

На правах рукописи



Ерискин Александр Александрович

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ
НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ
СТРУКТУР**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном
учреждении высшего образования
«Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Научный
руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор,
заслуженный деятель науки РФ
Бондаренко Геннадий Германович

Официальные
оппоненты: **Волков Николай Викторович,**
доктор физико-математических наук,
доцент,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ),
доцент кафедры физических проблем
материаловедения

Бармин Александр Александрович,
кандидат технических наук,
Государственный научный центр РФ – федеральное
государственное унитарное предприятие
«Исследовательский Центр имени М.В. Келдыша»,
ведущий научный сотрудник Центра по применению
нанотехнологий в космической энергетике и
электрообеспечении космических систем

Ведущая
организация: ФГАОУ ВО «Московский физико-технический
институт (государственный университет)» (МФТИ)

Защита состоится «20» декабря 2017 г. в 14 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)» по адресу: 248000, г. Калуга,
ул. Баженова, д. 2, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на
сайтах <http://www.bmstu.ru>, <http://www.bmstu-kaluga.ru>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

**Лоскутов Сергей
Александрович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Диссертация посвящена исследованию воздействия на материалы импульсной высокотемпературной плотной плазмы, получаемой в установках типа плазменный фокус. Отличительной особенностью плазменных пучков, создаваемых на такого рода установках является одновременное воздействие на материалы пучков заряженных частиц, нейтронного и электромагнитного излучений в широком диапазоне длин волн – от инфракрасного до жесткого рентгеновского; еще одной особенностью являются параметры плазмы: плотность $\sim 10^{18} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и температура $\sim 1 \text{ кэВ}$. Таким образом, на материалы, располагаемые на пути движения плазмы, осуществляется комплексное влияние перечисленных воздействий, сильно разогревая поверхностный слой материала за короткое время до наступления абляции, вследствие чего возникает ударная волна, распространяющаяся вглубь облучаемого материала. Понимание механизмов воздействия высокоинтенсивной плазмы, образованной изотопами водорода, на материалы особенно важно для реакторов с магнитным удержанием плазмы. В связи с существующей вероятностью срыва плазмы и работы реактора в нештатных условиях возможно протекание нежелательных процессов: повышенной эрозии первой стенки и дивертора термоядерного реактора (ТЯР), образование трещин и структурных дефектов в материалах конструкции, повышенная степень набухания за счет высокой концентрации газовых атомов и др. Изучение воздействия высокотемпературных импульсных потоков плазмы на материалы представляет также интерес и в связи с возможностью получения соединений из термодинамически несмешивающихся элементов, что также может привести к созданию целого направления в материаловедении по практическому получению ранее неизвестных сплавов с уникальными свойствами. Практический аспект данной темы исследования заключается также в возможности получения покрытий с уникальными прочностными и электропроводящими свойствами. Исходя из вышеизложенного, тема диссертации является вполне актуальной, поскольку процессы, происходящие при воздействии высокотемпературной импульсной плазмы на физико-механические свойства композиционных структур являются в настоящее время еще мало изученными.

Степень разработанности темы исследования. На момент начала написания диссертационной работы попытки получения каких-либо покрытий с помощью установок типа плазменный фокус на диэлектрических (стеклянных) подложках приводили к сильной деструкции и разрушению подложек и невозможности получения качественных покрытий. Получение соединений несмешиваемых материалов требовало более детального изучения, так как были сделаны весьма немногочисленные работы на установках типа плазменный фокус. По тематике накопления и перераспределения H и D в конструкционные материалы было проведено значительное количество экспериментов, в том числе и на установках типа плазменный фокус, тем не менее, оставались вопросы, требующие проведения дополнительных экспериментов и исследований.

Цель и задачи диссертационной работы. Цель работы – экспериментальное выявление закономерностей изменения физико-механических свойств и структуры конструкционных материалов в результате воздействия

высокотемпературных импульсных плазменных потоков; разработка технологических решений создания композиционных структур из несмешивающихся материалов и получение прочных высокоадгезионных композиционных металлических покрытий на диэлектрических подложках с однородной структурой.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Выполнена модернизация действующей экспериментальной установки ПФ-4 для возможности получения композиционных металлических покрытий на диэлектрических (стеклянных) подложках без заметной деструкции их поверхности.
2. Разработано устройство, позволяющее получать соединения из термодинамически несмешиваемых компонентов, используемое в установке ПФ-4.
3. Методами резерфордовского обратного рассеяния и анализа упруго рассеянных ядер отдачи получены профили распределения водорода и дейтерия в конструкционных материалах, облученных высокоэнергетической импульсной плазмой; обнаружено сверхглубокое проникновение дейтерия и перераспределение водорода на глубины, значительно превышающие значения проективных пробегов соответствующих ионов, рассчитанных с помощью программы SRIM.
4. Получены и исследованы методами рентгеноструктурного анализа и растровой электронной микроскопии композиционные структуры из термодинамически несмешивающихся компонентов (Nb-Cu, W-Cu, W-Ag).
5. Разработана методика получения прочных высокоадгезионных оптических покрытий металлов (Fe, Ni, Cu, Ti, W) на диэлектрических подложках путем облучения высокоэнергетическими потоками импульсной плазмы.
6. Исследованы физико-механические свойства (оптические, электрические, прочностные, адгезия) и структура получаемых покрытий при различных режимах облучения. Продемонстрирована возможность при вариации условий облучения получения проводящих, либо диэлектрических покрытий для выбранной композиционной структуры.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложена методика получения оптических прочных высокоадгезионных покрытий металлов на диэлектрических подложках с использованием высокотемпературной импульсной плазмы, получаемой на установках типа плазменный фокус, отличающаяся созданием поверхностных композиционных слоев с однородным распределением компонентов вследствие ионного перемешивания компонентов плазмы с материалом подложки.
2. Выявлены закономерности изменений физико-механических свойств и структуры получаемых на ПФ оптически прозрачных покрытий на стеклах. С помощью полученных оптических спектров пропускания установлено, что в зависимости от условий облучения и пострadiационной обработки покрытия имеют различный тип проводимости (проводящий или диэлектрический). Получено увеличение микротвердости в 1,5 раза в тонком приповерхностном слое толщиной $20 \div 30$ нм покрытия, полученного на ПФ во внутренней полости Cu трубки. Достаточно глубокое проникновение напыляемых элементов покрытия в

подложку (до $0,8 \div 1,5$ мкм для частиц W и Cu) обеспечивает высокую адгезию получаемых покрытий.

3. Обнаружено явление сверхглубокого проникновения дейтерия и перераспределение водорода в конструкционных материалах (Ti, Ni, Zr, Nb, Ta, W), подвергнутых облучению на установке типа плазменный фокус.

4. Получены профили распределения элементов по глубине, внедряемых в стеклянные подложки при облучении высокотемпературными импульсными плазменными потоками на установке типа плазменный фокус. Установлено, что в получаемых покрытиях создается однородно перемешанная структура из атомов пленки и подложки с отсутствием четкой границы раздела.

5. При облучении высокотемпературной плазмой на установке «Плазменный фокус» в определенных режимах получены композиционные структуры из термодинамически несмешивающихся компонентов (Nb-Cu, W-Cu, W-Ag).

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов научных исследований подтверждается применением в работе комплекса современных взаимодополняющих методов исследований (цифровая оптическая микроскопия, растровая электронная микроскопия, спектрофотометрия, рентгеноструктурный анализ, метод непрерывного индентирования (кинетической твердости), резерфордское обратное рассеяние, анализ упруго рассеянных ядер отдачи) и корреляцией экспериментальных результатов с известными литературными данными.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В диссертационной работе при обнаружении эффекта дальнего действия получены профили распределения имплантированных атомов в объеме материала и предложен физический механизм обнаруженного явления сверхглубокого проникновения внедряемых частиц.

Для определения характера изменения электропроводности покрытий в зависимости от режима плазменного облучения, помимо электрофизических характеристик, получены оптические спектры пропускания образцов с диэлектрическим и металлическим характером проводимости и предложен физический механизм, объясняющий полученную зависимость.

Продемонстрированная в работе возможность создания при облучении высокотемпературной импульсной плазмой соединений из термодинамически несмешивающихся компонентов может явиться основой создания научного направления получения новых уникальных сплавов.

Практическая новизна полученных результатов и методик защищены патентом на Полезную модель № 2016105989 от 20.02.2016 и подтверждены справкой о внедрении от Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. В частности, разработанные устройства и приспособления установлены на «Плазменный фокус» ПФ-4 комплекса «Тюльпан» и успешно используются в проводимых институтом научных экспериментах. Практическую значимость также представляют полученные в диссертации высокопрочные покрытия, изменением режима плазменного облучения которых можно менять тип электропроводности.

Методология и методы исследования. В качестве методологической основы использовали принципы физико-химического взаимодействия в расплавах, образованных при облучении разнородных материалов, баллистического

перемешивания атомов различных элементов при воздействии высокоэнергетических импульсных потоков, теории атомных столкновений при высокоэнергетическом плазменном воздействии.

Для исследования структуры и состава поверхности облученных образцов, их физико-механических свойств (оптических, электрических, прочностных, адгезии) использовались следующие методы: цифровая оптическая микроскопия, растровая электронная микроскопия с микрорентгеновской приставкой для элементного анализа, спектрофотометрия, рентгеноструктурный анализ, метод непрерывного индентирования (кинетической твердости), четырехзондовый метод измерения вольт-амперных характеристик, методы резерфордовского обратного рассеяния и анализа упруго рассеянных ядер отдачи.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Развитый метод получения металлических покрытий на диэлектрических подложках с помощью импульсной высокотемпературной плазмы, генерируемой в установках типа плазменный фокус, позволяющий совершать одновременное легирование атомами С, Cu, W, Ti приповерхностных слоев металлических и неметаллических материалов.
2. Результаты исследования физико-механических свойств (оптических, электрических, прочностных, адгезии) и структуры покрытий, созданных путем облучения на установке типа плазменный фокус и отличающихся однородным распределением компонентов пленки и подложки в поверхностном слое, получающемся за счет ионного перемешивания компонентов плазмы с материалом подложки.
3. Выявленные закономерности сверхглубокого проникновения дейтерия и перераспределения водорода в конструкционных материалах, облученных при определенных режимах в установках типа плазменный фокус, и физический механизм обнаруженного явления.
4. Метод получения композиционных структур из термодинамически несмешивающихся элементов, результаты исследования поверхностной структуры, физический механизм, объясняющий данное явление.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на: XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI Международных конференциях «Радиационная физика твердого тела» (г. Севастополь, 2012-2016 гг.); 10 и 11 Международных конференциях «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Беларусь, г. Минск, 2013, 2015 гг.); V и VI Всероссийских молодежных конференциях по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики (г. Москва, 2013, 2015 гг.); XLV Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (г. Москва, 2015 г.); Научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ НИУ ВШЭ и ВШЭ (г. Москва, 2012-2016 гг.); XXII Научно-техническом семинаре «Научные материалы для обычной и атомной промышленности и электрической энергии» (Польша, г. Закопане, 2015 г.); VI Международной конференции с элементами научной Школы для молодежи «Функциональные Наноматериалы и Высоко-чистые Вещества» (г. Суздаль, 2016 г.).

Материалы диссертации были включены в отчетные материалы по проектам ФИАН и ИМЕТ, а также по грантам РФФИ № 11-02-00854-а, № 15-02-05995, по грантам президента РФ № НШ-354.2012.2, № НШ-1424.2014.2, по гранту РФФИ № 16-12-10351, по Федеральной целевой программе ГК № 14.516.11.7006.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 26 печатных работах (в том числе патент на Полезную модель), из них: 3 статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ и включенных в систему цитирования Web of Science: Science Citation Index Expanded, 1 статья в журнале, входящем в перечень ВАК РФ и включенном в системы цитирования Web of Science и Scopus, а также 2 препринта, 19 публикаций в сборниках тезисов докладов и материалах конференций. Общий объем 2,86 п. л.

Личный вклад автора. В исследованиях, вошедших в диссертацию, автору принадлежит нахождение оптимальных параметров и условий проведения эксперимента на установке типа плазменный фокус (ПФ-4, ФИАН); исследование всех облученных образцов различными способами, описанными в разделе «Методика эксперимента»; выводы, полученные вследствие анализа полученных результатов исследования морфологии поверхности и физико-механических свойств облученных образцов.

Автор работы непосредственно участвовал в проведении экспериментов на установке «Плазменный фокус» ПФ-4 в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН; принимал участие в разработке приспособлений к ПФ-4 для получения композиционных покрытий; разработал методику получения соединений из термодинамически несмешиваемых элементов и получил патент на Полезную модель «Приспособление для получения соединений нерастворимых друг в друге металлов» № 2016105989 от 20.02.2016; освоил методы резерфордского обратного рассеяния и анализа упруго рассеянных ядер отдачи; рассчитал в программе SRIM проективные пробеги изотопов водорода в конструкционные материалы и провел сравнение с экспериментально полученными профилями распределения элементов в образцах, облученных на ПФ-4.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов и библиографии. Общий объем диссертации составляет 203 страницы, из них 182 страницы текста, включая 84 рисунка, 12 таблиц. Библиография включает 190 наименований на 21 странице.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, определены цель и задачи исследования, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены данные по апробации результатов работы.

Первая глава носит обзорный характер. Первый раздел главы посвящен современному состоянию проблемы взаимодействия высокотемпературной плазмы с твердыми телами. Представлены технические характеристики (плотность плазмы, температуры и т. д.) установок типа «Плазменный фокус», литературные данные по воздействию облучения высокотемпературной плазмой на структуру и свойства материалов, в частности, композиционных структур. Во втором разделе главы представлен обзор существующих методов нанесения покрытий (термическое

испарение в вакууме, катодное распыление, ионно-плазменное распыление, метод вакуумно-дугового осаждения, магнетронное распыление). В третьем разделе главы описаны имеющиеся в литературе данные по имитации плазменного воздействия на материалы первой стенки и дивертора ТЯР, систематизированы исследования по распределению имплантированных изотопов водорода в облучаемых материалах. Отмечается недостаточность литературных данных по воздействию высокотемпературной импульсной плазмы на физико-механические свойства композиционных структур, в частности, данных по имитации нештатного воздействия на материалы (срывов плазмы) в ядерных реакторах типа токамаков. В четвертом разделе рассмотрена проблема получения соединений из компонентов, термодинамически несмешивающихся в твердом состоянии. Таких исследований в литературе почти не было. На основании анализа литературных данных сформулирована цель и задачи работы.

Вторая глава посвящена описанию использованного оборудования и методик исследования. Описаны исследованные материалы, параметры и режимы работы установки «Плазменный фокус» ПФ-4, а также методы облучения образцов и напыления покрытий на ПФ-4 (прямое воздействие плазмы на материалы, напыление пленок скользящим пучком плазмы через щелевую диафрагму, напыление пленок через полые трубки, методика облучения сборок образцов для изучения проникновения и перераспределения в них водорода и дейтерия, методика получения соединений нерастворимых друг в друге ни в жидком, ни в твердом состоянии материалов Nb-Cu, W-Cu, W-Ag). Не прямые методы воздействия осуществлялись с помощью специально разработанных приспособлений. Кроме того, была проведена модернизация установки.

Кратко описаны методы исследования состава, структуры и свойств образцов. Измерение оптических свойств материалов проводилось методом спектрофотометрии на спектрофотометрах СФ-16 и ДФС-46 в видимом диапазоне излучения. Для измерения электрофизических свойств исследуемых материалов использовалась экспериментально созданная четырехзондовая установка с расположением зондов «в линию». Микротвердость измерялась с помощью метода непрерывного индентирования (метод кинетической твердости) на приборе Nanotest. Адгезия измерялась методом скрайбирования алмазной пирамидкой. Топографию поверхности образцов исследовали с помощью металлографического оптического микроскопа «Neophot 32» фирмы Zeiss, с возможностью регистрации цифрового изображения. Микросъемку проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) «EVO 40» фирмы Zeiss, оснащенном SDD кремниевым дрейфовым детектором «XFlash 1106», с помощью которого осуществляли рентгеноспектральный микроанализ образцов. Диапазон анализируемых элементов: от бора (№ 5) до америция (№ 95). Для определения фазового состава и параметров решеток в полученных соединениях W-Cu и W-Ag использовался метод рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра ДРОН. Рентгеноструктурный анализ титановых покрытий на стеклах проводился на дифрактометре ALTIMA-4 с использованием отфильтрованного Cu K_α излучения. Для получения профилей распределения и элементного состава пленок применялись две установки резерфордского обратного рассеяния – ROP (Rutherford Backscattering Spectrometry – RBS): на базе ускорителя «HVEE

AN-2500» (НИИЯФ МГУ) и электростатического генератора «ЭГ-5» (Дубна, ОИЯИ), являющихся ускорителями типа Ван-де-Граафа. Для обнаружения водорода и дейтерия использовался метод анализа упруго рассеянных ядер отдачи (Elastic recoil detection analysis – ERDA). Расчет проективных пробегов ионов проводился с помощью программы SRIM. Обработка спектров, полученных с помощью методов RBS и ERDA проводилась в стандартной программе SIMNRA.

В третьей главе излагаются результаты комплексного исследования металлических покрытий, наносимых на фотостекло при облучении высокотемпературной плазмой на установке «Плазменный фокус».

Первоначально было проведено исследование прямого воздействия плазменных импульсов на фотостекло (состав: SiO_2 – 75,5 %, Na_2O – 12,9 %, CaO – 11,6 %), при этом с анода установки, наконечником которого является вольфрамовая вставка, происходило распыление плазмой вольфрама и осаждение его на стеклянную подложку. Вольфрамовая вставка является неотъемлемой частью анодного узла для предотвращения анода от преждевременного эрозионного износа. На Рис. 1 представлена схема нанесения металлических пленок на стеклянные подложки; на Рис. 2 – морфология поверхности вольфрамового покрытия на стеклянной подложке, при этом пары вольфрама с анодной вставки захватывались турбулентным потоком плазмы и осаждались на стеклян-

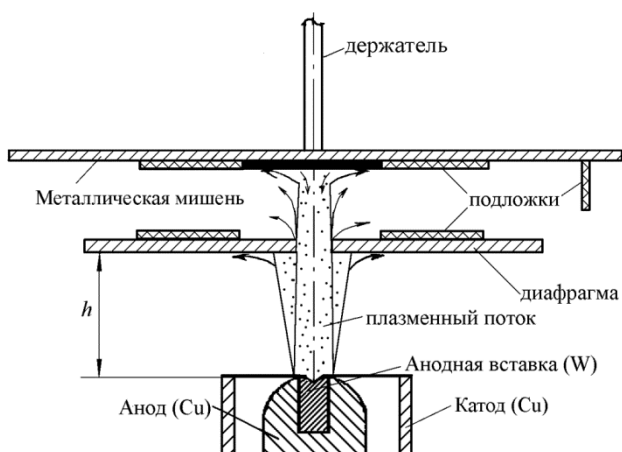


Рис. 1. Схема нанесения металлических пленок на стеклянные подложки

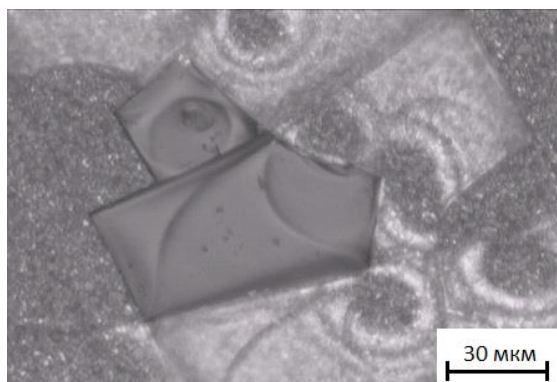


Рис. 2. Микроструктура поверхности вольфрамовой пленки на фотостекле при облучении недиффрагмированным плазменным пучком, $n = 5$ имп, $h = 150$ мм

ной подложке. Облучение в данном случае проводилось без использования диафрагмы, стеклянная пластинка располагалась перпендикулярно оси падающего плазменного пучка. Из Рис. 2 видно, что даже при максимальном удалении образца от анода ($165 \div 175$ мм) и небольшом числе импульсов облучение свободной струей плазмы приводит к разрушению образца, на его поверхности наблюдаются трещины и сколы. С целью смягчения режима облучения стекла и нанесения покрытия был предложен усовершенствованный способ их получения в условиях, исключающих попадание мощного прямого пучка на подложку. Из плазмы с помощью диафрагмы диаметром 20 мм, изображенной на Рис. 1, выделялась центральная, наиболее интенсивная часть потока, которая направлялась на мишень. Мишенью в данном случае служила уже титановая пластинка, а не стекло, как в описанном выше эксперименте. Стеклянные подложки располагались при этом не на прямом

пучке. Мелкие частицы металла, испарившиеся с поверхности титановой мишени, захваченные турбулентным потоком плазмы, оседали на стеклах (Рис. 1), установленных в различных местах в пространстве между мишенью и диафрагмой, как перпендикулярно, так и параллельно падающему плазменному пучку.

На Рис. 3, *a* представлена топография поверхности образца фотостекла с напыленной в описанных условиях пленкой титана, расположенного в плоскости, параллельной металлической мишени на расстоянии $x = 20$ мм от оси пучка. Видно, что на образце имеются трещины, т. е. трещинообразование вызывается даже рассеянной, не центральной частью плазменного пучка. Средний размер напыляемых частиц в пленках, полученных облучением 30 импульсами плазмы, был измерен на цифровом оптическом микроскопе Leica DM ILM. При обработке изображений пленки (Рис. 3, *a*) установлено, что она содержит частицы со средним размером $\sim 0,44$ мкм. При этом формируется типичная островковая структура. Частицы статистически распределены достаточно равномерно и не образуют мостиков проводимости, что согласуется с диэлектрическим характером пленки.

При удалении образца на расстояние $x \geq 50$ мм пленки покрытий не подвержены трещинообразованию. В то же время было установлено, что для получения плотных пленок удовлетворительного качества (Рис. 3, *б*) при $x = 50$ мм необходимо воздействие не менее 60 плазменных импульсов. При этом структура пленок уже не имеет островковый характер и пленки – электропроводны. Получено увеличение в $\sim 1,5$ раза микротвердости для покрытия, созданного при облучении высокотемпературной импульсной плазмой, по сравнению с аналогичными покрытиями, наносимыми методами термического осаждения ($0,9 \div 2,1$ ГПа), а также весьма высокое значение адгезии (высший балл 1 по ГОСТ 15140-78) в системе пленка-подложка.

Характер структуры получаемых покрытий определяется ионным перемешиванием при плазменном облучении, а также слоевым распределением по глубине внедряемых при плазменной имплантации легирующих элементов, в частности меди, вольфрама и углерода, в отличие от традиционно используемых методов нанесения при низких скоростях осаждения атомов, в том числе и диффузионных. Описанный характер распределения подтверждается Рис. 4, где показаны полученные методом резерфордовского обратного рассеяния профили распределения по глубине вольфрама, меди и углерода при облучении высокотемпературной плазмой. Углерод является постоянно присутствующей примесью в камере для облучения от стальных узлов установки. Ионное перемешивание элементов является характерным широко изученным процессом, происходящим при ионном облучении материалов; данный процесс способствует увеличению сцепления пленки с подложкой и улучшает адгезию.

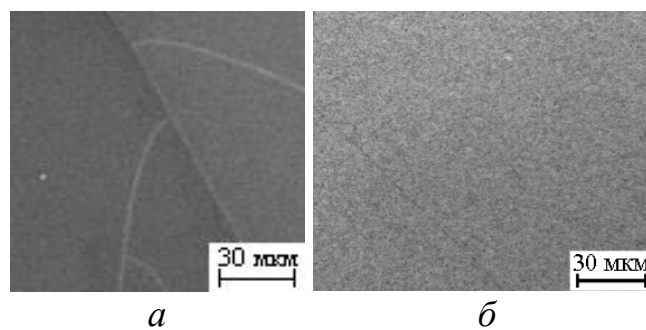


Рис. 3. Микроструктура титановых пленок на фотостеклах: *a* – $n = 30$ имп., $x = 20$ мм, *б* – $n = 43$ имп., $x = 50$ мм

Разработанная методика получения пленок не требует применения дополнительной химико-термической обработки, которая обычно используется для улучшения адгезии пленок с подложкой после их получения другими распространенными способами, такими как термическое осаждение, магнетронное распыление, методы химического и электролитического осаждения.

На Рис. 5 приведены оптические спектры пропускания (τ) пленок титана, напыленных на поверхность фотостекла. Видно, что коэффициент пропускания (τ) фотостекла, как исходного (1), так и после напыления пленки (2, 4), меняется в зависимости от длины волны. Эту зависимость можно привести в соответствие с зависимостью от проводимости образца. Относительное уменьшение τ с увеличением толщины пленок, в основном, связано с поглощением и рэлеевским рассеянием на частицах размером $d \sim \lambda$ (d – характерный размер частиц). В нашем случае, как показали оптические измерения, средний размер частиц как раз соответствует λ видимого оптического диапазона – $0,3 \div 0,7$ мкм. Следует отметить характерное возрастание τ в красной и инфракрасной области спектра, что подтверждает диэлектрический характер напыленных пленок (кривая 2) с некоторой долей металлической проводимости. Отсутствие диффузного рассеяния света на дефектах поверхности, которое обычно наблюдается при изменении ее морфологии, указывает на сохранение качества поверхности исходных стекол, что подтверждается микроструктурными исследованиями поверхности (Рис. 3, б). На Рис. 5, кривая 3 приведен также спектр пропускания тонкой пленки Ti (~0,5 мкм), рассчитанный по литературным данным в соответствии с формулой:

$$\tau = 1 - R - \alpha x \quad (1)$$

R – коэффициент отражения, отн. ед.;

α – коэффициент поглощения, см^{-1} ;

x – толщина пленки, см.

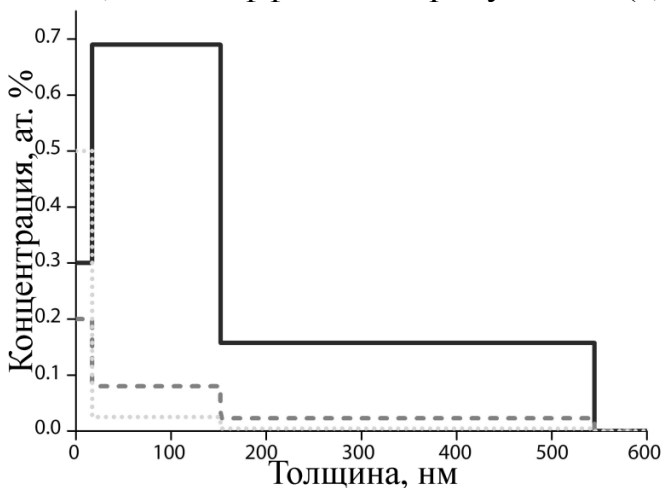


Рис. 4. Профиль распределения элементов Cu (пунктирная линия), W (точечная линия) и C (сплошная линия) по глубине в центре области напыления при $n = 10$ имп. Профили получены методом резерфордовского обратного рассеяния

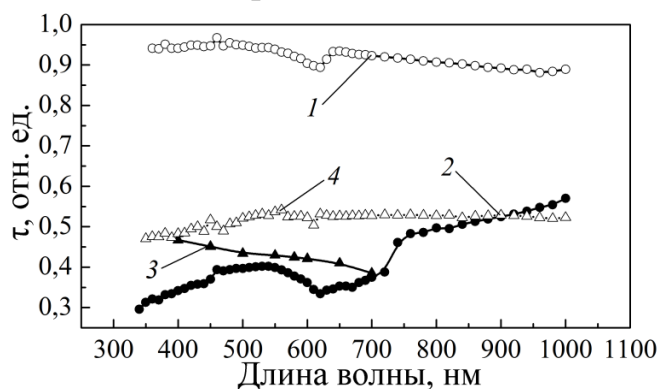


Рис. 5. Зависимость коэффициента пропускания фотостекла от длины волны: 1 – исходное стекло; 2 – диэлектрическая пленка, образованная при облучении 30-ю импульсами (Рис. 3, а); 3 – металлическая пленка титана толщиной 0,5 мкм; 4 – электропроводная пленка Ti при облучении 60-ю импульсами

Видно, что металлический характер пленки Ti подтверждается характерным уменьшением τ в длинноволновой области спектра. Таким образом, приведенные результаты позволяют заключить, что получение достаточно однородных диэлектрических пленок металлов на стеклах на установке ПФ-4 вполне возможно. При исследовании большого количества образцов было установлено, что большую однородность напыления металла при использовании схемы Рис. 1 можно достичь путем поворота образца на 180° через определенное число импульсов. На Рис. 6 приведена рентгенограмма стекла с напыленной пленкой. В пленке помимо титана обнаружен нитрид титана (TiN).

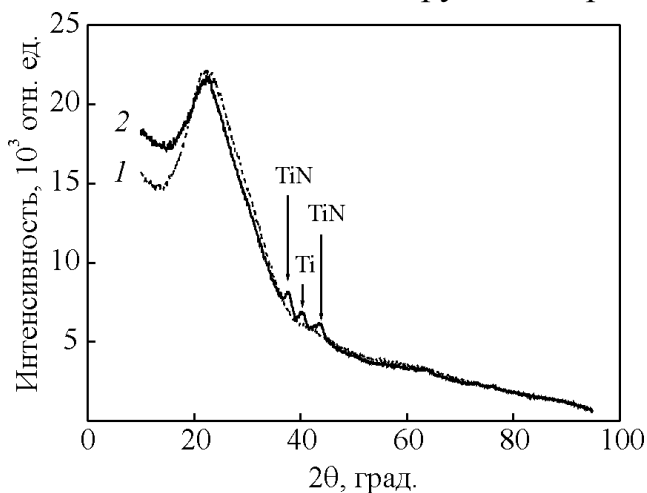


Рис. 6. Дифрактограмма исходного стекла (1) и стекла с напыленной пленкой Ti (2)

Было установлено, что если конструкцию Рис. 1 модифицировать (использованием на пути пучка наклоненной к нему под 45° титановой мишени), однородные покрытия с металлической проводимостью можно получать за счет увеличения концентрации металлической фракции в плазменном потоке при меньшем количестве плазменных импульсов (порядка 20). Измеренные значения удельного электросопротивления пленок в данном случае были $\rho \leq 10^{-8}$ Ом·м.

В четвертой главе представлены результаты исследования по перераспределению дейтерия и водорода в ряде конструкционных материалов (Ti, Zr, Nb, Ta, W), облученных потоками высокотемпературной импульсной плазмы.

Исследования проводились методами детектирования ядер отдачи дейтерия и водорода и резерфордовского обратного рассеяния.

Образцы фольг из исследованных материалов были облучены на установке ПФ-4 15-ю импульсами дейтериевой плазмы с максимальной энергией в импульсе дейтериевой плазмы $E_D = 10$ кэВ (при их максимальной скорости до $\sim 10^8$ см/с). Размеры каждой фольги – 10×15 мм², толщины фольг – 0,25 мм.

На Рис. 7 изображен в качестве примера ERDA спектр, снятый с обращенной к плазме стороны облученной титановой фольги. В Таблице 1 представлены значения глубины проникновения элементов (H, D, O, Ti, Fe, Zn, Pb).

Из представленных экспериментальных данных (Рис. 7 и Таблица 1) видно, что для ионов дейтерия в титане максимальная глубина проникновения составила $3,05 \cdot 10^{18}$ ат./см², или 5080 Å. В то же время, значение проективного пробега ионов дейтерия с максимальной энергией в импульсе дейтериевой плазмы $E_D = 10$ кэВ в титане, рассчитанное с помощью программы SRIM, составляет $R_{pTi} = 1119 \pm 647$ Å. Таким образом, в данных экспериментальных условиях имеет место эффект дальнего действия – значительное превышение глубины проникновения атомов дейтерия в титане по сравнению с теоретически рассчитанной. Такой же эффект обнаружен нами для облученных образцов Zr, W, Ta, Nb. Для ионов дейтерия в

цирконии максимальная глубина проникновения составила 7730 Å, при этом рассчитанное значение составляет $R_{pZr} = 875 \pm 647$ Å. Для ионов дейтерия в вольфраме максимальная глубина проникновения составила 4560 Å, при этом рассчитанное значение составляет $R_{pW} = 606 \pm 309$ Å. Для ионов дейтерия в тантале максимальная глубина проникновения составила 6700 Å, при этом рассчитанное значение составляет $R_{pTa} = 500 \pm 610$ Å. Для ионов дейтерия в ниобии максимальная глубина проникновения составила 7200 Å, при этом рассчитанное значение составляет $R_{pNb} = 684 \pm 535$ Å.

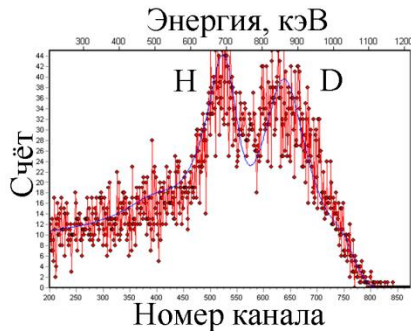


Рис. 7. ERDA спектр облученной стороны титановой фольги, число импульсов дейтериевой плазмы $n = 15$

Таблица 1. Распределение элементов с облученной стороны титановой фольги, число импульсов дейтериевой плазмы $n = 15$

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см ²	Глубина, нм	H, %	D, %	O, %	Ti, %	Fe, %	Zn, %	Pb, %
150	27	5,0	1,0	3,5	70,0	14,0	5,0	1,5
350	61	1,5	1,0	—	76,0	15,0	5,0	1,5
650	111	1,2	1,4	—	74,9	16,0	5,0	1,5
1050	178	1,2	1,7	—	73,6	17,0	5,0	1,5
1550	261	1,1	1,7	—	73,7	17,0	5,0	1,5
2050	344	1,0	0,8	—	74,7	17,0	5,0	1,5
3050	508	1,0	0,5	—	75,0	17,0	5,0	1,5
4950	817	—	—	—	76,5	17,0	5,0	1,5

Помимо дейтерия в фольгах присутствовал, как можно видеть из представленных на Рис. 7 и в Таблице 1 данных, в качестве газовой примеси водород, перераспределение которого также характеризует процессы переноса легких примесей по толщине фольги. При этом глубины проникновения для дейтерия, внедренного из дейтериевой плазмы при облучении, и водорода, содержащегося в образцах в качестве примеси и перераспределенного в результате облучения, оказались сравнимыми в случае циркониевых и титановых фольг.

Обнаруженное явление сверхглубокого проникновения дейтерия, а также и водорода объяснено нами одновременным протеканием двух процессов: воздействием мощных ударных волн на перераспределение водорода и дейтерия с переносом их, как легких и слабосвязанных примесей, на большие глубины и ускоренной диффузией примесных газовых атомов под действием внешней движущей силы F . Законы Фика для потока частиц J записываются в виде:

$$\bar{J} = -D \cdot \bar{\nabla} C(\bar{R}) + K \cdot \langle \bar{V} \rangle_F, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C(\bar{R})}{\partial t} = \bar{\nabla} [D \bar{\nabla} C(\bar{R})] - K \cdot \bar{\nabla} \langle \bar{V} \rangle_F, \quad (3)$$

где D – коэффициент диффузии газовых атомов, C – их концентрация, \bar{R} – средняя глубина проникновения газовых атомов, F – внешняя движущая сила, придающая каждому атому среднюю дополнительную скорость $\langle \bar{V} \rangle_F$, K – коэффициент пропорциональности. Средняя дополнительная скорость каждого атома $\langle \bar{V} \rangle_F$,

предположительно, может быть сопоставлена со скоростью распространения ударной волны. Известно, что при мощном импульсном воздействии (в данном случае – это воздействие мощных импульсов плазмы) в материале возникает и распространяется упругая волна, которая на определенной глубине R_{E-S} , зависящей от типа материала и плотности мощности действующего плазменного импульса, трансформируется в ударную волну с крутым передним фронтом волны сжатия и волной разрежения за фронтом ударной волны. Поэтому на относительно небольших глубинах $R < R_{E-S}$ легкие несвязанные в химическую связь и (или) слабо связанные примесные атомы приобретают дополнительную скорость $\langle \bar{V} \rangle_F$, значение которой, вероятно, можно сопоставить со скоростями объемной продольной $V_{||}$ или поперечной V_{\perp} упругих волн.

Пятая глава посвящена описанию экспериментов по созданию сплавов из термодинамически несмешивающихся компонентов с использованием воздействия высокотемпературной импульсной плазмы.

Схема облучения была аналогична изображенной на Рис. 1, при этом мишенью служила медная пластина, а анодный узел плазменной установки был изготовлен целиком из меди. Устанавливаемая между мишенью и анодом распыляемая диафрагма была из ниобия.

На Рис. 8, *a* представлена рентгенограмма, снятая с поверхностного слоя образца Cu-Nb в зоне воздействия обогащенной ниобием плазмы. Отражение, принадлежащее ниобию, нанесенному на поверхность меди, соответствует твердому раствору на основе структуры кубического ниобия. Как видно из фрагмента этого спектра (Рис. 8, *б*), растянутого по горизонтальной оси, рентгеновские отражения от ниобиевого покрытия представляют собой пики, имеющие множество вторичных дифракционных максимумов на правом склоне (возле значения по оси абсцисс в 39°). Это говорит о непостоянстве состава твердого раствора ниобия (левый, самый высокий пик соответствует практически чистому ниобию) и, таким образом, свидетельствует о существовании непрерывного ряда твердых растворов меди с ниобием.

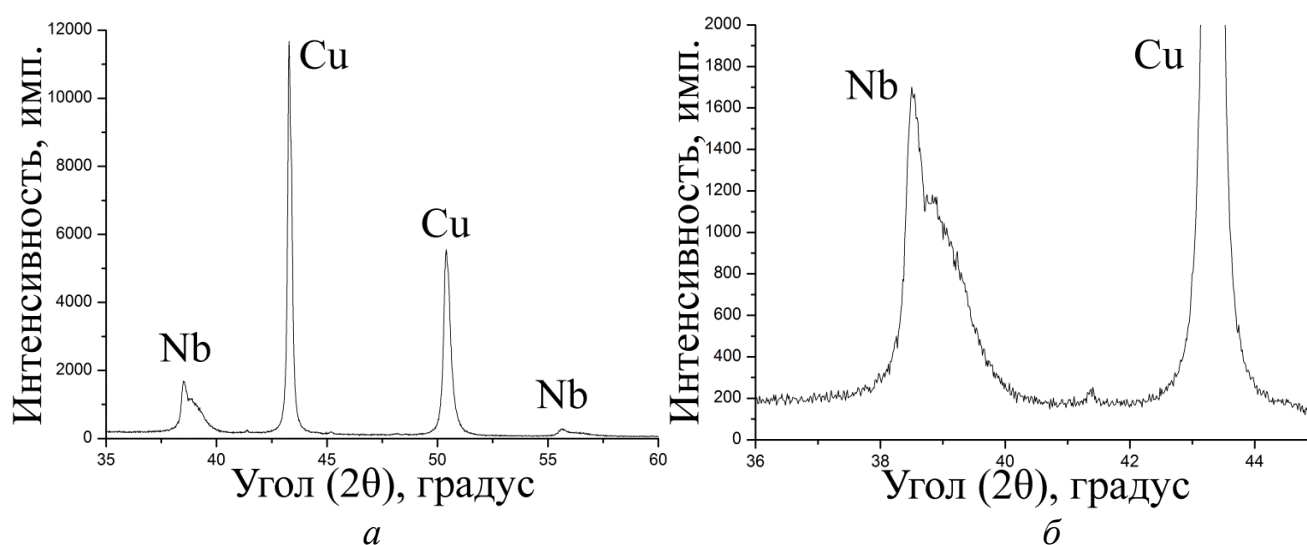


Рис. 8. Дифрактограмма образца Cu-Nb (*a*) и ее увеличенная область (*б*)

Аналогичные результаты получены при структурном исследовании соединений вольфрама с медью и вольфрама с серебром.

На Рис. 9 представлена структура поверхности вольфрама при имплантации в него серебра, полученная с использованием растрового электронного микроскопа, снабженного приставкой для рентгеновского микроанализа.



Рис. 9. Изображение образца W-Ag, облученного 20-ю импульсами азотной плазмы на расстоянии 30 мм от анода, полученное на растровом электронном микроскопе, снабженном приставкой для рентгеновского микроанализа. Светлые участки соответствуют вольфраму, темные – серебру

Светлая центральная область содержит преимущественно вольфрам с отдельными вкраплениями пятен, соответствующих серебру. Периферийная область образца наоборот, содержит преимущественно серебро. Тем не менее, в переходной области можно наблюдать смешение светлых и темных пятен, обусловленное перемешиванием разнородных атомов с образованием соединения W-Ag.

Вероятно, центральное пятно выжигается последующими импульсами плазмы, поэтому легкоплавкое серебро наблюдается только в периферийной области W-подложки.

В Таблице 2 приведены значения параметров решеток исходных и облученных материалов, определенные методом рентгеновского дифракционного анализа. В качестве примера была взята система W-Cu.

Для минимизации систематических погрешностей параметры решетки измерены методом сравнения с эталоном. В качестве эталона использовался кремний, параметр которого измерен абсолютным методом Бонда ($a = 5,43094 \pm 0,00001 \text{ \AA}$).

Таблица 2.

Параметры решеток исходных и облученных материалов W, Cu, измеренные методом сравнения с эталоном

Материал	Параметр решетки элемента до облучения, \AA	Параметр решетки элемента в композиции (после облучения), \AA
W	$3,1662 \pm 0,0002$	$3,1638 \pm 0,0002$
Cu	$3,6175 \pm 0,0002$	$3,6147 \pm 0,0002$

Как указано выше, вследствие облучения происходит образование соединения W-Cu. Из Таблицы 2 видно, что в образующемся при облучении соединении вольфрам-медь (твердом растворе) происходит уменьшение параметра решетки у обоих отдельно взятых элементов (W и Cu). Данное явление, по-видимому, связано с образованием высокой концентрации вакансий при высоких температурах, что способствует созданию твердого раствора замещения.

Процесс создания такого рода соединений в значительной степени интенсифицируется баллистическим ионным перемешиванием разнородных атомов. Поскольку толщина наносимого покрытия (меди или серебра) несколько меньше глубины максимума радиационных повреждений в облученном вольфраме, то в области, близкой к границе раздела пленка-подложка, при облучении развивается каскад смещений и происходит интенсивное баллистическое перемешивание атомов ниобия и меди, либо вольфрама и меди (серебра), практически не зависящее от времени облучения, усиливающееся сопровождающимся импульсом ударной волны.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена оригинальная методика и оптимизированы режимы нанесения оптических металлических пленок на поверхность диэлектрических подложек (стекло) с использованием импульсной плазмы на установке типа Плазменный фокус, при этом внедряемые элементы распыляются с анодного узла установки. Разработанная методика получения пленок не требует применения дополнительной химико-термической обработки, которая обычно используется для улучшения адгезии пленок с подложкой после их получения другими распространенными способами, такими как термическое осаждение, магнетронное распыление, методы химического и электролитического осаждения.
2. Экспериментально показана возможность получения устойчивых к воздействию высокоэнергетических плазменных импульсов проводящих и непроводящих оптических покрытий на стеклянных подложках. С помощью методов Резерфордского обратного рассеяния и анализа упруго рассеянных ядер отдачи установлено, что характер структуры получаемых покрытий определяется ионным перемешиванием при плазменном облучении, а также слоевым распределением по глубине внедряемых при плазменной имплантации легирующих элементов, в частности меди, вольфрама и углерода, в отличие от традиционно используемых методов нанесения при низких скоростях осаждения атомов, в том числе и диффузионных.
3. При исследовании влияния пострadiационного отжига на структуру системы пленка-подложка (титан-стекло), созданной облучением на установке Плазменный фокус, методами рентгеноструктурного анализа и растровой электронной микроскопии показано, что полученная композиционная структура может иметь либо металлический, либо диэлектрический характер электропроводности в зависимости от режима облучения. С использованием спектрофотометров СФ-16 и ДФС-46 получены спектры пропускания образцов, облученных в разных режимах, подтверждающие обнаруженный эффект.
4. Показана возможность получения композиционных покрытий, содержащих в оптимальном соотношении медь, вольфрам и углерод, на внутренней поверхности цилиндрических трубок из различных материалов (стекло, медь, нержавеющая сталь) при их облучении высокотемпературной аргоновой/дейтериевой плазмой на установке плазменный фокус; установлены режимы их получения. Методом скрайбирования алмазной пирамидой показано, что данные покрытия обладают высокой адгезией. Методом непрерывного индентирования показано, что полученные покрытия обладают повышенной (в 1,5 раза) микротвердостью по

сравнению с аналогичными покрытиями, наносимыми методами термического осаждения.

5. При воздействии высокоэнергетических ионов дейтериевой плазмы обнаружен эффект дальнего действия – сверхглубокое (на порядок величины), по сравнению с теоретически рассчитанным, проникновение дейтерия и водорода в конструкционные материалы (Ti, Zr, Nb, Ta, W); предложен физический механизм обнаруженного явления, связанный с воздействием мощных ударных волн на перераспределение элементов и их переносом на большие глубины, а также ускоренной диффузией газовых атомов при наличии внешних движущих сил.

6. Для выполнения экспериментов по созданию термодинамически несмешивающихся соединений в системе пленка-подложка проведена модернизация установки плазменный фокус ПФ-4; создано устройство, позволяющее проводить нанесение покрытия на подложку непосредственно в процессе плазменного воздействия, защищенное патентом на Полезную модель.

7. При облучении высокотемпературной импульсной плазмой, продемонстрирована принципиальная возможность получения соединений из термодинамически несмешиваемых элементов, в частности, в системах Nb-Cu, W-Cu и W-Ag обнаружено создание твердого раствора ниобия с медью, меди (серебра) с вольфрамом. Предложен физический механизм, объясняющий данное явление баллистическим, недиффузионным атомным перемешиванием, усиливающимся прохождением ударной волны.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В РАБОТАХ

1. Напыление тонких пленок на диэлектрические подложки с использованием импульсной плазмы / В. Н. Колокольцев, И. В. Боровицкая, А. А. Ерискин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 5. С. 51-57 (0,438 п. л. / 0,063 п. л.).

2. Влияние ударных волн, генерируемых высокотемпературной аргоновой плазмой, на перераспределение водорода и дейтерия в сборках из танталовых и ниобиевых фольг / А. Ю. Дидык, Г. Г. Бондаренко, А. А. Ерискин [и др.] // Перспективные материалы. 2015. № 9. С. 29-38 (0,625 п. л. / 0,156 п. л.).

3. Распределение дейтерия и водорода в вольфрамовых фольгах при облучении импульсной высокотемпературной плазмой / А. Ю. Дидык, Г. Г. Бондаренко, А. А. Ерискин [и др.] // Перспективные материалы. 2016. № 4. С. 28-35 (0,5 п. л. / 0,125 п. л.).

4. Изучение методом Резерфордского обратного рассеяния распределения элементов в пленках, напыленных на установке типа «плазменный фокус» / В. Н. Колокольцев, В. С. Куликаускас, А. А. Ерискин [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. №1. С. 41-46 (0,375 п. л. / 0,094 п. л.).

5. Приспособление для получения соединений нерастворимых друг в друге металлов: а.с.173070 РФ / В. Я. Никулин, Е. Н. Перегудова, С. Н. Полухин, П. В. Силин, А. А. Ерискин заявл.20.02.2016;опубл.08.08.2017.Бюлл.№22.

6. Ерискин А. А. Возможные применения установки «Плазменный фокус» // Тезисы докладов Научно-технической конференции студентов, аспирантов и

молодых специалистов МИЭМ НИУ ВШЭ. Москва: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 256-257 (0,125 п. л.).

7. Получение оптических пленок металлов на установке «Плазменный фокус» / А. А. Ерискин [и др.] // Радиационная физика твердого тела: Труды XXIII Международной конференции. Севастополь, 2013. С. 67-77 (0,688 п. л. / 0,115 п. л.).

8. Получение оптических пленок металлов на стеклах с помощью установки плазменный фокус / А. А. Ерискин [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 10-й Международной конференции. Минск, 2013. С. 43-46 (0,25 п. л. / 0,036 п. л.).

9. Ерискин А. А. Нанесение титановых пленок на стеклянные подложки с использованием установки «Плазменный фокус ПФ-4» // Сборник трудов V Всероссийской молодежной конференции по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики. Москва: ФИАН, 2013. С. 164 (0,063 п. л.).

10. Ерискин А. А. Влияние отжига на оптические свойства пленок, полученных на установке «ПФ-4» // Материалы Ежегодной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ. Москва: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2014. С. 225-226 (0,125 п. л.).

11. Напыление тонких пленок через полые трубки на установке плазменный фокус / А. А. Ерискин [и др.] // Радиационная физика твердого тела: Труды XXIV Международной конференции. Севастополь, 2014. С. 95-104 (0,625 п. л. / 0,156 п. л.).

12. Ерискин А. А. Распределения водорода и дейтерия в фольгах из вольфрама и тантала, облученных высокотемпературной плазмой аргона в заполненной D₂O герметичной камере // Материалы Ежегодной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е. В. Арменского. Москва: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2015. С. 270-271 (0,125 п. л.).

13. Применение метода РОР для определения профиля распределения и элементного состава пленок, напыленных на установке плазменный фокус / А. А. Ерискин [и др.] // Тез. докл. XLV международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва: МГУ, 2015. С. 166 (0,063 п. л. / 0,016 п. л.).

14. Распределение водорода и дейтерия в сборках из двух Zr, Ti и Ni фольг после воздействия импульсной дейтериевой высокотемпературной плазмы / А. А. Ерискин [и др.] // Тез. докл. XLV международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва: МГУ, 2015. С. 117 (0,063 п. л. / 0,016 п. л.).

15. Распределение водорода и дейтерия в сборке из двух W фольг после воздействия импульсной дейтериевой высокотемпературной плазмы / А. А. Ерискин [и др.] // Тез. докл. XLV международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва: МГУ, 2015. С. 118 (0,063 п. л. / 0,016 п. л.).

16. Распределение дейтерия и водорода в Zr, Ni и Ti сборках фольг при воздействии импульсной дейтериевой высокотемпературной плазмы / А. А. Ерискин [и др.] // Радиационная физика твердого тела: Труды XXV Международной конференции. Севастополь, 2015. С. 90-104 (0,938 п. л. / 0,234 п. л.).

17. Исследование распределения дейтерия и водорода в сборках Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta и Nb|CD₂|Nb, после воздействия высокотемпературной плазмы аргона на установке ПФ-4 / А. А. Ерискин [и др.] // Радиационная физика твердого тела: Труды XXV Международной конференции. Севастополь, 2015. С. 497-508 (0,75 п. л. / 0,188 п. л.).
18. The distribution of deuterium and hydrogen in Zr, Ni and Ti foil assemblies when exposed to pulsed high-temperature plasma of deuterium / A. A. Eriskin [et al.] // Badania materialowe na potrzeby elektrowni konwencjonalnych I jądrowych oraz przemysłu energetycznego: XXII Seminarium naukowo techniczne. Zakopane, 2015. P. 125-141 (1,063 п. л. / 0,266 п. л.).
19. Investigation of the distribution of deuterium and hydrogen in the assembly Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta and Nb|CD₂|Nb, after exposure by high temperature argon plasma at «Plasma Focus» set up (PF-4) / A. A. Eriskin [et al.] // Badania materialowe na potrzeby elektrowni konwencjonalnych I jądrowych oraz przemysłu energetycznego: XXII Seminarium naukowo techniczne. Zakopane, 2015. P. 143-152 (0,625 п. л. / 0,156 п. л.).
20. Ерискин А. А. [и др.] Исследование распределения дейтерия и водорода в сборках Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta и Nb|CD₂|Nb после воздействия высокотемпературной аргоновой плазмы на установке ПФ-4. Дубна, 2015. 13 с. (Препринт Объед. ин-та ядер. исслед., P13-2015-61) (0,813 п. л. / 0,203 п. л.).
21. Ерискин А. А. [и др.] Распределение дейтерия и водорода в Zr-, Ni- и Ti-сборках фольг при воздействии импульсной дейтериевой высокотемпературной плазмы. Дубна, 2015. 17 с. (Препринт Объед. ин-та ядер. исслед., P13-2015-62) (1,063 п. л. / 0,266 п. л.).
22. Нанесение покрытий в трубках на установке Плазменный фокус / А. А. Ерискин [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 11-й Международной конференции. Минск, 2015. С. 308-311 (0,25 п. л. / 0,05 п. л.).
23. Ерискин А. А. Защитные покрытия в тонких трубках, получаемые с помощью установки Плазменный фокус // Сборник трудов VI Всероссийской молодежной конференции по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики. Москва: ФИАН, 2015. С. 113 (0,063 п. л.).
24. Ерискин А. А. Исследование получения соединений несмешиваемых материалов с помощью высокотемпературной импульсной плазмы // Материалы Межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е. В. Арменского. Москва: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2016. 271 с. (0,063 п. л.).
25. Получение соединений несмешиваемых материалов W-Cu и W-Ag с помощью высокотемпературной плотной азотной плазмы на установке ПФ-4 / А. А. Ерискин [и др.] // Радиационная физика твердого тела: Труды XXVI Международной конференции. Севастополь, 2016. С. 61-67 (0,438 п. л. / 0,109 п. л.).
26. О содержании примесей в пленках, напыленных на установках типа Плазменный фокус / А. А. Ерискин [и др.] // Функциональные Наноматериалы и Высокочистые Вещества: Сборник материалов VI Международной конференции с элементами научной Школы для молодежи. Суздаль, 2016. С. 247-249 (0,125 п. л. / 0,031 п. л.).

Лицензия ЛР № 020832 от «15» октября 1993 г.

Подписано в печать «17» октября 2017 г. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1.

Тираж 100 экз. Заказ №___ Типография издательства НИУ ВШЭ,
125319, г. Москва, Кочновский пр-д., д. 3.