

Исследование роста нитевидных нанокристаллов на поверхности танталового автоэмиссионного катода

© В.С. Черныш,¹ И.П. Ли,³ А.А. Татаринцев,¹ А.Е. Иешкин,¹ К.Ф. Миннебаев,¹
Д.В. Бычков,² А.В. Шуманов,² Д.И. Селиверстов²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,
119991 Москва, Россия

² АО „Плутон“,
105120 Москва, Россия

³ ООО „ОКБ „Плутон“,
105120 Москва, Россия
e-mail: tatarintsev@physics.msu.ru

Поступило в Редакцию 11 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 20 января 2026 г.

Принято к публикации 3 февраля 2026 г.

Исследован рост нитевидных нанокристаллов (ННК) на поверхности танталовых автоэмиссионных катодов (АЭК) для магнетронов с холодным катодом. С помощью сканирующей электронной микроскопии на катодах после термополевой активации обнаружены ННК двух типов: толщиной 10–30 нм и 100–160 нм, имеющие кристаллическую огранку. Методом энергодисперсионного микроанализа установлен элементный состав единичных ННК, который оказался практически одинаковым для всех исследованных структур: Pd ((58 ± 6) at.%), Ta ((40 ± 6) at.%) и Ba ((2 ± 1) at.%). Показано, что ННК формируются не из материала танталовой подложки, а из слоя палладия, осаждающегося на АЭК с соседних вторично-эмиссионных катодов в процессе активации. Для проверки дислокационных моделей роста проведено облучение поверхности ионами Ar, однако значимого увеличения плотности ННК на облученных участках не зафиксировано. Обнаружены локальные зоны с аномально высокой концентрацией ННК, чей химический состав идентичен составу областей с низкой плотностью роста. Полученные результаты свидетельствуют о ключевой роли диффузионных процессов и пересадки материала в формировании ННК.

Ключевые слова: металлические нитевидные нанокристаллы, танталовый автоэмиссионный катод, палладий, сканирующая электронная микроскопия, состав нитевидных кристаллов, ионное облучение.

DOI: 10.61011/JTF.2026.07.63134.334-25

Введение

Нано- или микроразмерные металлические нитевидные кристаллы (НК), которые могут возникать на поверхностях металлических контактов электронных приборов и устройств, могут способствовать утечкам или вызывать короткое замыкание. Несмотря на распространенность явления роста НК на металлических поверхностях, механизм их образования вызывает споры уже более 70 лет. Независимо от существующих разногласий в теориях механизма роста НК считается, что их рост представляет собой явление снятия внутренних напряжений.

Согласно работе [1], теории роста НК можно разделить на три категории. Первые две категории представляют собой различные механизмы теории дислокаций, одна из которых предполагает рост от кончика НК, а другая — от его основания. Третья категория рассматривает рост нитевидных кристаллов как тип рекристаллизации, но не предлагает реального механизма роста.

В работе [1] представлен критический анализ существующих дислокационных моделей и приводятся экспериментальные данные, которые опровергают их. В част-

ности, это отсутствие дислокаций в НК и прилегающих к ним зернам по данным просвечивающей электронной микроскопии [2,3] и отсутствие свидетельств дислокации при рентгеноструктурном анализе [4]. Кроме того, рост НК наблюдается в направлениях, не совпадающих с плоскостями скольжения [5], которые характерны для дислокационных механизмов. В этой работе наблюдались направления роста НК, которые не совпадали с дислокационным механизмом.

В качестве альтернативы в работе [1] выдвигается модель, в которой ключевую роль играют процессы рекристаллизации, формирующие косые (наклонные) границы зерен, и граничная диффузия атомов олова. Согласно этой теории, именно наклонные границы зерен создают зоны пониженных напряжений, что вызывает направленную диффузию атомов олова к основанию будущего НК. Основным механизмом роста НК предлагается считать граничное скольжение, которое в сочетании с диффузией приводит к послойному добавлению материала у основания и вертикальному росту НК как единого кристалла.

В более поздней работе [6] представлена другая теория зарождения и роста оловянных НК в объемном оло-

ве под действием растягивающего напряжения. Авторы связывают образование НК с поведением дислокаций: высокая плотность локализованных винтовых дислокаций создает на поверхности спиральные ступеньки атомного масштаба, которые служат центрами зарождения НК. Локализованные в той же области краевые дислокации обеспечивают подачу атомов олова в НК за счет диффузии. Под действием внешних напряжений и силы изображения дислокации изгибаются, что приводит к изгибу НК и торможению диффузии атомов в месте изгиба краевой дислокации. Это вызывает выделение атомов олова у основания НК и его рост в прикорневой области.

Карпов в работе [7] предлагает новую теорию, объясняющую явление роста металлических НК на поверхностях таких металлов, как олово и цинк. В отличие от традиционных моделей, фокусирующихся на релаксации механических напряжений, автор в качестве движущей силы рассматривает электростатическую поляризацию зарождающихся игольчатых металлических частиц в сильных неоднородных электрических полях. Эти поля, по мнению автора, генерируются хаотично распределенными заряженными доменами („пятнами“) на поверхности металла, возникающими из-за неоднородностей в работе выхода, вызванных окислами, загрязнениями, границами зерен и механическими напряжениями. Теория количественно описывает стадии нуклеации и последующего роста НК, предсказывает их характерные размеры (длины ~ 10 nm при нуклеации, рост до миллиметров), инкубационный период и постоянную скорость роста. Ключевым результатом является вывод о том, что статистическое распределение длин вискероидов, определяемое редкими событиями попадания растущего вискера в области с аномально низким электрическим полем [7], близко к лог-нормальному, что согласуется с экспериментальными данными. Численные оценки параметров роста, полученные в рамках теории, демонстрируют удовлетворительное качественное и полуколичественное согласие с наблюдениями.

Несмотря на представленные явные противоречия в моделях роста НК и негативный эффект, который они оказывают на электронные устройства, интерес к механизму роста металлических НК существует до сих пор. Часто интерес вызван возможными применениями НК. Например, металлические НК высаживают на кантилеверы АСМ [8,9], также они могут быть использованы в качестве автоэлектронных эмиттеров. При конструировании быстродействующих магнетронов с „холодным“ катодом предложено применять автоэлектронную эмиссию с нитевидных нанокристаллов (ННК) [10]. В отличие от магнетронов с накаливаемыми катодами, время готовности которых составляет несколько минут, у магнетронов с холодным катодом мгновенная готовность достигается в результате использования особой конструкции катодного узла, состоящего из комбинации чередующихся автоэлектронных (АЭК) и вторично-эмиссионных катодов. В подобных магнетронах ини-

цирование начала генерации обеспечивается токами эмиссии с автоэлектронных катодов, а поддержание режима генерации — вторично-эмиссионными катодами (ВЭК). В работе [11] показано, что основными источниками тока автоэлектронной эмиссии являются НК, сформированные на поверхности АЭК. Поэтому целью настоящей работы является поиск и практическая реализация способов создания на поверхности АЭК структур, обеспечивающих наиболее благоприятные условия для зарождения и роста НК.

Эффективность АЭК определяется плотностью и качеством наноструктур [12], рост которых инициируется на поверхностных дефектах. Ключевой проблемой является недостаточная плотность и развитость этих наноструктур, что приводит к необходимости дополнительной тренировки катодов. Одним из перспективных путей увеличения плотности НК является целенаправленное создание дефектов на поверхности катодного материала для облегчения роста НК. В работе [10] было установлено, что методы предварительной обработки, такие как химическое и ионно-плазменное травление, позволяют искусственно создавать дефекты и существенно влиять на плотность и морфологию растущих ННК. Наибольшая плотность и развитость структур была достигнута после химического травления в смесях кислот, в то время как ионно-плазменное травление показало менее однородные результаты. Таким образом, целенаправленное создание дефектов поверхности методом химического травления было идентифицировано как перспективное направление для улучшения эмиссионных характеристик и оптимизации производства магнетронов.

Для оценки влияния рельефа поверхности, а также дефектов и дислокаций на концентрацию вискероидов на поверхности тантала (дислокационный механизм роста) в настоящей работе проведено облучение исходных поверхностей ионами Ag. Облучение химически инертными ионами Ag позволяет создавать дислокации на исходной шайбе Ta, при этом не вызывая изменения химического состава приповерхностной области. Также проведено исследование формы НК, выращенных на танталовых шайбах автоэмиссионного катода и их химического состава. Было проведено исследование химических составов областей с высокой концентрацией НК и относительно низкой для выявления возможных примесей, влияющих на их рост.

1. Образцы и методы исследования

Для исследования состава НК и влияния облучения подложки на их рост, использовались две сборки катодных узлов безнакального магнетрона (КПУ) — КПУ-1 и КПУ-2. Общий чертеж сборок КПУ представлен в работах [10,13]. Сборка КПУ-1 была изготовлена из штатных танталовых шайб, являющихся АЭК, разделенных Pd₅Va ВЭК. В аналогичном узле КПУ-2 были использованы четыре танталовые шайбы АЭК, предварительно об-

лученные ионами Ag с энергией 9 keV и флюенсами $5 - 50 \cdot 10^{17} \text{ ion/cm}^2$. Поверхность АЭК облучалась в двух местах пятном ионов с диаметром $\sim 2 \text{ mm}$. Облучение осуществлялось на ускорителе ионов физического факультета МГУ в вакууме порядка 10^{-6} Torr , обеспечиваемом диффузионными насосами. Облучение шайб ионами Ag высокими дозами может приводить к выносу дислокации на поверхность и способствовать росту вискеро́в в случае дислокационного механизма [14,15].

Термополевая активация проводилась при $950^\circ\text{C} - 1000^\circ\text{C}$ во внешнем электрическом поле $\sim 2 - 3 \cdot 10^5 \text{ V/m}$, а во время тренировки катода, в котором наблюдалось увеличение эмиссии, поле поддерживалось на уровне $\sim 1 - 2 \cdot 10^7 \text{ V/m}$. Время термополевой активации составляло 120 min. При этом давление в камере, в которой проходила активация и тренировка катода, не превышало $5 \cdot 10^{-7} \text{ Torr}$. При этом, согласно [16], при 1000°C давление паров Pd составляет $\sim 10^{-4} \text{ Pa}$, а давление паров Ва $\sim 1 \text{ kPa}$, поэтому в процессе активации и нагрева до такой высокой температуры Pd и Ва с ВЭК может испаряться и оседать на танталовые шайбы АЭК.

Исследование формы НК и проведение количественного рентгеновского микроанализа (РМА) проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Carl Zeiss Supra 40, оборудованного энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) рентгеновского излучения. Этот СЭМ, оборудованный термополевым катодом (катод Шоттки), позволяет получить предельное разрешение около 1 nm. Рентгеновский микроанализ проводился при энергии электронов 20 keV.

Для проведения количественного РМА использовался ЭДС INCA X-act производства компании Oxford Instruments, обладающий спектральным разрешением по энергии $\sim 133 \text{ eV}$ и достижимым пределом обнаружения для количественного анализа $\sim 1000 \text{ ppm}$ по элементам от В до U. ЭДС позволяет быстро определить качественно и количественно состав образца, выполнять картирование элементов в образце.

Для проведения РМА единичного НК образец позиционировался так, чтобы прошедший электронный пучок не взаимодействовал ни с подложкой, ни с другими деталями камеры на расстоянии, которое могло бы дать паразитный фон засветки. Схематическое изображение позиционирования образца, представлено на рис. 1. При проведении РМА вышедший из объективной линзы СЭМ электронный пучок 2 проходил через НК, сформированный на танталовой шайбе 3. Танталовая шайба крепилась в специальном держателе, помещенном на столике СЭМ, либо непосредственно в сборке КПУ. При этом столик наклонялся под большим углом в $60 - 70^\circ$ для того, чтобы прошедший через НК электронный луч не попадал на Та-шайбу, держатель образца или столик СЭМ. Детектор ЭДС 5 подвигался максимально близко к образцу с целью увеличения интенсивности сбора рентгеновского сигнала и уменьшения паразитной засветки от рассеянных электронов. При этом вышедшие

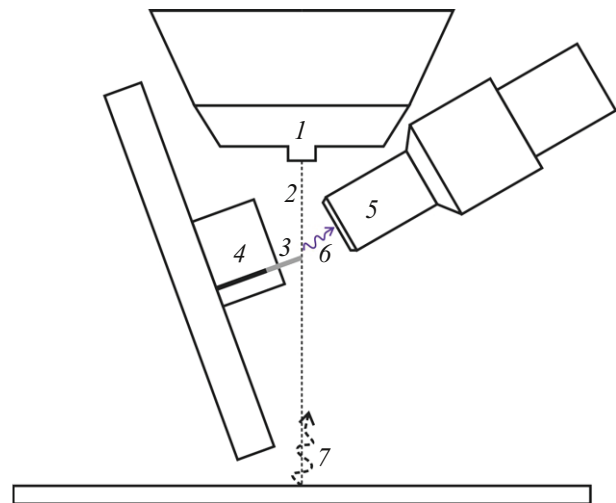


Рис. 1. Схема проведения РМА одиночных НК на поверхности АЭК: 1 — наконечник объективной линзы СЭМ, 2 — электронный пучок, 3 — Та-шайба с НК, 4 — держатель образцов, 5 — ЭДС, 6 — рентгеновские кванты, попадающие в ЭДС, 7 — паразитные рентгеновские кванты, которые не попадают в ЭДС.

из НК рентгеновские кванты 6 попадают во входное окно спектрометра, а кванты 7, сгенерированные на деталях камеры или столика, идут под углами, исключающими их детектирование. Для проверки влияния фона перед накоплением спектра пучок направлялся мимо вискера и контролировался сигнал с детектора рентгеновского спектрометра. Отсутствие счета позволяло убедиться, что паразитные рентгеновские кванты не доходят до детектора. Единственный паразитный сигнал мог бы возникнуть от отраженных от вискера электронов, которые могли сгенерировать рентгеновские кванты от подложки или держателя. Но предполагается, что количество таких паразитных рентгеновских квантов много меньше, чем сигнал, сгенерированный от самого НК. В процессе проведения исследования состава НК непрерывно проводилась корректировка положения пучка зонда.

2. Результаты и обсуждение

При исследовании сборок КПУ с опытными АЭК с использованием сканирующего электронного микроскопа были обнаружены НК двух размеров — „тонкие“ толщиной не более 10–30 nm и „толстые“ с характерными толщинами 100–160 nm. Измеренные длины вискеро́в лежат в диапазоне 0.3–1 μm (рис. 2) для обеих толщин. Исходя из времени термоактивации, скорость роста НК в длину составляет единицы нанометров в минуту. Для такой оценки предполагается, что после охлаждения КПУ после термоактивации рост вискеро́в прекращается.

На катоде КПУ-1 проведено исследование химического состава шести различных НК. Для примера на

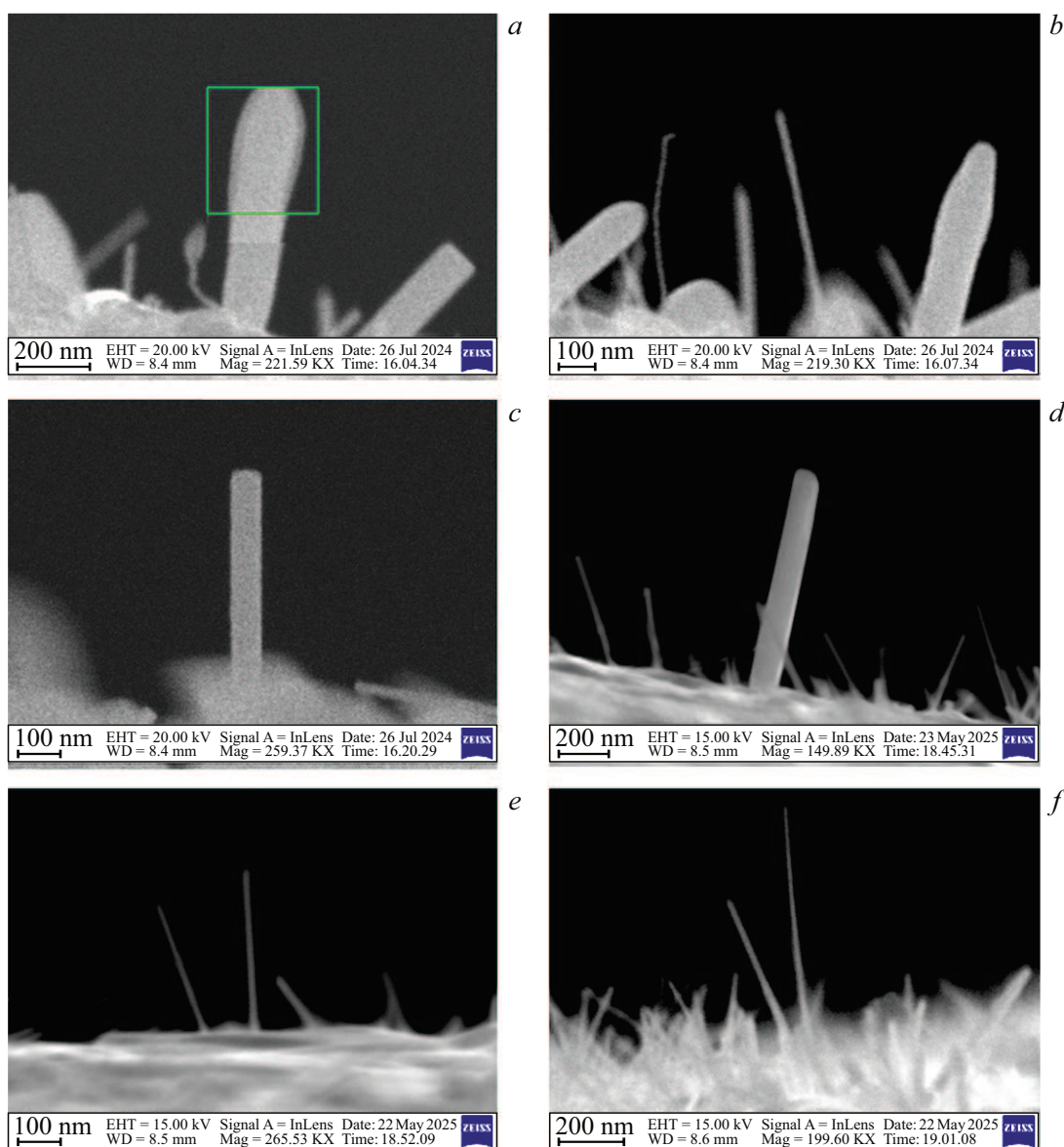


Рис. 2. Снимки НК до проведения исследования на химический состав. Для КПУ-1: *a* — № 1–1, *b* — № 1–3, *c* — № 1–6. Для КПУ-2: *d* — № 2–1, *e* — № 2–2, *f* — № 2–4. Для примера на (*a*) рамкой показана область, из которой происходила регистрация рентгеновского излучения.

рис. 2, *a, b*, представлены НК, на которых проводился рентгеновский микроанализ в сборке КПУ-1. Было проведено исследование как „толстых“ НК (№ 1–1 и № 1–6), так и относительно тонких. Данные по атомным процентам представлены в табл. 1. Усредненные по этим пяти НК (за исключением выпадающего № 1–3) результаты показывают, что НК состоит из Pd на (62 ± 2) at.%, Ba (1.4 ± 1.0) at.% и Ta (37 ± 2) at.%.

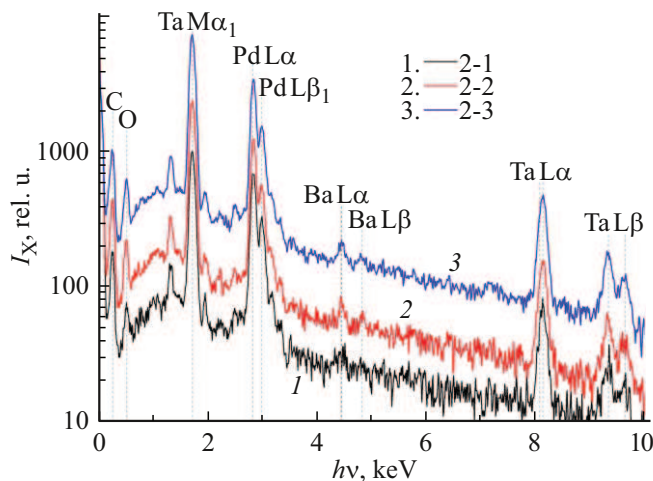
Аналогично было проведено исследование состава НК на второй сборке — КПУ-2 (пример НК, на которых проведен РМА, представлен на рис. 2, *d–f*). Здесь, помимо Pd, Ba и Ta, были обнаружены еще O и C. При усреднении по всем НК сборки КПУ-2 полный атомный состав по данным РМА получается следую-

щий: Ta (12 ± 2) %, Ba (0.6 ± 0.2) %, Pd (18 ± 2) %, O (17 ± 4) % и C (52 ± 6) %. Типичные спектры рентгеновского излучения с положением соответствующих линий представлены на рис. 3. Однако отсутствие углерода и кислорода на спектрах КПУ-1 и присутствие такой же плотности НК позволяет сделать предположение, что основные материалы состава НК — это Pd, Ba и Ta. Наличие углерода и кислорода в КПУ-2 возможно вызвано углеродным загрязнением поверхности образца парами диффузионного насоса в процессе ионного облучения.

Результаты по соотношению Pd, Ba и Ta (без учета примеси C и O) для 6 НК второй сборки представлены в табл. 1. Усредненные по всем НК КПУ-2

Таблица 1. Результаты исследования состава НК при помощи ЭДС спектрометра

Сборка	№	at.% Pd	at.% Ba	at.% Ta
КПУ-1	1–1	60.1	3.0	36.9
	1–2	65.2	0.3	34.5
	1–3	44.5	2.5	53
	1–4	61.0	1.4	37.6
	1–5	60.3	1.2	38.5
	1–6	62.2	0.8	37
КПУ-2	2–1	64.5	0.9	34.6
	2–2	57.1	1.9	41
	2–3	55.4	1.5	43.1
	2–4	54.4	1.8	43.8
	2–5	59.9	2.4	37.7
	2–6	57.3	2.7	40

**Рис. 3.** Типичные спектры рентгеновского излучения, зарегистрированные для НК на АЭК сборки КПУ-2 в логарифмическом масштабе. Пунктирными линиями отмечены положения линий рентгеновского излучения.

значения дают следующие результаты: Pd (58 ± 4) at.%, Ba (1.9 ± 0.6) at.% и Ta (40 ± 4) at.%.

Таким образом, для двухборок среднее значение по всем данным Pd (58 ± 6) at.%, Ba (2 ± 1) at.%, Ta (40 ± 6) at.%. Такое соотношение близко к фазе Pd₂Ta, обладающей высокой температурой плавления — 1800 °С [17], однако при увеличении Ta до ~ 50 at.% температура плавления понижается до ~ 1720 °С. Согласно схеме роста пар-жидкость-кристалл (ПЖК-механизму) [18], НК растут двухстадийно: сначала происходит относительно быстрый рост в длину (рост „лидера“), после чего они медленно утолщаются путем

слоевого роста. При этом быстрый рост обусловлен присоединением вещества к вершине кристалла, а на вершине наблюдаются сферообразные частицы (глобулы). Наблюдения на поверхности танталовых шайб вискеро́в двух размеров хорошо описывается ПЖК-механизмом. В этом случае наблюдаемые тонкие НК могут являться „лидерами“, которые затем утолщаются. Однако стоит отметить, что на снимках СЭМ (рис. 2 и 4.) явно не наблюдаются глобулы на кончиках НК, что противоречит ПЖК-механизму при росте НК сверху. В этом случае возможен механизм, когда утолщение „лидера“ осуществляется за счет подпитки из материала, находящегося снизу НК. При этом вытягивание „лидера“ электрическим полем может происходить из капли, которая остается на поверхности. Подчеркнем, что вискеры имеют четко выраженные грани (рис. 4), что свидетельствует об их кристаллической структуре.

Для оценки влияния облучения ионами Ag на концентрацию НК было проведено исследование концентрации вискеро́в на всех танталовых шайбах (сборка КПУ-2). На снимках СЭМ поверхности Та АЭК до и после облучения, представленных на рис. 5, хорошо заметно формирование рельефа. Однако в процессе термоактивации возможна рекристаллизация тантала с частичным устранением сформированного рельефа покрытием его пленкой, состоящей из Pd и Ba.

Как показало это предварительное исследование, локальное облучение Ag с флюенсами до $10^{17} - 10^{18}$ ion/cm² не вызывает значительного увеличения концентрации вискеро́в на танталовых АЭК. Влияние облучения и винтовых дислокаций на рост вискеро́в на поверхности тантала требует дальнейшего исследования. Однако на поверхностях двух разных танталовых шайб АЭК, облученных ионами Ag⁺, было обнаружено по одной относительно небольшой области с размерами 35–50 μm (что много меньше области облучения ионным пучком) с повышенной концентрацией НК. При помощи РМА было проведено исследование химического состава областей, где наблюдался интенсивный рост НК (рис. 6, а), и области, где концентрация НК минимальна (рис. 6, б). При этом стоит обратить внимание, что угол падения электронов на поверхность АЭК в данном эксперименте составлял 60°, а следовательно, при энергии электронов $E_0 = 20$ keV глубина выхода рентгеновского излучения ~ 400–500 nm. Из данных РМА, представленных в табл. 2, следует, что состав областей с разными концентрациями НК одинаков в пределах приведенной точности. Возможно, присутствует материал, который является катализатором для роста НК, однако его концентрация ниже предела обнаружения детектора рентгеновского излучения. В табл. 2 также видно, что на поверхности наблюдается в большей степени Pd (до 35–38 at.%), а тантала достаточно мало, однако в составе НК концентрация Ta значительная. Такая высокая концентрация палладия на поверхности по сравнению с Ta свидетельствует о том, что исходная поверхность

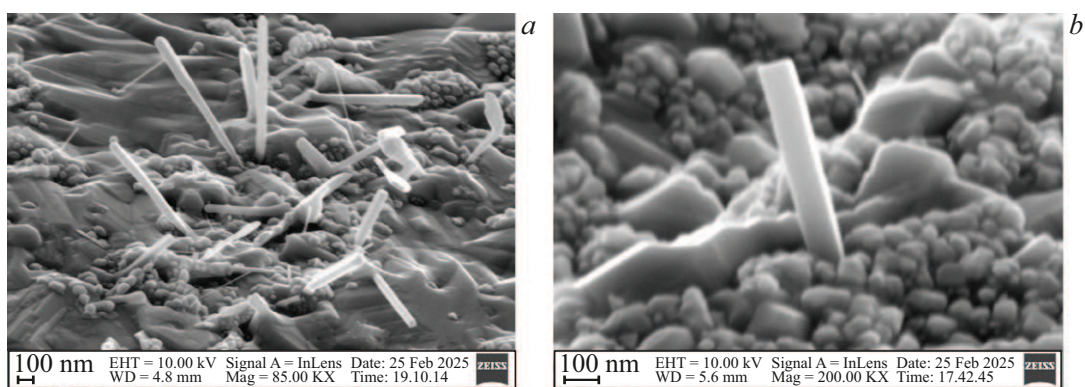


Рис. 4. СЭМ изображения НК, выросших на Та-шайбе КПУ.

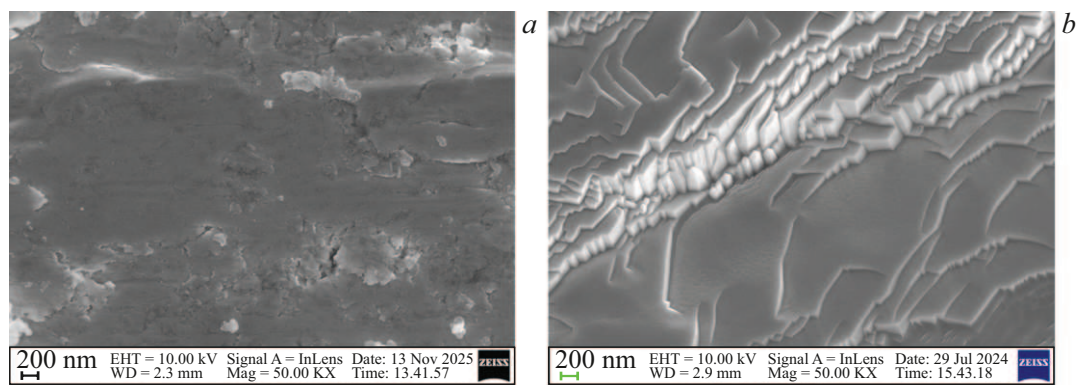


Рис. 5. Танталовая фольга АЭЖ до (а) и после (б) облучения ионами с дозой $5 \cdot 10^{18}$ ион/см⁻².

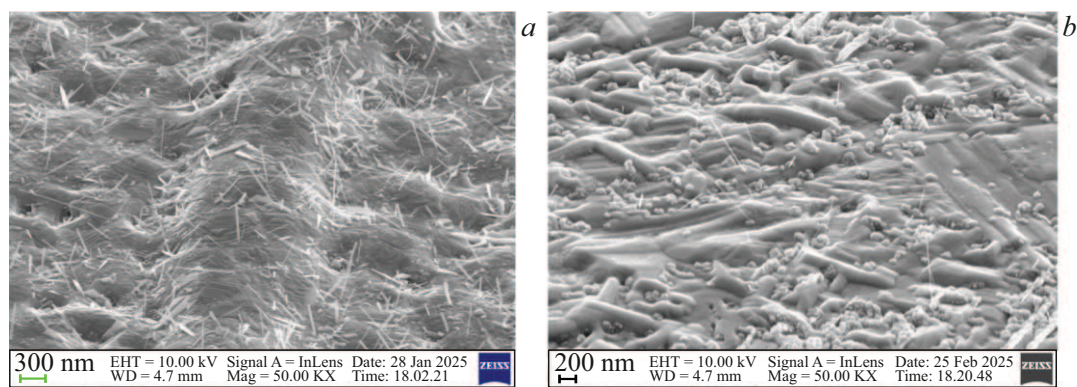


Рис. 6. Снимок поверхности Та-катода: а — область с высокой концентрацией НК, б — область с низкой концентрации НК.

Таблица 2. Состав областей с разной концентрацией НК

Концентрация НК	C, at.%	O, at.%	Pd, at.%	Ba, at.%	Ta, a.%
Высокая	50 ± 3	11 ± 2	36 ± 4	0.5 ± 0.3	2.3 ± 0.9
Низкая	50 ± 2	9 ± 2	38 ± 3	0.4 ± 0.1	2.1 ± 0.7

шайбы в процессе термоактивации покрывается слоем Pd, а рост вискеро́в происходит из этого слоя.

Заключение

При исследованииборок КПУ были обнаружены НК двух характерных размеров: толщиной 10–30 nm и 100–160 nm. Измеренные длины НК лежат в диапазоне 0.3–1 μm . При этом, как видно на снимках СЭМ, НК имеют огранку, что свидетельствует об их кристалличности.

По измеренным данным химический состав НК составляет Pd (58 ± 6) at.%, Ва (2 ± 1) at.%, Та (40 ± 6) at.%. При этом в некоторых образцах наблюдается значительное содержание углерода и кислорода. Что важно, состав различных НК по результатам измерения РМА практически одинаков, что свидетельствует о том, что НК могут состоять в одной и той же фазе.

Химический состав областей, где наблюдается повышенная концентрация НК, и областей, где их практически нет, идентичен. Предел обнаружения энергодисперсионного рентгеновского спектрометра не позволяет обнаружить элементы, которые могли бы быть катализатором роста НК в области с их повышенной концентрацией.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Smetana. IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf., **30**, 11 (2007). DOI: 10.1109/TEPM.2006.890645
- [2] J.B. LeBret, M.G. Norton. J. Mater. Res., **18**, 585 (2003). DOI: 10.1557/JMR.2003.0076
- [3] A. Kosinova, D. Wang, P. Schaaf, A. Sharma, L. Klinger, E. Rabkin. Acta Mater., **149**, 154 (2018). DOI: 10.1016/j.actamat.2018.02.041
- [4] H.G. Smith, R.E. Rundle. J. Appl. Phys., **29**, 679 (1958). DOI: 10.1063/1.1723249
- [5] W.C. Ellis, D.F. Gibbons, R.C. Treuting in: *Growth Perfect Cryst.*, ed. R.H. Doremus, B.W. Roberts, D. Turnbull (NY, John Wiley & Sons, 1958), p. 102–120.
- [6] K. Nakai, T. Sakamoto, S. Kobayashi, M. Takamizawa, K. Murakami, M. Hino. J. Phys. Conf. Ser., **165** (2009). DOI: 10.1088/1742-6596/165/1/012089
- [7] V.G. Karpov. Phys. Rev. Appl., **1**, 1 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.1.044001
- [8] E.I. Givargizov, A.N. Stepanova, L.N. Obolenskaya, E.S. Mashkova, V.A. Molchanov, G. Me, I.W. Rangelow. Ultramicroscopy, **82**, 57 (2000). DOI: 10.1016/S0304-3991(99)00141-2
- [9] M.E. Givargizov, A.N. Stepanova, L.N. Obolenskaya, E.I. Givargizo. AIP Conf. Proc., **696**, 247 (2003). DOI: 10.1063/1.1639703
- [10] Н.Е. Леденцова, Д.В. Бычков, И.П. Ли, А.В. Шуманов, В.И. Капустин. Тез. докл. XXIX Научно-техническая конференция „Вакуумная Наука и Техника“ (Крым, Судак, Россия, 2022), с. 299–308.
- [11] И.П. Ли, С.В. Комиссарчик, Н.Д. Лифанов. Магнетрон с безнакальным запуском со специальным активированием автоэлектронных катодов (Патент на изобретение № 2494489, 2012)
- [12] Д.В. Бычков, В.С. Петров, И.П. Ли. Известия вузов. Электроника, **30**, 7 (2025). DOI: 10.24151/1561-5405-2025-30-1-7-15
- [13] В.И. Капустин, И.П. Ли, С.О. Москаленко, А.В. Шуманов. ЖТФ, **90** (2), 330 (2020). DOI: 10.21883/jtf.2020.02.48829.195-19
- [14] Н.В. Плешивцев. Катодное распыление (Атомиздат, М., 1968)
- [15] H.C. Chen, R.D. Lui, C.L. Ren, H.F. Huang, J.J. Li, G.H. Lei, W.D. Xue, W.X. Wang, Q. Huang, D.H. Li, L. Yan, X.T. Zhou. J. Appl. Phys., **120**, 125303 (2016). DOI: 10.1063/1.4963344
- [16] Л. Майссел, Р. Глэнг. Технология тонких пленок (Сов. радио, М., 1977), т. 1, 664 с. [Пер. с англ.: L. Maissel, R. Glang. Handbook of Thin Film Technology. (McGraw hill book Company, NY., 1970), v. 1.]
- [17] H. Okamoto. J. Phase Equilibria Diffus., **28**, 233(2010). DOI: 10.1007/s11669-007-9041-x
- [18] Е.И. Гиваргизов. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара (Наука, М., 1977)