

Научная статья

УДК 539.216.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18410>

ТРАНСФОРМАЦИЯ МОРФОЛОГИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИКЕЛЯ И ЦИРКОНИЯ НА ЕСТЕСТВЕННО ОКИСЛЕННЫХ КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ ПРИ ОТЖИГЕ В ВАКУУМЕ

В. Т. А. Нгуен, П. Г. Габдуллин, А. В. Архипов 

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

 arkhipov@rphf.spbstu.ru

Аннотация. В статье представлена технология получения островковых пленок никеля на поверхности окисленных кремниевых подложек методом термического деветтинга (агломерации) сплошных покрытий. Вначале сплошные пленки никеля толщиной 5 нм наносились на подложки методом магнетронного напыления. Затем, без выноса на атмосферу, производился отжиг покрытий в вакууме при температуре 450°C продолжительностью от 15 мин до 3 ч. Результатом этого было формирование на подложке изолированных металлических островков с поперечными размерами от единиц до десятков нанометров, в зависимости от времени отжига. Были определены электрические и термоэлектрические характеристики полученных островковых пленок. Попытки приготовления островковых пленок циркония с использованием той же методики не принесли успеха, так как технически реализуемая температура отжига 650°C оказалась недостаточной для агломерации покрытий из этого материала.

Ключевые слова: тонкая пленка, островковая пленка, наночастица, деветтинг пленок, никель, термоэлектрический коэффициент

Для цитирования: Нгуен В. Т. А., Габдуллин П. Г., Архипов А. В. Трансформация морфологии тонких пленок никеля и циркония на естественно окисленных кремниевых подложках при отжиге в вакууме // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 4. С. 139–150. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18410>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18410>

MODIFICATION OF MORPHOLOGY OF THIN NICKEL AND ZIRCONIUM FILMS ON NATURALLY OXIDIZED SILICON SUBSTRATES BY ANNEALING IN VACUUM

В. Т. А. Nguyen, П. Г. Габдуллин, А. В. Архипов 

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 arkhipov@rphf.spbstu.ru

Abstract. The article presents a technique for fabricating nickel island films on oxidized silicon substrates by thermal dewetting of continuous coatings. First, continuous nickel films 5 nm thick were deposited by magnetron sputtering. Then, without exposure to the atmosphere, the coatings were annealed in a vacuum at 450°C for 15–180 min. As a result, the formation of isolated metal islands was on the substrate with transverse dimensions from units to tens of nanometers, depending on the annealing time. The electrical and thermoelectrical characteristics of the produced island films were determined. Attempts to prepare zirconium island films using the same technique were unsuccessful as the technically available annealing temperature

of 650°C proved insufficient for dewetting of coatings made of this material.

Keywords: thin film, island film, nanoparticle, film dewetting, Ni, Zr, thermoelectrical coefficient

For citation: Nguyen V. T. A., Gabdullin P. G., Arkhipov A. V., Modification of morphology of thin nickel and zirconium films on naturally oxidized silicon substrates by annealing in vacuum, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (4) (2025) 139–150. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18410>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Металлические наночастицы и кластеры находят все новые области применения в технике и медицине, благодаря своим уникальным свойствам [1 – 4]. Некоторые из их полезных качеств достаточно хорошо известны: например, способность усиливать локальные поля оптических частот за счет локального плазмонного резонанса. Другие особенности наночастиц изучены в меньшей степени. Среди них можно выделить, в частности, способность к низковольтной эмиссии электронов [5 – 10], а также возможность достижения высокой эффективности термоэлектрического преобразования [11–14].

Островковую пленку проводящего материала на плохопроводящей подложке можно классифицировать как неупорядоченный массив наночастиц, обладающих многими свойствами, присущими наночастицам. Это подтверждают результаты экспериментов по изучению эмиссионных свойств островковых пленок углерода и металлов на кремниевых подложках, проводившихся ранее в Санкт-Петербургском политехническом университете и продемонстрировавших способность таких пленок к низковольтной эмиссии электронов [15 – 18]. Однако пленки металлов (Mo, Zr, Ni), которые использовались в работах [17, 18], изначально изготавливались сплошными и приобретали островковую структуру уже в ходе эмиссионных испытаний под действием факторов, связанных с отбором эмиссионного тока. Это затрудняет интерпретацию результатов проведенных исследований.

Задача данной работы состояла в том, чтобы отработать технологию изготовления образцов островковых пленок варьируемой морфологии для продолжения опытов. В качестве материалов покрытий были выбраны цирконий и никель, пленки которых в работах [17, 18] показали способность эмитировать электроны. Преимущество циркония и никеля перед молибденом, пленки которого показали наилучшую эмиссионную способность, состоит в более низкой температуре плавления, что упрощает технологию их термической обработки. При этом для сохранения возможности сопоставления с данными работ [15 – 18] необходимо было использовать те же подложки: кремниевые пластины марки КДБ10 с сохраненным естественным оксидным слоем.

Для получения островковых пленок выбранных металлов планировалось использовать явление агломерации сплошных тонких пленок металлов, нанесенных на несмачиваемые ими диэлектрические подложки, с формированием наноразмерных капель. В англоязычной литературе для такого процесса обычно употребляется термин “solid-state dewetting” [4, 19 – 24], поскольку для его осуществления не требуется плавления материала покрытия. Он протекает под действием сил поверхностного натяжения и может вызываться, в частности, нагревом таких пленок в вакууме или в инертной (либо восстановительной) атмосфере, причем необходимая для этого температура обычно существенно (на сотни градусов) ниже температуры плавления соответствующего металла.

Помимо исследования эмиссионных свойств островковых покрытий (эта часть работы выходит за рамки предмета данной статьи), планировалось проведение начальных опытов по изучению термоэлектрических характеристик контактов металлических островков с подложкой [25]. Цель такого исследования состояла как в проверке справедливости термоэлектрической модели облегченной эмиссии электронов островковыми пленками (предложена в публикациях [18, 26]), так и в изучении возможности их использования в составе эффективных термоэлектрических преобразователей [27].



Использованные методы и материалы

Метод термической агломерации для изготовления островковых покрытий предполагает последовательное проведение двух операций:

нанесение на поверхность подложки сплошной пленки;
преобразование этой пленки в островковое покрытие путем отжига.

Обе операции проводились нами в ростовой камере НЕХ (производство компании Mantis Deposition, Великобритания) без переноса образцов через атмосферу, что позволяло избежать окисления сплошных тонких пленок до их отжига.

Сплошные пленки никеля или циркония толщиной 5 нм наносились на подложки методом магнетронного распыления мишеней из никель-ванадиевого сплава NiV или чистого циркония Zr, соответственно. Для этого использовался двухдюймовый магнетрон, входящий в состав установки НЕХ. Напряжение и ток разряда были 450 В и 250 мА; процесс проводился при давлении буферного газа (аргона) 10^{-3} мбар и комнатной температуре подложек. Скорость роста пленок при этом составляла 0,3 Å/с. Ее определяли методом кварцевых микровесов и дополнительно контролировали по профилограммам механически поврежденных пробных образцов покрытий.

Использование мишней из немагнитного сплава NiV (при концентрации ванадия 7 вес.%) для нанесения никелевых пленок диктовалось низкой эффективностью магнетронного распыления в отношении ферромагнетиков. Для оценки содержания ванадия в нанесенных покрытиях были проведены специальные измерения методом рентгеноспектрального микроанализа с использованием сканирующего электронного микроскопа. Ввиду низкого значения коэффициента распыления ванадия, его содержание в пленках оказалось незначительным — ниже порога чувствительности метода, который для столь тонких пленок можно оценить как 0,5 — 1,0 вес. %. Такие пленки мы далее называем никелевыми, хотя и понимаем, что они не чисто никелевые, а в них имеется небольшая (сложно определяемая и, вероятно, неоднородно распределенная) примесь ванадия.

Образцы покрытий формировались на подложках размером приблизительно 10×10 мм, вырезанных из пластин кремния марки КДБ10 с ориентацией поверхности (100). Естественный оксидный слой с поверхности подложек не удаляли, органические загрязнения снимали путем механической и ультразвуковой обработки в ацетоне с дальнейшей промывкой изопропиловым спиртом и дистиллированной водой.

Отжиг нанесенных никелевых покрытий в вакууме проводили при температуре 450°C , покрытий из циркония — при $550 - 650^{\circ}\text{C}$. Время отжига варьировали от 15 до 180 мин. При этом откачка ростовой камеры позволяла ограничивать давление остаточных газов на уровне не хуже 10^{-5} Торр.

Топография приготовленных образцов изучалась при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ) NanoDST (Pacific Nanotechnology, США). Измерения проводили на атмосфере в полуконтактном режиме с зондами типа NSG10 (НТ-МДТ, Россия). Этот же микроскоп использовался при проведении термоэлектрических измерений. В данном случае на координатном столике микроскопа устанавливали элемент Пельтье, который позволял регулировать температуру образца в диапазоне 0 — 80°C . При этом образец был электрически изолирован от координатного столика, и его потенциал по отношению к зонду микроскопа (электрически соединенному с корпусом) измерялся вольтметром В7-72 (МНИПИ, Беларусь). Зонд мог приводиться в контакт с образцом при выключенной либо включенной обратной связи АСМ; во втором случае микроскоп работал в контактной mode (без вибраций). Для термоэлектрических измерений использовались зонды типа DEP01 (НТ-МДТ, Россия) с «мягким» кантителевером (2,8 Н/м) и иглой, выполненной из высокопроводящего алмаза, легированного бором. Такой зонд был выбран по результатам предварительных испытаний с зондами нескольких типов.

Электрические характеристики пленок измерялись при помощи характеристографа Л2-100ТЕКО (Тестприбор, Россия). Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) проводили как «вдоль», так и «поперек» покрытия. При измерении сопротивления пленки зонды устанавливали на расстоянии приблизительно 2 мм друг от друга. При измерении сопротивления контакта пленки с подложкой один из зондов располагали на выбранном участке пленки, а второй — напротив первого, с другой стороны подложки.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Пленки циркония. Результат отжига циркониевых пленок в вакууме представлен на рис. 1 изображениями топографии поверхности образцов до и после отжига различной продолжительности. Можно констатировать, что в этих условиях на них нет очевидных признаков термической агломерации и покрытие остается достаточно однородным. Полная высота рельефа, как и до отжига, лишь немногим превышает 2 нм.

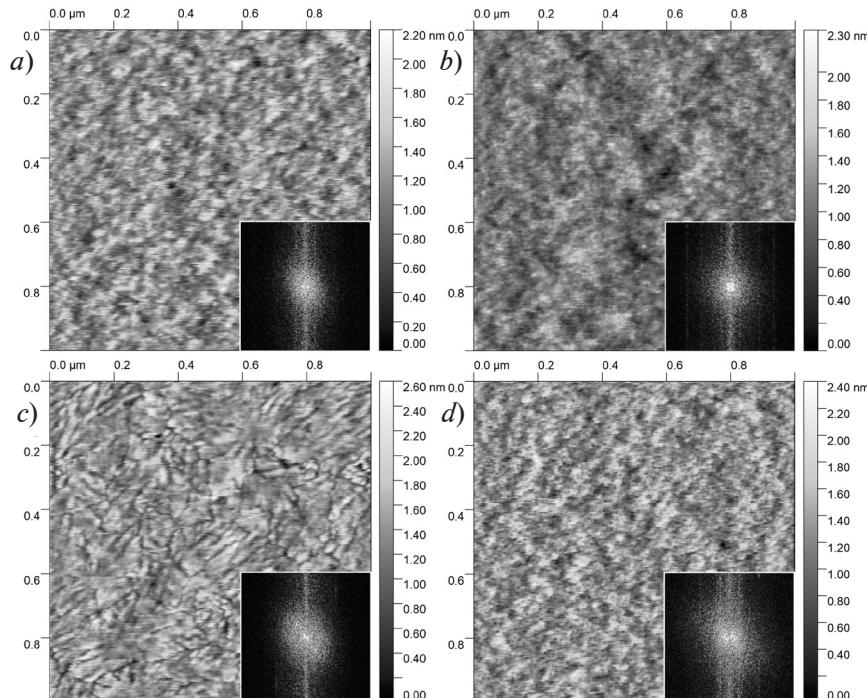


Рис. 1. ACM-изображения топографии поверхности пленок циркония толщиной 5 нм:
 a – в свежеприготовленном состоянии; b – после отжига при 550°C (60 мин);
 c – при 650°C (60 мин); d – при 650°C (120 мин).
 На вставках: двумерные Фурье-спектры ACM-изображений

К некоторому исключению можно отнести изображение на рис. 1, c; оно приведено для покрытия, которое выдерживали при максимальной (доступной нам) температуре 650°C в течение одного часа. На нем различимы удлиненные кристаллиты, появление которых можно считать признаком начала агломерации покрытия. Мы пришли к такому выводу, учитывая результаты работы [28], где под действием факторов, связанных с отбором эмиссионного тока, наблюдалось формирование именно нитевидных структур при агломерации циркониевых пленок. Эти структуры по форме определенно отличались от округлых наноостровков, получающихся при агломерации пленок молибдена, вызванной теми же причинами.

Однако следует признать, что аналогичных признаков начала процесса преобразования морфологии нельзя визуально наблюдать на рис. 1, d, полученном для покрытия, подвергшегося термообработке при той же самой температуре (650°C) в течение вдвое большего времени (2 ч). Это может свидетельствовать о значительном разбросе свойств поверхности использованных, естественно окисленных подложек, оказывающем влияние на стабильность пленок. Наличие подобного разброса отмечалось ранее по результатам экспериментов с пленками металлов [17, 18] и углерода [15, 16].

Для выявления более тонких особенностей ACM-изображений, не определяемых визуально, был предпринят их двумерный Фурье-анализ путем применения к ним функции 2D FFT пакета Gwyddion 2.62. Перед этим исходные данные подвергались одинаковой цифровой обработке, направленной на снижение роли измерительных артефактов, таких как смещение строк из-за нестабильности состояния зонда. Полученные Фурье-спектры топографии пленок приведены на вставках на рис. 1. Можно констатировать их некоторое



уширение с повышением температуры и времени обжига, отражающее увеличение «зернистости» изображений с пространственным масштабом порядка 10 нм. Такое уширение может свидетельствовать о перестройкеnanoструктуры пленок, которая начинается при отжиге.

Пленки никеля. Для преобразования структуры сплошного никелевого покрытия толщиной 5 нм к островковой, оказалось достаточным его отжига при температуре 450°C. На рис. 2, *a* приведено типичное АСМ-изображение поверхности сплошной никелевой пленки после магнетронного напыления. Рис. 2, *b* – *d* представляют топографию образцов после их прогрева в вакууме продолжительностью 30, 60 и 120 мин. Очевидно, что в результате прогрева происходит агломерация пленки с формированием округлых островков.

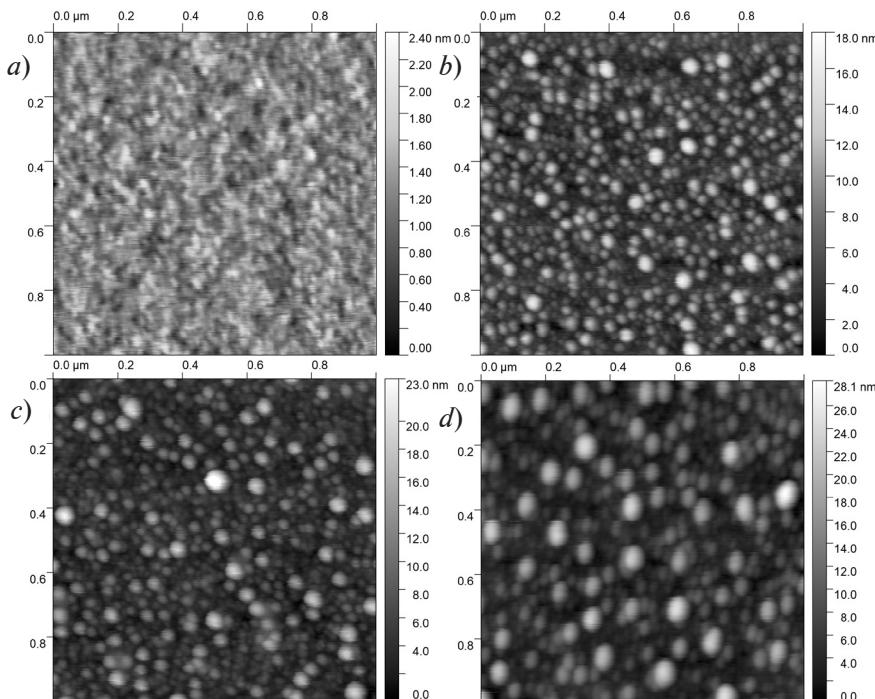


Рис. 2. АСМ-изображения топографии пленок никеля начальной толщины 5 нм:
a – свежеприготовленные пленки; *b* – *d* – после отжига в вакууме
при 450°C в течение 30 мин (*b*), 60 мин (*c*) и 120 мин (*d*)

Результаты статистической обработки серии АСМ-изображений топографии пленок приведены на рис. 3. Рис. 3, *a* представляет зависимости от времени отжига для стандартизованных «параметров шероховатости» (roughness parameters) поверхности пленок, вычисленных средствами пакета Gwyddion как для максимальных, так и медианных значений высоты выступающих островков. График максимальной высоты пиков (т.е. высоты самых крупных островков, отсчитываемой от медианной плоскости) показывает монотонный рост этого параметра с увеличением времени отжига; его наибольшее значение близко к 20 нм. При этом медианное значение высоты остается в диапазоне от 5 до 8 нм, что приблизительно соответствует исходной толщине покрытия.

На рис. 3, *b* и *d* представлены гистограммы значений высоты отдельных островков, а на рис. 3, *c* и *e* – гистограммы их распределения по латеральным размерам. Эти данные относятся к пленкам, подвергнутым прогреву в течение 30 и 120 мин. Большему времени отжига соответствуют более широкие распределения этих параметров, а также приблизительно 50%-й рост максимальных латеральных размеров островков по мере отжига покрытий, что типично для термической агломерации [19]. После двухчасового отжига радиус крупных островков достигал 35 – 40 нм при высоте 20 – 25 нм (см. рис. 3 *d*, *e*).

На рис. 4 представлены результаты измерения поверхности проводимости покрытий. Они демонстрируют качественное изменение характера их проводимости после отжига. Пленки, не подвергавшиеся термической обработке, несмотря на малую среднюю

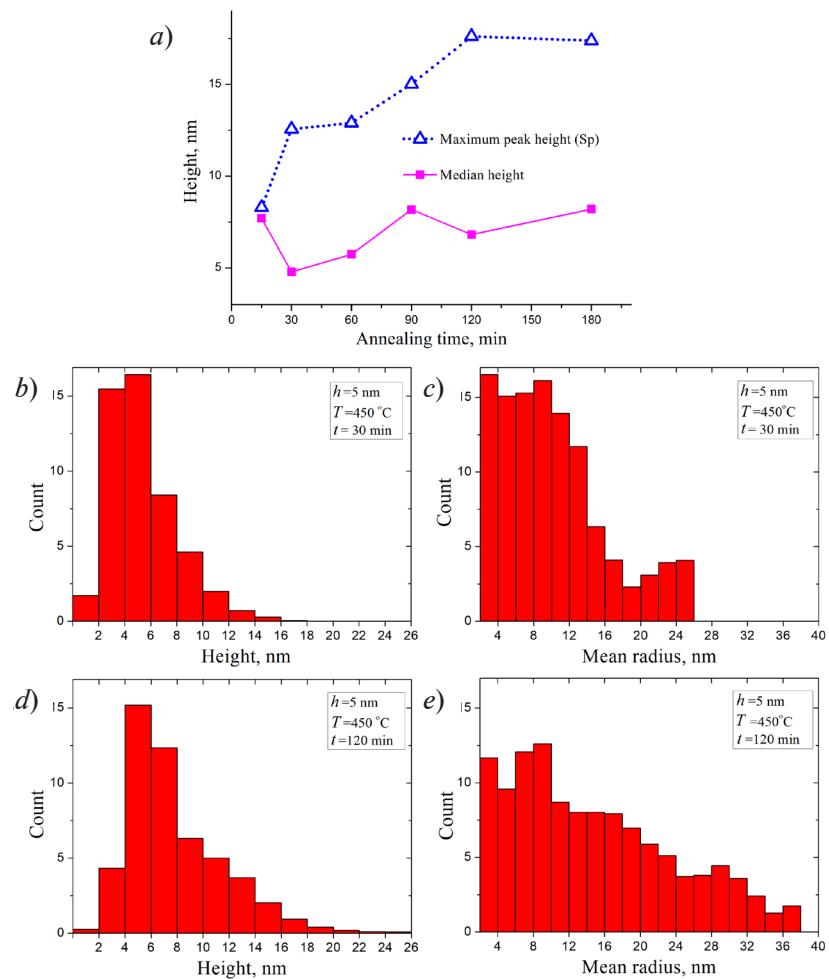


Рис. 3. Результаты обработки серии ACM-изображений топографии пленок Ni первоначальной толщины 5 нм: *a* – зависимости параметров шероховатости поверхности образцов от времени их отжига при 450°C (символы ■, Δ – медианные и максимальные значения высоты); *b, d* – распределения островков по высоте, *c, e* – по радиусу, для покрытий после 30 мин (*b, c*) и 2 ч (*d, e*) отжига

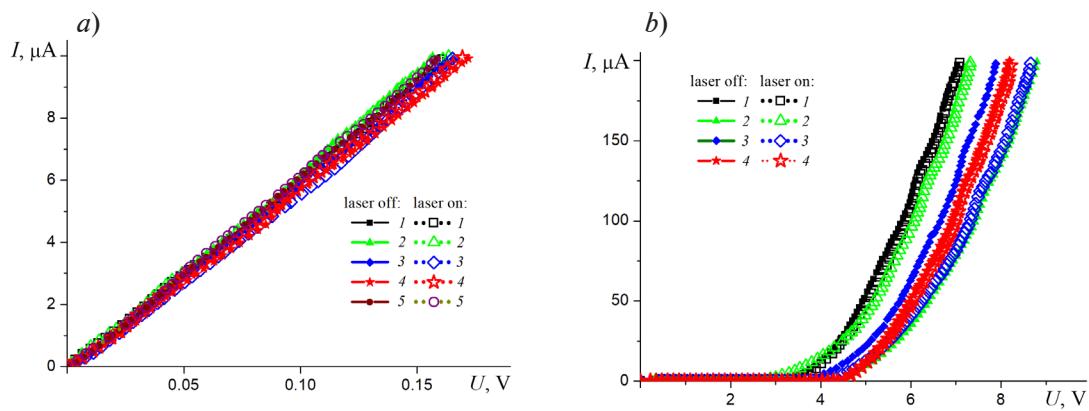


Рис. 4. Результаты измерения проводимости вдоль никелевых покрытий: *a* – не отожженного, *b* – отожженного в вакууме при 450°C в течение 60 мин. Кривые под разными номерами соответствуют разным парам точек контакта на одном образце

толщину, являются сплошными — об этом свидетельствует омический (линейный) вид вольтамперной характеристики и высокая электропроводность при малом разбросе электрических параметров (рис. 4, a). Вольтамперные характеристики отожженного покрытия (рис. 4, b) нелинейны и существенно меняются при перемещении контактов вдоль поверхности, а для получения заданной величины тока здесь требуются существенно большие напряжения. Это естественно объясняется прерыванием сплошных токовых путей по металлической пленке при ее разбиении на островки. При этом пленки ни до отжига, ни после него не обладали свойством фотопроводимости: освещение их красным светом полупроводникового лазера не приводило к изменению ВАХ (пометки “laser on/off” в легендах графиков рис. 4 означают включенный/выключенный лазер).

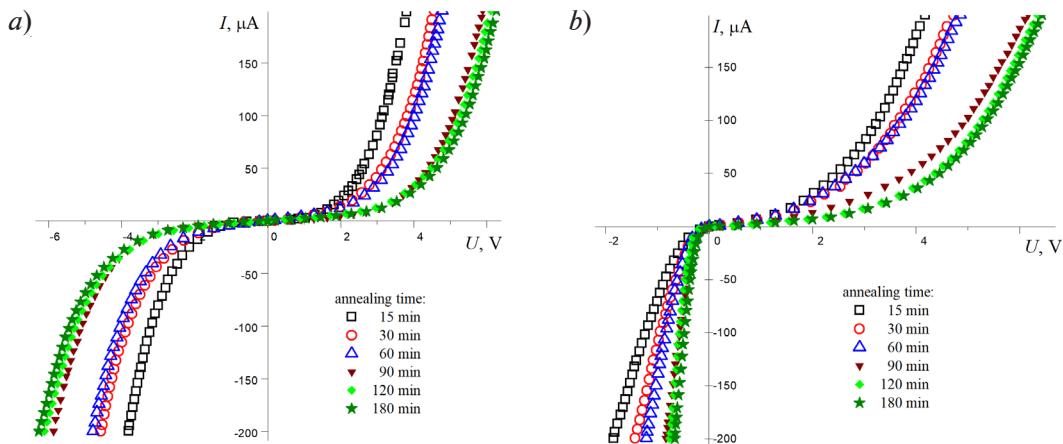


Рис. 5. ВАХ «вдоль поверхности» (a) и «сквозь подложку» (b) для образцов пленок никеля толщиной 5 нм после отжига разной продолжительности при 450°C

Рис. 5, a иллюстрирует изменение характеристик проводимости вдоль поверхности образцов никелевых покрытий с увеличением времени отжига. Примечательно, что ВАХ нелинейны уже при минимальном времени отжига (15 мин), что очевидно отражает уже совершившуюся к этому моменту агломерацию пленок. Нелинейный характер ВАХ островковых пленок можно объяснить как проводимостью вдоль пленки по механизму туннелирования носителей заряда между металлическими островками, так и проводимостью через подложку. При втором варианте носителям приходится дважды преодолевать интерфейс между подложкой и покрытием, частью которого является сохраненный слой диоксида кремния. Совокупность косвенных признаков говорит скорее в пользу этого (второго) предположения. Один из таких признаков — это гладкий и воспроизводимый вид ВАХ на рис. 4, b и 5, a: протекание туннельного тока по островковым пленкам обычно сопровождается их «электроформовкой» [29], которая проявляется в виде нестабильности и гистерезиса токовых зависимостей. Другим признаком можно считать относительно медленное и монотонное (с поправкой на отмеченный выше разброс свойств подложек) изменение вида ВАХ при увеличении времени отжига — в случае туннельной проводимости можно было бы ожидать более резкого изменения электропроводности вдоль поверхности при наблюдаемом расширении зазоров между островками.

Еще одним аргументом в пользу протекания тока через подложку при измерении ВАХ «вдоль поверхности» может служить вид токовых характеристик, измерявшихся в направлении «сквозь подложку», между одной из точек покрытия и омическим контактом на противоположной стороне кремниевой пластины. Такие ВАХ приведены на рис. 5, b. Их форма асимметрична, и степень асимметрии растет с увеличением времени отжига. При этом одна из ветвей (правая) каждой из приведенных зависимостей близка по форме и количественным параметрам к симметричным ветвям ВАХ «вдоль покрытия» для соответствующего образца (см. рис. 5, a). Другая ветвь (левая) характеризуется большим током. Такие закономерности можно легко трактовать, если считать, что островки отожженных покрытий отделены от подложки контактами Шоттки, ВАХ которых близки к приведенным на рис. 5, b. При измерениях «вдоль поверхности» (см. рис. 5, a), на пути тока

окажутся два таких контакта, включенных встречно друг другу, и результирующая окажется симметричной – ее ветви будут соответствовать обратной ветви ВАХ контакта Шоттки. При этом зависимость формы ВАХ от длительности отжига покрытия может определяться уменьшением эффективной площади контакта по мере изоляции островков покрытия друг от друга.

Образцы покрытий и подложек затем использовались в экспериментах по определению термоэлектрических свойств их наноконтактов с зондом атомно-силового микроскопа. Измеренные значения термоэлектрического коэффициента S для наноконтакта зонда с неотожженной пленкой и с подложкой без металлического покрытия были низкими (не превышали приблизительно 4 мкВ/К). Значения коэффициента Зеебека такого порядка типичны для металлов, хотя острье используемого АСМ-зонда было изготовлено из полупроводящего легированного алмаза. Значения же коэффициента Зеебека для полупроводников, как правило, на 1 – 2 порядка выше. Этот результат подтверждает известную из литературы (см., например, статью [30]) общую закономерность: подавление термоэлектрического эффекта в микро- и наноконтактах.

Вместе с тем, опыты с островковой пленкой никеля, полученной отжигом сплошной пленки толщиной 5 нм при 450°C в течение 60 мин (см. рис. 1, *c*), принесли качественно иной результат. При контакте такого образца, нагретого до 65°C, с зондом, имевшим температуру окружающей среды 20°C, регистрировалась термоэлектрическая разность потенциалов величиной до 3,4 мВ, что соответствует значению коэффициента Зеебека $S \approx 75$ мкВ/К. Это превосходит типичные значения S для металлов и по порядку величины соответствует типичным значениям для легированных полупроводников. Таким образом, в данном случае существенного подавления термоэлектрического эффекта не происходило. Это может быть связано с размерными эффектами в наноостровках никеля либо с особенностями интерфейса между островком и подложкой. Этот интерфейс обладает относительно низкой электропроводностью (ввиду наличия слоя оксида и барьера Шоттки) и при этом достаточно высоким качеством акустического контакта. Поперечный размер интерфейса составляет около 20 нм, что существенно больше размера контакта зонда АСМ с плоской пленкой или подложкой. Все это способствует эффективному преобразованию потока тепла из электронной (в островке) в фононную (в подложке) форму или обратно. Принципиальная возможность осуществления эффективного термоэлектрического преобразования в таких условиях анализировалась в недавней теоретической работе [27].

Заключение

В результате проведенного исследования, нацеленного на разработку технологии получения островковых пленок никеля на окисленных кремниевых подложках марки КДБ10, такая технология была отработана и проведена методом термической агломерации. Для достижения поставленной цели оказалось достаточным прогреть сплошные покрытия толщиной 5 нм в вакууме при температуре 450°C. Параметры технологического процесса, обнаруженные нами в литературных источниках, нельзя было использовать на практике без нашей дополнительной проверки, поскольку известно, что температура агломерации тонких пленок зависит не только от материала покрытия, но и от его толщины [24], наличия примесей [31], материала подложки [32]. По совокупности этих показателей, наиболее близкой к условиям наших экспериментов с никелем представляется работа [3], где изучалась агломерация при отжиге изначально сплошных пленок никеля толщиной 3,0 нм, нанесенных на пластины Si (100) со слоем оксида толщиной 4,5 нм. Авторы работы указывали, что разрушение сплошной структуры пленки (появление отверстий) происходило уже при температуре отжига 280°C, однако для формирования изолированных островков требовался нагрев до 450°C, а это вполне согласуется с результатами проведенных нами экспериментов.

Поперечный размер (радиус) никелевых островков, полученных в наших экспериментах, составлял от нескольких единиц до 35 – 40 нм. Тестирование электрических характеристик пленок показало, что островки электрически слабо связаны друг с другом – электрическая проводимость вдоль покрытия в основном определяется токами, протекающими через подложку, интерфейсы между островками и подложкой.



Как морфологические, так и электрические параметры покрытий можно было варьировать через изменение времени отжига. При тестировании аналогичной методики в отношении пленок циркония той же средней толщины (5 нм) оказалось, что нагрева до 650°C недостаточно для преобразования их структуры к островковой.

Первые эксперименты по определению термоэлектрических параметров наностровковых пленок никеля с использованием атомно-силового микроскопа показали целесообразность дальнейшего изучения таких структур для нахождения способов достижения повышенной эффективности термоэлектрического преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Daniel M.-C., Astruc D. Gold nanoparticles: Assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology // Chemical Reviews. 2004. Vol. 104. No. 1. Pp. 293–346.
2. Yeh Y.-C., Creran B., Rotello V. M. Gold nanoparticles: preparation, properties, and applications in bionanotechnology // Nanoscale. 2012. Vol. 4. No. 6. Pp. 1871–1880.
3. Dufourcq J., Mur P., Gordon M. J., Minoret S., Coppard R., Baron T. Metallic nano-crystals for flash memories // Materials Science & Engineering C. 2007. Vol. 27. No. 5–8. Pp. 1496–1499.
4. Kitsyuk E. P., Vasilevskaya Yu. O., Volovlikova O. V., Eganova E. M., Dudin A. A. Catalytic particles formation from thin nickel films for the synthesis of multi-walled carbon nanotubes // Carbon. 2024. Vol. 229. No. 11. P. 119509.
5. Filip V., Filip L. D., Wong H. Review on peculiar issues of field emission in vacuum nanoelectronic devices // Solid State Electronics. 2017. Vol. 138. December. Pp. 3–15.
6. Filip L. D., Palumbo M., Carey J. D., Silva S. R. P. Two-step electron tunneling from confined electronic states in a nanoparticle // Physical Review B. 2009. Vol. 79. No. 24. P. 245429.
7. Gloskovskii A., Valdaitsev D. A., Cinchetti M., et al. Electron emission from films of Ag and Au nanoparticles excited by a femtosecond pump-probe laser // Physical Review B. 2008. Vol. 77. No. 19. P. 195427.
8. Fursey G., Konorov P., Pavlov B., Yafyasov A. Dimensional quantization and the resonance concept of the low-threshold field emission // Electronics. 2015. Vol. 4. No. 4. Pp. 1101–1108.
9. Давидович М. В., Яфаров Р. К. Импульсные и статические автоэмиссионные ВАХ углеродных нанокластерных структур: эксперимент и его интерпретация // Журнал технической физики. 2019. Т. 89. № 8. С. 1282–1293.
10. Kleshch V. I., Porshyn V., Lützenkirchen-Hecht D., Obraztsov A. N. Coulomb blockade and quantum confinement in field electron emission from heterostructured nanotips // Physical Review B. 2020. Vol. 102. No. 23. P. 235437.
11. Bergfield J. P., Solis M. A., Stafford C. A. Giant thermoelectric effect from transmission supernodes // ACS (American Chemical Society) Nano. 2010. Vol. 4. No. 9. Pp. 5314–5320.
12. Dubi Y., Di Ventra M. Colloquium: Heat flow and thermoelectricity in atomic and molecular junctions // Reviews of Modern Physics. 2011. Vol. 83. No. 1. Pp. 131–155.
13. Karlström O., Linke H., Karlström G., Wacker A. Increasing thermoelectric performance using coherent transport // Physical Review B. 2011. Vol. 84. No. 11. P. 113415.
14. Sadeghi H. Quantum and phonon interference-enhanced molecular-scale thermoelectricity // The Journal of Physical Chemistry C. 2019. Vol. 123. No. 20. Pp. 12556–12562.
15. Andronov A., Budylinina E., Shkitun P., Gabdullin P., Gnuchev N., Kvashenkina O., Arkhipov A. Characterization of thin carbon films capable of low-field electron emission // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2018. Vol. 36. No. 2. P. 02C108.
16. Gabdullin P., Zhurkin A., Osipov V., Besedina N., Kvashenkina O., Arkhipov A. Thin carbon films: Correlation between morphology and field-emission capability // Diamond & Related Materials. 2020. Vol. 105. May. P. 107805.
17. Бизяев И. С., Габдуллин П. Г., Гнучев Н. М., Архипов А. В. Низкотороговая полевая эмиссия электронов тонкими пленками металлов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 1. С. 111–127.

18. **Bizyaev I., Gabdullin P., Chumak M., Babyuk V., Davydov S., Osipov V., Kuznetsov A., Kvashenkina O., Arkhipov A.** Low-field electron emission capability of thin films on flat silicon substrates: Experiments with Mo and general model for refractory metals and carbon // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11. No. 12. P. 3350.
19. **Thompson C. V.** Solid-state dewetting of thin films // *Annual Review of Materials Research*. 2012. Vol. 42. No. 1. Pp. 399–434.
20. **Ruffino F., Grimaldi G.** Controlled dewetting as fabrication and patterning strategy for metal nanostructures // *Physica Status Solidi A*. 2015. Vol. 212. No. 8. Pp. 1662–1684.
21. **Niekiel F., Schweizer P., Kraschewski S. M., Butz B., Spiecker E.** The process of solid-state dewetting of Au thin films studied by *in situ* scanning transmission electron microscopy // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 90. 15 May. Pp. 118–132.
22. **Kovalenko O., Szaby S., Klinger L., Rabkin E.** Solid state dewetting of polycrystalline Mo film on sapphire // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 139. 15 October. Pp. 51–61.
23. **Weil K. S., Mast E. S., Sprenkle V. L.** Agglomeration behavior of solid nickel on polycrystalline barium titanate // *Materials Letters*. 2007. Vol. 61. No. 28. Pp. 4993–4996.
24. **Alburquerque D., Del Canto M., Arenas C., Tejo F., Pereira A., Escrig J.** Dewetting of Ni thin films obtained by atomic layer deposition due to the thermal reduction process: Variation of the thicknesses // *Thin Solid Films*. 2017. Vol. 638. 30 September. Pp. 114–118.
25. **Трофимович К. Р., Габдуллин П. Г., Архипов А. В.** Экспериментальная установка для исследования особенностей термоэлектрического эффекта вnanoструктурах // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2023. Т. 16. № 4. С. 101–117.
26. **Arkhipov A. V., Eidelman E. D., Zhurkin A. M., Osipov V. S., Gabdullin P. G.** Low-field electron emission from carbon cluster films: Combined thermoelectric/hot-electron model of the phenomenon // *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2020. Vol. 28. No. 4. Pp. 286–294.
27. **Arkhipov A., Trofimovich K., Arkhipov N., Gabdullin P.** Phonon drag contribution to thermopower for a heated metal nanoisland on a semiconductor substrate // *Nanomaterials*. 2024. Vol. 14. No. 20. P. 1684.
28. **Бизяев И. С., Карасев П. А., Карабешкин К. В., Габдуллин П. Г., Архипов А. В.** Трансформация структуры тонких металлических пленок при активировании их способности к низковольтной эмиссии электронов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2024. Т. 17. № 2. С. 80–93.
29. **Fedorovich R. D., Naumovets A. G., Tomchuk P. M.** Electron and light emission from island metal films and generation of hot electrons in nanoparticles // *Physics Reports*. 2000. Vol. 328. No. 2–3. Pp. 73–179.
30. **Weber L., Lehr M., Gmelin E.** Reduction of the thermopower in semiconducting point contacts // *Physical Review B*. 1992. Vol. 46. No. 15. Pp. 9511–9514.
31. **Barda H., Rabkin E.** Improving the thermal stability of nickel thin films on sapphire by a minor alloying addition of gold // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 484. 1 August. Pp. 1070–1079.
32. **Nsimama P. D., Herz A., Wang D., Schaaf P.** Influence of the substrate on the morphological evolution of gold thin films during solid-state dewetting // *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 388. Pt. A. Pp. 475–482.

REFERENCES

1. **Daniel M.-C., Astruc D.** Gold nanoparticles: Assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology, *Chem. Rev.* 104 (1) (2004) 293–346.
2. **Yeh Y.-C., Creran B., Rotello V. M.** Gold nanoparticles: preparation, properties, and applications in bionanotechnology, *Nanoscale*. 4 (6) (2012) 1871–1880.
3. **Dufourcq J., Mur P., Gordon M. J., et al.** Metallic nano-crystals for flash memories, *Mater. Sci. Eng. C*. 27 (5–8) (2007) 1496–1499.
4. **Kitsyuk E. P., Vasilevskaya Yu. O., Volovlikova O. V., et al.** Catalytic particles formation from thin nickel films for the synthesis of multi-walled carbon nanotubes, *Carbon*. 229 (11) (2024) 119509.
5. **Filip V., Filip L.D., Wong H.** Review on peculiar issues of field emission in vacuum nanoelectronic devices, *Solid State Electron*. 138 (Dec) (2017) 3–15.



6. **Filip L. D., Palumbo M., Carey J. D., Silva S. R. P.**, Two-step electron tunneling from confined electronic states in a nanoparticle, *Phys. Rev. B*. 79 (24) (2009) 245429.
7. **Gloskovskii A., Valdaitev D.A., Cinchetti M., et al.**, Electron emission from films of Ag and Au nanoparticles excited by a femtosecond pump-probe laser, *Phys. Rev. B*. 77 (19) (2008) 195427.
8. **Fursey G., Konorov P., Pavlov B., Yafyasov A.**, Dimensional quantization and the resonance concept of the low-threshold field emission, *Electronics*. 4 (4) (2015) 1101–1108.
9. **Davidovich M. V., Yafarov R. K.**, Pulsed and static field emission VAC of carbon nanocluster structures: experiment and its interpretation, *Tech. Phys.* 64 (8) (2019) 1210–1220.
10. **Kleshch V. I., Porshyn V., Lützenkirchen-Hecht D., Obraztsov A. N.**, Coulomb blockade and quantum confinement in field electron emission from heterostructured nanotips, *Phys. Rev. B*. 102 (23) (2020) 235437.
11. **Bergfield J. P., Solis M. A., Stafford C. A.**, Giant thermoelectric effect from transmission supernodes, *ACS Nano*. 4 (9) (2010) 5314–5320.
12. **Dubi Y., Di Ventra M.**, Colloquium: Heat flow and thermoelectricity in atomic and molecular junctions, *Rev. Mod. Phys.* 83 (1) (2011) 131–155.
13. **Karlström O., Linke H., Karlström G., Wacker A.**, Increasing thermoelectric performance using coherent transport, *Phys. Rev. B*. 84 (11) (2011) 113415.
14. **Sadeghi H.**, Quantum and phonon interference-enhanced molecular-scale thermoelectricity, *J. Phys. Chem. C*. 123 (20) (2019) 12556–12562.
15. **Andronov A., Budylina E., Shkitun P., et al.**, Characterization of thin carbon films capable of low-field electron emission, *J. Vac. Sci. Technol. B*. 36 (2) (2018) 02C108.
16. **Gabdullin P., Zhurkin A., Osipov V., et al.**, Thin carbon films: correlation between morphology and field-emission capability, *Diam. Relat. Mater.* 105 (May) (2020) 107805.
17. **Bizyaev I. S., Gabdullin P. G., Gnuchev N. M., Arkhipov A. V.**, Low-field electron emission from thin films of metals, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 14 (1) (2021) 105–120.
18. **Bizyaev I., Gabdullin P., Chumak M., et al.**, Low-field electron emission capability of thin films on flat silicon substrates: Experiments with Mo and general model for refractory metals and carbon, *Nanomater*. 11 (12) (2021) 3350.
19. **Thompson C. V.**, Solid-state dewetting of thin films, *Annu. Rev. Mater. Res.* 42 (1) (2012) 399–434.
20. **Ruffino F., Grimaldi G.**, Controlled dewetting as fabrication and patterning strategy for metal nanostructures, *Phys. Status Solidi A*. 212 (8) (2015) 1662–1684.
21. **Niekiel F., Schweizer P., Kraschewski S. M., et al.**, The process of solid-state dewetting of Au thin films studied by in situ scanning transmission electron microscopy, *Acta Mater.* 90 (15 May) (2015) 118–132.
22. **Kovalenko O., Szaby S., Klinger L., Rabkin E.**, Solid state dewetting of polycrystalline Mo film on sapphire, *Acta Mater.* 139 (15 Oct) (2017) 51–61.
23. **Weil K. S., Mast E. S., Sprenkle V. L.**, Agglomeration behavior of solid nickel on polycrystalline barium titanate, *Mater. Lett.* 61 (28) (2007) 4993–4996.
24. **Alburquerque D., Del Canto M., Arenas C., et al.**, Dewetting of Ni thin films obtained by atomic layer deposition due to the thermal reduction process: Variation of the thicknesses, *Thin Solid Films*. 638 (30 Sept) (2017) 114–118.
25. **Trofimovich K. R., Gabdullin P. G., Arkhipov A. V.**, An experimental apparatus for studying the characteristics of thermoelectric effect in nanostructures, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 16 (4) (2023) 101–117 (in Russian).
26. **Arkhipov A. V., Eidelman E. D., Zhurkin A. M., et al.**, Low-field electron emission from carbon cluster films: combined thermoelectric/hot-electron model of the phenomenon, *Fuller. Nanotub. Car. N.* 28 (4) (2020) 286–294.
27. **Arkhipov A., Trofimovich K., Arkhipov N., Gabdullin P.**, Phonon drag contribution to thermopower for a heated metal nanoisland on a semiconductor substrate, *Nanomater*. 14 (20) (2024) 1684.
28. **Bizyaev I. S., Karaseov P. A., Karabeshkin K. V., et al.**, Transformation of the structure of thin metal films upon activation of their ability to low-voltage electron emission // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 17 (2) (2024) 80–93 (in Russian).
29. **Fedorovich R. D., Naumovets A. G., Tomchuk P. M.**, Electron and light emission from island metal films and generation of hot electrons in nanoparticles, *Phys. Rep.* 328 (2–3) (2000) 73–179.

30. **Weber L., Lehr M., Gmelin E.**, Reduction of the thermopower in semiconducting point contacts, *Phys. Rev. B*. 46 (15) (1992) 9511–9514.

31. **Barda H., Rabkin E.**, Improving the thermal stability of nickel thin films on sapphire by a minor alloying addition of gold, *Appl. Surf. Sci.* 484 (1 Aug) (2019) 1070–1079.

32. **Nsimama P. D., Herz A., Wang D., Schaaf P.**, Influence of the substrate on the morphological evolution of gold thin films during solid-state dewetting, *Appl. Surf. Sci.* 388 (A) (2016) 475–482.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НГУЕН Ван Ту Ань – аспирант Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

anh.spbpu@gmail.com

ORCID: 0009-0004-7198-6329

ГАБДУЛЛИН Павел Гарифович – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

pavel-gabdullin@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-2519-2577

АРХИПОВ Александр Викторович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

arkhipov@rphf.spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-3321-7797

THE AUTHORS

NGUYEN Van Tu Ahn

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

anh.spbpu@gmail.com

ORCID: 0009-0004-7198-6329

GABDULLIN Pavel G.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

pavel-gabdullin@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-2519-2577

ARKHIPOV Alexander V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

arkhipov@rphf.spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-3321-7797

Статья поступила в редакцию 09.02.2025. Одобрена после рецензирования 19.05.2025.
Принята 19.05.2025.

Received 09.02.2025. Approved after reviewing 19.05.2025. Accepted 19.05.2025.