа $(01\bar{1}1)$ рения. Ввиду того, что при десорбции уменьшается концентрация адсорбата, увеличивается работа выхода поверхности и резко возрастает скорость десорбции. При этом весь адсорбат с этой области десорбируется, область освобождается от адсорбата, десорбция идет с границы области из адсорбата диффундирующего из окружающей поверхности, образуется контур полевой десорбции (см. рис. 4 б). При увеличении напряжения на образце

этот контур полевой десорбции стягивается к периферии острия. В случае острия формы отжига при изменении десорбирующего напряжения контур движется по участкам поверхности с различной геометрией поверхности (моноатомные ступени, плоские грани). На перестроенной поверхности контур движется практически по плоским граням, иногда захватывая ребра между плоскостями.



а б

Рис. 4. Полевое десорбционное изображение начала полевой десорбции цезия с грани $(01\bar{1}1)$ рения (а) и образование контура полевой десорбции (б).

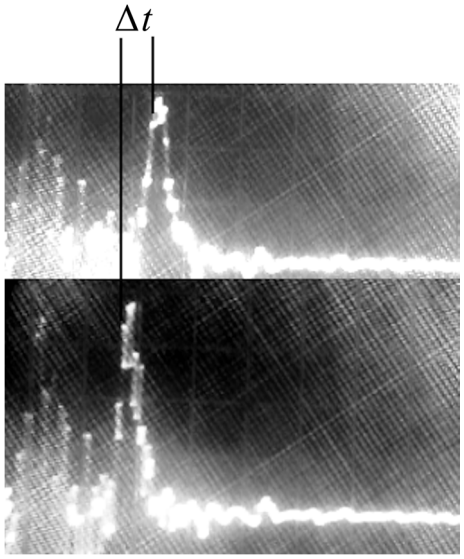
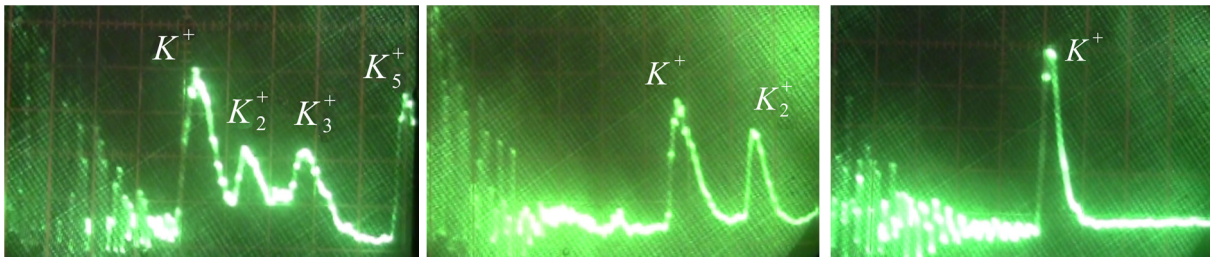


Рис. 5. Смещение массового пика во времени при изменении десорбирующего напряжения.

В режиме широкоугольного атомного зонда были получены масс-спектры при полевой десорбции адсорбированных щелочных металлов на остриях с разной геометрией поверхности. Времяпролетные масс-спектры содержали различные пики, положение которых зависело от приложенного напряжения. С изменением десорбирующего напряжения меняется энергия ионов и поэтому пики в масс-спектрах смещались по времени согласно формуле (1) на величину Δt (см. рис. 5).

Проведенный анализ времен пролета десорбированных ионов показал, что во времяпролетных масс-спектрах, полученных с острия формы отжига, присутствуют как одноатомные, так и кластерные ионы. При каждом импульсе десорбирующего напряжения спектры были различными. Они могли содержать один два или несколько пиков, соответствующих разным массам (см. рис. 6 а).



а б в

Рис. 6. Изменения масс- спектров калия при изменении геометрии поверхности: а – острие формы отжига, б – перестроенное острие с несколькими плоскими гранями в области регистрации, в – перестроенное острие с одной плоской гранью в области регистрации.

Существенным изменением при переходе от сглаженной поверхности формы отжига к перестроенной поверхности в электрическом поле является резкое уменьшение количества монокристаллических одноатомных ступеней, расположенных между низкоиндексными гранями кристалла. Уменьшение количества ступеней приводит к уменьшению количества десорбированных кластеров. При отсутствии ступеней десорбция кластеров не происходит. Десорбируются только одноатомные ионы. Сравнение полученных масс-спектров для образцов с разной геометрией поверхности указывает на влияние локализации полевой десорбции на поверхности эмиттера. При изменении десорбирующего напряжения меняется локализация десорбции ионов по поверхности и на разных участках поверхности вероятность образования кластерных ионов может изменяться. После перестройки острия в электрическом поле, когда на поверхности формировались только плоские низкоиндексные грани, можно было наблюдать существенные изменения в масс-спектрах. Когда в зону регистрации попадало несколько плоских граней (как показано на рис. 3 а) в масс-спектрах присутствовали одноатомные ионы (в основном) и двухатомные кластеры (см. рис. 6 б). Если в зону регистрации попадала только одна плоская грань, кластерные ионы не наблюдались (см. рис. 6 в). Регистрировались только одноатомные ионы.

4. Заключение

Таким образом, комплексом методов, включающим полевую электронную микроскопию, полевую десорбционную микроскопию

непрерывного режима и времяпролетный масс-спектрометрический анализ, зарегистрировано образование кластеров из адсорбированных атомов калия и цезия на подложках из вольфрама и рения в электрическом поле, содержащих до семи атомов щелочного металла. Идентифицированы места преимущественного образования кластеров на поверхности полевого эмиттера в условиях миграционного равновесия адсорбата. Показано, что они образуются преимущественно в областях поверхности, содержащих низкоиндексные кристаллические плоскости и ступени моноатомной высоты. Образование ассоциатов происходит, несмотря на электростатическое диполь-дипольное отталкивание между адсорбированными на металлической подложке атомами щелочных металлов. На ассоциацию атомов в кластеры влияет наличие кристаллических ступеней на поверхности подложки. Изменяя геометрию поверхности можно изменять состав образующихся кластеров.

Библиографический список:

1. **Muller, E.W**. Field ion microscopy, field ionization and field evaporation / E.W. Muller, T.T. Tsong // Progress in Surface Science. – 1974. – V. 4. – P. 1-139. DOI: 10.1016/S0079-6816(74)80005-5.
2. **Gross, H**. From the discovery of field ionization to field desorption and liquid injection field desorption/ionization-mass spectrometry-A journey from principles and applications to a glimpse into the future / H. Gross // European journal of Mass Spectrometry. − 2020. − V. 26. − Iss. 4. − P. 241-273. DOI: 10.1177/1469066720939399.
3. Nanofabrication using focused ion and electron beams: principles and applications / ed. by I. Utke, S. Moshkalev, P. Russell. – Oxford: Oxford University Press, 2012. – 840 p.
4. **Avasthi, D.K.** Swift heavy ions for materials engineering and nanostructuring / D.K. Avasthi, G.K. Mehta // Springer Series in Materials Science. – V. 145. – Dordrecht: Springer, 2011. – XII + 280 p. DOI: 10.1007/978-94-007-1229-4.
5. **Исаханов**, **З.А.** Модификация свойств поверхности свободных пленок Si-Cu имплантацией ионов активных металлов / З.А. Исаханов, И.О. Косимов, Б.Э. Умирзаков, Р.М. Ёркулов // Журнал технической физики. − 2020. – Т. 90. **–** Вып. 1. − С. 123-127. DOI: 10.21883/JTF.2020.01.48672.202-19.
6. Nano tools and devices for enhanced renewable energy / ed.by S. Devasahayam, C.M. Hussein. – Amsterdam: Elsevier, 2021, 620 p. DOI: 10.1016/C2019-0-03671-0.
7. Luminescent metal nanoclusters. synthesis, characterization, and applications / ed.by S. Thomas, K. Joseps, S. Appukuttan, M.S. Mathew– Amsterdam: Elsevier, 2022, 726 p. DOI: 10.1016/C2020-0-03396-7.
8. **Бернацкий, Д.П**. Исследование поверхности твердого тела методом полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия / Д.П. Бернацкий, В.Г. Павлов // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. – Т. 73. – № 5. – С. 713-715.
9. **Suchorski, Y.** Field ion and field desorption microscopy: principles and applications / Y. Suchorski // In: Surface science tools for nanomaterials characterization; ed. by C.S.S.R. Kumar. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. – P. 227-272. DOI: 10.1007/978-3-662-44551-8_7.
10. **Морозов, С.Н.** Применение метода поверхностной ионизации для детектирования вторичных частиц во вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) / С.Н. Морозов, У.Х. Расулев // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – 6. – С. 45-50.
11. **Бернацкий, Д.П.** Идентификация кластеров щелочных металлов с помощью полевой десорбции / Д.П. Бернацкий, В.Г. Павлов. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 795-804. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.795.
12. **Большов, Л.А.** Субмонослойные пленки на поверхности металлов / Л.А. Большов, А.П. Напартович, А.Г. Наумовец, А.Г. Федорус // Успехи физических наук. – 1977. – Т. 122. – Вып. 1 (500). – С. 125-128.
13. **Клименко, Е.В.** Об электронном состоянии адсорбированных атомов цезия, лития и бария на грани (110) вольфрама / Е.В. Клименко, А.Г. Наумовец // Физика твердого тела. − 1971. − Т. 13. − Вып. 1. − С. 33-40.

14. **Naumovets, A.G**. Collective surface diffusion: an experimentalist's view / A.G. Naumovets // Physica A. – 2005. – vol. 357. I. 2. P. 189-215. DOI: 10.1016/j.physa.2005.06.027.
15. **Шредник, В.Н.** Автоэлектронная микроскопия Na на W в условиях миграционного равновесия / В.Н. Шредник, Е.В. Снежко // Физика твердого тела. − 1964. − Т. 6. − Вып.11− С. 3409-3422.
16. **Fu, T.-Y**. Energetics of surface atoms processes near a lattice step / T.-Y. Fu, H.-T. Wu, T.T. Tsong // Physical Review B. – 1998. – V. 58. – I. 4. – P. 2340-2346. DOI: 10.1103/PhysRevB.58.2340.
17. **Fu, T.-Y**. Determination of atomic potential energy around step corner sites of the Ir(111) surface / T.-Y. Fu, T.T. Tsong // Physical Review B. – 2001. – V. 61. – I. 7. – P. 4511-4513. DOI: 10.1103/PhysRevB.61.4511.
18. **Bettler, P. C.** Activation energy for the surface migration of tungsten in the presence of a high-electric field / P.C. Bettler, F.M. Charbonnier // Physical Review B. – 1960. – V. 119. – I. 1. – P. 85-93. DOI: 10.1103/PhysRev.119.85.
19. **Meng, G**. In situ observation of field-induced nanoprotrusion growth on a carbon-coated tungsten nanotip / G. Meng, Y. Li, R.A. Koitermaa et al. // Physical Review Letters. – 2024. – V. 132. – I. 17. – P. 176201-1-176201-6. DOI: 10.1103/PhysRevLett.132.176201.
20. **Beach, Th**. Adsorption studies of aluminum oxide on rhenium by means of field emission microscopy / Th. Beach, R. Vanselow // Applied Physics. − 1974. − V. 4. − I. 3. − P. 265-270. DOI: 10.1007/BF00884238.
21. **Добрецов, Л.Н**. Эмиссионная электроника / Л.Н. Добрецов, М.В. Гомоюнова. – Наука, 1966. – 564 с.
22. **Panitz, J.A.** Imaging atom-probe mass spectroscopy / J.A. Panitz // Progress in Surface Science. – 1978. – V. 8. – I. 6. – P. 219-262. DOI: 10.1016/0079-6816(78)90002-3.
23. **Dalgarno, A.** Atomic polarizabilities and shielding Factor / A. Dalgarno // Advances in Physics. − 1962. − V. 11. − I. 44. − P. 281-315. DOI: 10.1080/00018736200101302.
24. **Мюллер, Э.В.** Автоионизация и автоионная микроскопия / Э.В. Мюллер // Успехи физических наук. − 1962. −Т. 77. − Вып. 3. − С. 481-552. DOI: 10.3367/UFNr.0077.196207c.0481.

References:

1. Muller E.W., Tsong T.T. Field ion microscopy, field ionization and field evaporation, *Progress in Surface Science*, 1974, vol. 4, pp. 1-139. DOI: 10.1016/S0079-6816(74)80005-5.
2. Gross H. From the discovery of field ionization to field desorption and liquid injection field desorption/ionization-mass spectrometry-A journey from principles and applications to a glimpse into the future, *European journal of Mass Spectrometry*, 2020, vol. 26, issue 4, pp. 241-273 DOI: 10.1177/1469066720939399.
3. *Nanofabrication using focused ion and electron beams: principles and applications,* ed. by I. Utke, S. Moshkalev, P. Russell. Oxford, Oxford University Press, 2012, 840 p.
4. Avasthi D.K., Mehta G.K. Swift heavy ions for materials engineering and nanostructuring, *Springer Series in Materials Science*, vol. 145. Dordrecht, Springer, 2011, XII + 280 p. DOI: 10.1007/978-94-007-1229-4.
5. Isahanov Z.A., Kosimov I.O., Umirzakov B.E., Erkulov R.M. Modification of the surface properties of free Si–Cu films by implantation of active metal ions, *Technical Physics,* 2020, vol. 65, issue 1, pp. 114-117. DOI: 10.1134/S1063784220010090.
6. *Nano tools and devices for enhanced renewable energy*, ed. by S. Devasahayam, C.M. Hussein. Amsterdam, Elsevier, 2021, 620 p. DOI: 10.1016/C2019-0-03671-0.
7. *Luminescent metal nanoclusters. synthesis, characterization, and applications*, ed.by S. Thomas, K. Joseps, S. Appukuttan, M.S. Mathew. Amsterdam, Elsevier, 2022, 726 p. DOI: 10.1016/C2020-0-03396-7.
8. Bernatskii D.P., Pavlov V.G. Investigation of a solid surface using continuous-mode field-desorption microscopy, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Phys*ics, 2009, vol. 73, issue 5, pp. 673-675. DOI: DOI: 10.3103/S1062873809050438.
9. Suchorski Y. *Field ion and field desorption microscopy: principles and applications*, Surface science tools for nanomaterials characterization, ed. by C.S.S.R. Kumar. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2015, pp. 227-272. DOI: 10.1007/978-3-662-44551-8_7.
10. Morozov S.N., Rasulev U.Kh. Application of the surface ionization for the detection of secondary particles in the secondary-ion mass spectrometry (SIMS), *Technical Physics,* 2013, vol. 58, issue 6, pp. 821-826.DOI: 10.1134/S1063784213060224.
11. Bernackij D.P., Pavlov V.G. Identifikatsiya klasterov shchelochnykh metallov s pomoshch'yu polevoj desorbtsii [Identification of alkali metal clusters by field desorption], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2025, issue 17, pp. 795-804. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.795.
12. Bol'shov L.A., Napartovich A.P., Naumovets A.G.N., Fedoras A.G. Submonolayer films on the surface of metals, Soviet Physics Uspekhi, 1977, vol. 20, no. 5, pp. 432-451. DOI: 10.1070/PU1977v020n05ABEH005398.
13. Klimenko E.V., Naumovets A.G. Ob elektronnom sostoyanii adsorbirovannykh atomov tseziya, litiya i

bariya na grani (110) vol'frama [On the electronic state of adsorbed cesium, lithium and barium atoms on the (110) facet of tungsten], *Fizika tverdogo tela [Physics of the Solid State],* 1971, vol. 13, issue 1, pp. 33-40. (In Russian).
14. Naumovets A.G. Collective surface diffusion: an experimentalist's view, *Physica A*, 2005, vol. 357, issue 2, pp. 189-215. DOI: 10.1016/j.physa.2005.06.027.
15. Shrednik V.N., Snezhko E.V. Avtoelektronnaya mikroskopiya Na na W v usloviyakh migratsionnogo ravnovesiya [Autoelectronic microscopy of Na on W under conditions of migration equilibrium], *Fizika tverdogo tela [Physics of the Solid State],* 1964, vol. 6, issue 11, pp. 3409-3422. (In Russian).
16. Fu T.-Y., Wu H.-T., Tsong T.T. Energetics of surface atoms processes near a lattice step, *Physical Review B*, 1998, vol. 58, issue 4, pp. 2340-2346. DOI: 10.1103/PhysRevB.58.2340.
17. Fu T.-Y., Tsong T.T. Determination of atomic potential energy around step corner sites of the Ir(111) surface, *Physical Review B,* 2001, vol. 61, issue 7, pp. 4511-4513. DOI: 10.1103/PhysRevB.61.4511.
18. Bettler P.C., Charbonnier F.M. Activation energy for the surface migration of tungsten in the presence of a high-electric field, *Physical Review B,* 1960, vol. 119, issue 1, pp. 85-93. DOI: 10.1103/PhysRev.119.85.
19. Meng G., Li Y., Koitermaa R.A. et al. In situ observation of field-induced nanoprotrusion growth on a carbon-coated tungsten nanotip, *Physical Review Letters*, 2024, vol. 132, issue 17, pp. 176201-1-176201-6. DOI: 10.1103/PhysRevLett.132.176201.
20. Beach Th., Vanselow R. Adsorption studies of aluminum oxide on rhenium by means of field emission microscopy, Applied Physics, 1974, vol. 4, issue 3, pp. 265-270. DOI: 10.1007/BF00884238.
21. Dobretsov L.N., Gomoyunova M.V. *Emission Electronics*, trans. by I. Schechtman, ed. by Y. Freundlich, T. Korn. Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations, 1971, x+433 p.
22. Panitz J.A. Imaging atom-probe mass spectroscopy, *Progress in Surface Science*, 1978, vol. 8, issue 6, pp. 219-262. DOI: 10.1016/0079-6816(78)90002-3.
23. Dalgarno A. Atomic polarizabilities and shielding factor. *Advances in Physics*, 1962, vol. 11, issue 44, pp. 281-315. DOI: 10.1080/00018736200101302.
24. Müller E.W. Avtoionizatsiya i avtoionnaya mikroskopiya [Field ionization and field ion microscopy], *Uspekhi Physics,* 1962, *vol*. 77, issue 3, pp. 481-552. 10.3367/UFNr.0077.196207c.0481. (In Russian).