

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Булгадарян Даниэль Грантович

**Рассеяние протонов кэвных энергий как
инструмент анализа тонких слоев на
поверхности материалов ТЯР**

01.04.08 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ»

Научный руководитель: **Курнаев Валерий Александрович**
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики плазмы НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: **Афанасьев Виктор Петрович**
доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Общей физики и ядерного синтеза» Национального исследовательского университета «МЭИ»

Борисов Анатолий Михайлович
доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов» Национального исследовательского университета МАИ

Будаев Вячеслав Петрович
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела токамака Т-10 НИЦ «Курчатовский институт»

Защита состоится «18» ноября 2020 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета МИФИ.01.04 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 г.

Отзывы и замечания по автореферату в одном экземпляре, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических
наук



Степаненко А.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Взаимодействие плазмы с поверхностью обращенных к ней элементов в современных термоядерных установках с магнитным удержанием является одним из основных факторов, определяющих работоспособность установки, поскольку плазменное воздействие на обращенные к ней материалы приводит к модификации их физических свойств и эрозии, при этом продукты эрозии, попадая в плазму, также меняют ее параметры. Соответственно, одной из важнейших задач для осуществления управляемых термоядерных реакций в современных установках, таких как строящийся реактор ИТЭР, является диагностика процессов взаимодействия плазмы с поверхностью и контроль изменения состояния поверхности. Поскольку взаимодействие плазмы с поверхностью представляет из себя совокупность множества процессов энергетического, массового и зарядового обмена, то исследование всей этой совокупности в целом обычно достаточно затруднительно. Для упрощения задачи используются экспериментальные установки — плазменные симуляторы, на которых при помощи низкотемпературной плазмы или ионных пучков моделируются и исследуются отдельно взятые аспекты взаимодействия пристеночной плазмы термоядерных реакторов с обращенными к ней поверхностями. При этом основным недостатком является то, что состояние поверхности обычно исследуется *ex situ*, то есть уже после плазменного воздействия, что не позволяет отслеживать динамику модификации поверхности. Данная работа посвящена применению спектроскопии рассеяния ионов водорода кэвных энергий для *in situ* анализа тонких слоев, образующихся в процессе перепыления и эрозии материалов термоядерных установок с магнитным удержанием плазмы.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью данной работы является разработка метода исследования поверхности обращенных к плазме материалов при помощи спектроскопии рассеяния ионов водорода кэвных энергий непосредственно во время модификации поверхности и исследование аналитических возможностей этого метода для комбинаций материалов с резко отличающейся атомной массой, характерных

для современных термоядерных установок. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведено компьютерное моделирование процессов отражения атомов водорода кэвных энергий от материалов ТЯР, на основании которого определены оптимальные параметры спектроскопии, позволяющей определять толщину поверхностной пленки по энергетическим спектрам рассеянных ионов.
2. Модернизирована лабораторная установка «Большой масс-монохроматор МИФИ» для экспериментальной реализации методики спектроскопии рассеяния ионов водорода кэвных энергий.
3. Проведены серии экспериментов, доказывающие возможность применения спектроскопии рассеяния ионов водорода кэвных энергий для анализа поверхности обращенных к плазме материалов непосредственно в процессе их модификации.
4. Разработана концепция встраиваемого анализатора, позволяющая реализовать данную методику в термоядерных установках с магнитным удержанием. Спроектирован и испытан на линейном симуляторе макет встраиваемого анализатора.

Научная новизна

1. Впервые экспериментально продемонстрирована применимость спектроскопии рассеяния ионов водорода кэвных энергий для анализа поверхностных слоев в нанометровом диапазоне толщин, если атомная масса поверхностного слоя сильно отличается от атомной массы подложки.
2. Впервые спектроскопия рассеяния ионов водорода кэвных энергий использована для контроля толщины осаждаемого слоя непосредственно в процессе осаждения, реализованная методика подтверждена патентом на изобретение.

3. Впервые продемонстрирована возможность непосредственного контроля с помощью спектроскопии рассеяния протонов деградации наноструктурированной поверхности вольфрама в процессе облучения.
4. Разработана и экспериментально проверена концепция применения встраиваемого непосредственно в плазменную установку с собственным магнитным полем анализатора энергетических спектров рассеянных от поверхности протонов кэВных энергий, позволяющим определять ее состав.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость заключается в создании экспериментальной базы данных по взаимодействию ионов водорода кэВных энергий с тонкими слоями вещества, позволяющая уточнить возможности применения существующих компьютерных кодов для описания взаимодействия плазмы с поверхностью. Разработанная методика и прибор могут быть применены для анализа процессов эрозии и переосаждения в термоядерных установках, а также в качестве средства анализа характеристик поверхностных пленок в нанометровом диапазоне толщин в других областях науки и техники, таких как, например, наноэлектроника.

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерности формирования энергетических спектров ионов водорода в диапазоне начальных энергий 5–25 кэВ при отражении от двуслойных мишеней с различающимися атомными массами и структурой.
2. Экспериментальные данные по энергетическим спектрам ионов водорода при их рассеянии от двуслойных мишеней с различающимися значениями средней атомной массы слоев, позволяющие определить толщину осажденного на подложку тонкого слоя вещества.
3. Способ определения скорости эрозии и осаждения тонких слоев на обращенных к плазме элементах плазменных установок.
4. Метод непосредственного контроля с помощью спектроскопии рассеяния протонов деградации наноструктурированной поверхности вольфрама в процессе ионного облучения.

5. Концепция встраиваемого анализатора процессов эрозии и переосаждения, позволяющего реализовать данную методику непосредственно в плазменной установке с собственным магнитным полем.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных результатов обусловлена их повторяемостью, а также сопоставимостью экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования. Анализ результатов исследований основан на современных научных представлениях о взаимодействии ионов с поверхностью и физических свойствах изучаемых материалов. Основные результаты диссертации были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях:

1. XXIII конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (Москва, 2020)
2. XXIV International Conference on Ion-Surface Interactions (Москва, 2019)
3. XI Конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение» (Москва, 2018)
4. 9th International Workshop on High-Resolution Depth Profiling (Упсала, Швеция, 2018)
5. 5th International Symposium on Liquid metals Applications for Fusion (Москва, 2017)
6. 22nd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions (Дрезден, Германия, 2017)
7. XXIII International Conference on Ion-Surface Interactions (Москва, 2017)
8. XVII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» (Звенигород, 2017)
9. XX конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (Москва, 2017)

10. 7th International Workshop & Summer School on Plasma Physics (Китен, Болгария, 2016)

Работы по теме диссертации выполнялись автором в качестве исполнителя в рамках государственного контракта № Н.4Х241.9Б.17.1007 на выполнение научно-исследовательской работы (заказчик — Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом») и гранта Российского научного фонда № 17-12-01575 «Новые методы *in situ* диагностики взаимодействия плазмы с поверхностью».

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 9 печатных работах, из них 6 статей в рецензируемых журналах [1]–[6], 3 статьи в сборниках трудов конференций [7]–[9]. Получен патент на изобретение № 2655666 «Способ определения скорости эрозии и осаждения тонких слоев на обращенных к плазме элементах плазменных установок (варианты)» [10].

Личный вклад автора

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Компьютерное моделирование и обработка его результатов, а также обработка экспериментальных данных выполнены лично автором. Проведение экспериментов осуществлялось совместно с соавторами. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором либо на паритетной основе с соавторами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 116 страниц, включая 65 рисунков. Библиография содержит 149 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана

теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе рассмотрены основные методы анализа поверхности обращенных к плазме элементов (ОПЭ) термоядерных установок (ТЯУ). Наиболее распространенными диагностическими средствами являются методы, основанные на использовании ионных пучков Мэвных энергий, однако их реализация для *in situ* использования в ТЯУ является весьма дорогостоящей. Поэтому для анализа поверхности ОПЭ предложено использовать модификацию методики LEIS с диагностическим пучком ионов водорода вместо обычно используемых инертных газов, поскольку первые имеют гораздо меньшую вероятность нейтрализации, что позволяет проводить анализ толщины поверхностного слоя, а также обладают наименее разрушающим среди всех ионов воздействием на анализируемую мишень.

Во второй главе описаны результаты компьютерного моделирования в коде SCATTER [11] отражения частиц водорода от двухслойных мишеней, состоящих из подложки и поверхностного слоя толщиной 1–35 нм с сильно отличающейся атомной массой, что релевантно материалам ОПЭ ТЯУ. Показано, что при использовании пучка частиц с начальными энергиями в диапазоне $E_0 = 5 \dots 25$ кэВ при углах рассеяния $\theta = 30^\circ \dots 60^\circ$ спектроскопия рассеяния протонов кэвных энергий позволяет связать параметры пиков на энергетических спектрах отраженных частиц с толщиной поверхностного слоя.

В разделе 2.1 показано, что в случае наличия легкого слоя на тяжелой подложке (рис. 1) налетающие частицы отражаются преимущественно от подложки, испытывая неупругие потери энергии в поверхностном слое. Толщина этого слоя определяется по положению пика на энергетическом спектре.

В разделе 2.2 рассмотрен противоположный случай наличия тяжелого поверхностного слоя на легкой подложке (рис. 2), при этом толщина поверхностного слоя определяется по полуширине пика на энергоспектре отраженных частиц.

Показано, что увеличение E_0 и θ в обоих случаях приводит к увеличению максимальной глубины анализа. Однако это же уменьшает коэффициент

отражения частиц, что может затруднить измерение тока рассеянных частиц при проведении эксперимента.

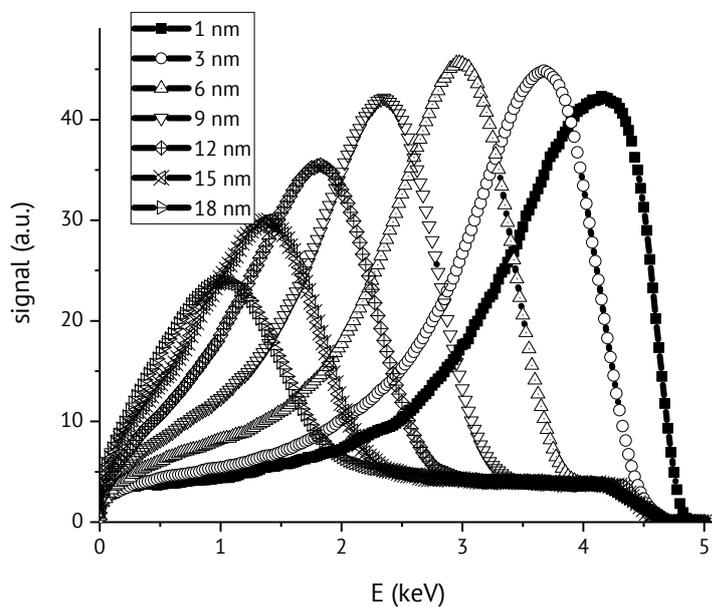


Рис. 1: Энергетические спектры ионов водорода с начальной энергией $E_0 = 5$ кэВ, отраженных от мишени из вольфрама с тонким поверхностным слоем бериллия разной толщины, $\theta = 60^\circ$

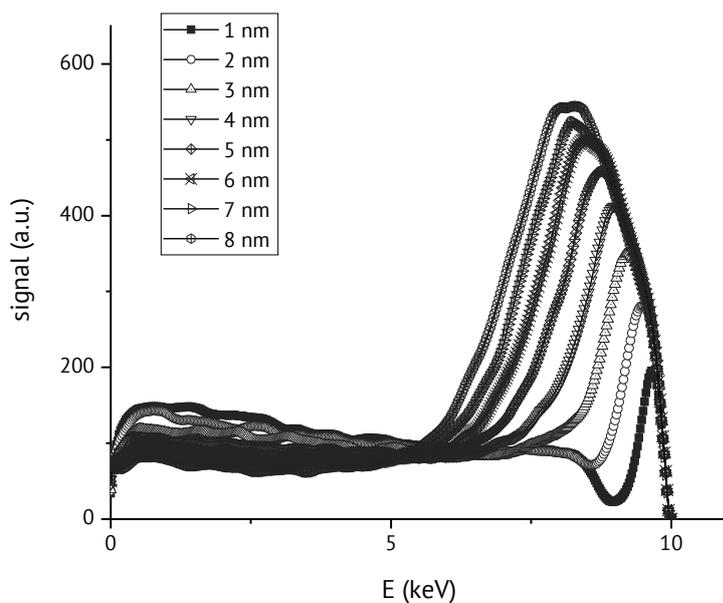


Рис. 2: Энергетические спектры ионов водорода с начальной энергией $E_0 = 10$ кэВ, отраженных от мишени из бериллия с тонким поверхностным слоем вольфрама разной толщины, $\theta = 60^\circ$

В третьей главе приведены результаты экспериментов по применению спектроскопии рассеяния протонов кэвных энергий для *in situ* анализа толщины поверхностных слоев в процессе их осаждения.

В разделе 3.1 приведено описание установки «Большой масс-монокроматор МИФИ», на которой проводились все описанные в данной главе эксперименты.

В разделе 3.2 описаны эксперименты по осаждению золота на кремний и наоборот, кремния на золото. Выбор этих материалов был обусловлен неокисляемостью золота, позволяющей проводить дополнительный анализ осажденного слоя после выноса полученного образца на атмосферу, а также широкой распространенностью тонких слоев Au и Si в микро- и нанoeлектронике [12]—[14]. Для нанесения поверхностных слоев использовалось термическое осаждение и перепыление ионным пучком Xe^+ (IBSD). Полученная динамика изменения энергетических спектров протонов, отраженных от анализируемых мишеней в процессе осаждения на них материалов, в обоих случаях качественно совпадает с результатами компьютерного моделирования. Проведение независимых измерений толщины поверхностного слоя после окончания экспериментов по осаждению позволило однозначно сопоставить параметры энергетических спектров с толщиной осаждаемого слоя, учитывая их линейную зависимость (рис. 3, рис. 4). Нелинейность зависимости полуширины пиков (FWHM) от дозы Xe^+ на рис. 3 на начальной стадии эксперимента может быть связана с влиянием на осаждаемые слои рассеянных от золотой пластины частиц Xe [15] и проникновением распыленных атомов Au с энергиями гораздо выше тепловых в кремниевую подложку, что может приводить к образованию смешанного межслоя [16]. При термическом осаждении золота подобный эффект не наблюдался. Показано, что для условий эксперимента ($E_0 = 25$ кэВ, $\theta = 38^\circ$) максимальная анализируемая толщина слоя золота на кремнии составляет ~ 7 нм, а кремния на золоте — ~ 40 нм, с максимальной ошибкой определения толщины $\pm 0,8$ нм.

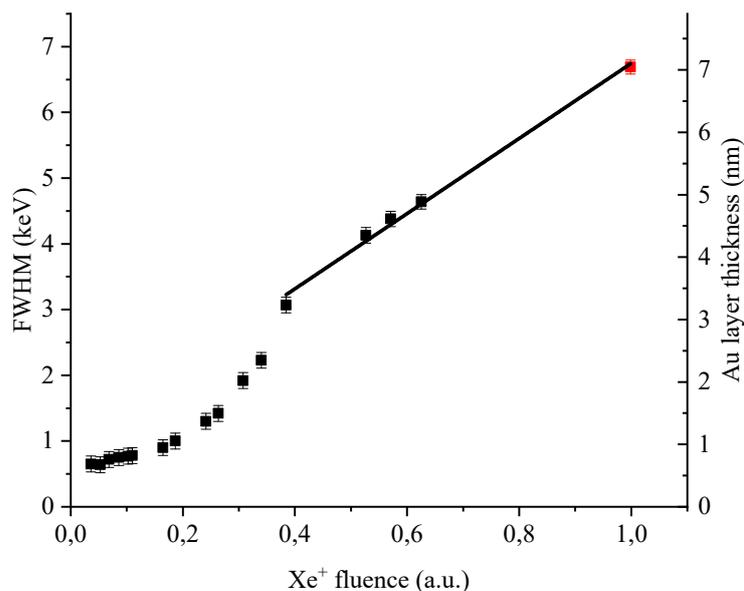


Рис. 3: Эволюция FWHM пиков Au во время IBSD эксперимента. Красная точка соответствует толщине, измеренной независимо с помощью РФЭС (7 нм). Правая ось ординат показывает толщину слоя Au, рассчитанную исходя из ее линейной зависимости от FWHM и нормированной на независимо измеренное с помощью РФЭС значение

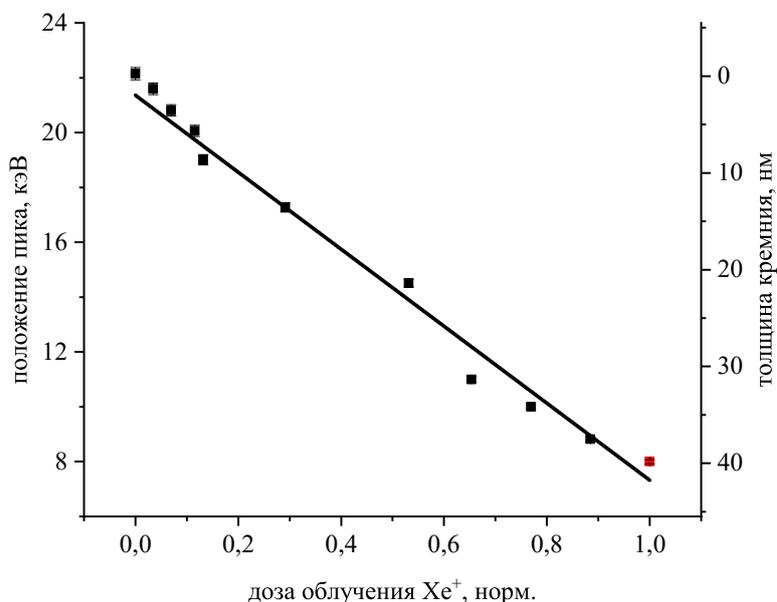


Рис. 4: Зависимость положения пиков на энергетических спектрах отраженных протонов в процессе IBSD Si от дозы Xe⁺. Красная точка соответствует толщине 40 нм, измеренной независимо профилометром. На правой оси ординат отложена толщина слоя Si, рассчитанная исходя из ее линейной зависимости от положения пика и нормированная на измеренное значение

Раздел 3.3 посвящен результатам экспериментов по термическому осаждению лития на вольфрам с контролем осаждаемого слоя спектроскопией рассеяния протонов кэВных энергий и кварцевым измерителем толщины. Выбор лития обусловлен его применением как для кондиционирования поверхности ОПЭ [17], так и в качестве альтернативного материала дивертора [18], [19]. Литий помещался в стальной короб с затвором и нагревался радиационными нагревателями до контролируемой термодарой температуры 430 °С, после чего затвор открывался, и происходило осаждение испаренного лития на мишенный узел, состоящий из кварцевого измерителя толщины (на основе кристалла, произведенного фирмой Inficon) и закрепленных на нем вольфрамовых мишеней (20 × 10 × 0,3 мм) с зазором между ними 1 мм. После окончания эксперимента по осаждению лития проводилась выдержка полученного образца в остаточном вакууме в течение двух суток при периодическом снятии энергетических спектров для наблюдения за их трансформацией при взаимодействии образца с компонентами остаточного газа.

Динамика изменения энергетических спектров протонов, отраженных от вольфрамовых мишеней в процессе осаждения на них лития, соответствовала предсказаниям компьютерного моделирования и экспериментам по осаждению кремния на золото. На рис. 5 показана зависимость положения пика протонов от толщины слоя лития, измеренного кварцевым микробалансом. Зависимость является линейной на участке от 10 нм до максимально возможной анализируемой для данных условий эксперимента ($E_0 = 25$ кэВ, $\theta = 38^\circ$) толщины 55 нм, после которой энергетические спектры отраженных протонов перестают изменяться. Нелинейность зависимости при малых толщинах осаждаемого слоя может быть объяснена неоднородностью литиевой пленки в начале ее роста. Погрешность определения толщины, обусловленная, в первую очередь, разрешением энергоанализатора, составила $\pm 2,5$ нм.

Энергетические спектры, снятые в процессе выдержки образца с осажденным литием в остаточном вакууме, парциальное давление компонентов которого контролировалось квадрупольным масс-спектрометром, свидетельствуют о большом насыщении напыленного слоя водородом, а также появлением на поверхности литиевой пленки более тяжелых, чем литий, атомов кислорода.

Оба этих фактора объясняются образованием на поверхности осажденного слоя гидроксида лития по следующей схеме: $2\text{Li} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{LiOH} + \text{H}_2$, что характерно для лития ниже температуры плавления [20]. Таким образом, показано, что спектроскопия рассеяния протонов кэВных энергий является чувствительной к изменению среднего атомного номера анализируемой мишени и наличию кислорода на ее поверхности.

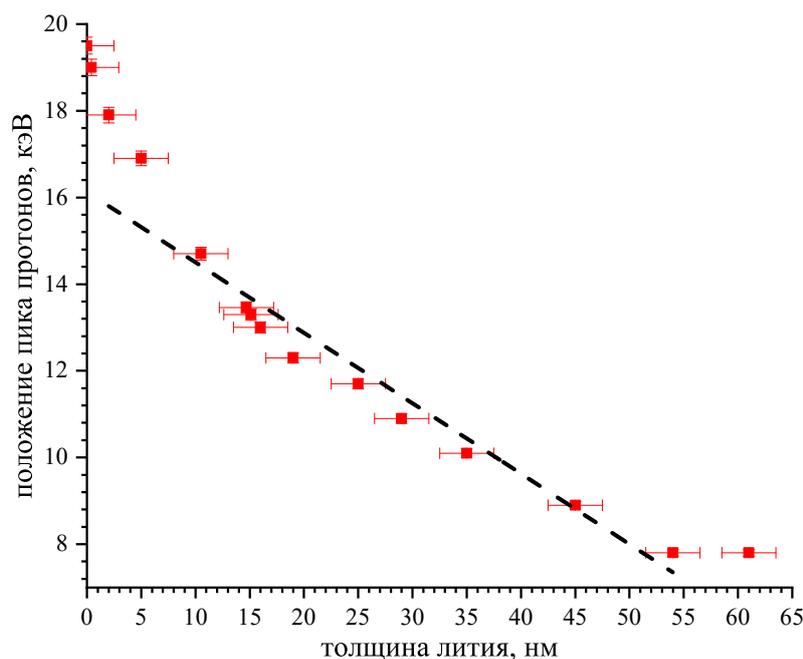


Рис. 5: Зависимость положения пика протонов, рассеянных на образце со слоем лития на вольфраме, от толщины плёнки лития

В разделе 3.4 описано применение спектроскопии рассеяния протонов кэВных энергий для анализа вольфрамового нанопуха — особой наноструктуры, появление которого наблюдалось на линейных симуляторах и токамаках при воздействии гелиевой плазмы с параметрами, ожидаемыми на ИТЭР [21], [22] (доза $\sim 10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-2}$, $T \sim 1000 - 2000 \text{ К}$ и энергия ионов $\sim 20 - 200 \text{ эВ}$). Образование пуха на обращенной к плазме поверхности приводит к значительным изменениям в ее взаимодействии с плазмой, например, способствует зажиганию дуг [23].

Энергетические спектры протонов, отраженных от образца с пухом при нескольких энергиях первичного пучка, демонстрируют двухпиковую струк-

туру (рис. 6), что нехарактерно для однокомпонентных мишеней. В нашем случае можно считать, что анализируемый образец состоит из двух компонентов: слоя пуха и лежащего под ним вольфрама, которые отличаются только плотностью. Поэтому было предположено, что высокоэнергетический пик соответствует отражению от пуха, а низкоэнергетический — от вольфрамовой подложки. С увеличением энергии первичного пучка большая доля первичных частиц проходит через слой пуха и отражается от вольфрама, что приводит к увеличению амплитуды пика более низкой энергии. Дальнейшие эксперименты по облучению образца с пухом пучком Ar^+ показали справедливость этого предположения. СЭМ-анализ толщины слоя пуха до и после двух этапов облучения пучком Ar^+ позволил определить пробег протонов в слое пуха и оценить среднюю плотность удаленной аргонным пучком части слоя пуха по сравнению с чистым вольфрамом как $\sim 1/94$. Таким образом, показана применимость спектроскопии рассеяния протонов кэВных энергий для анализа слоев не только с различной атомной массой, но и плотностью, что позволяет определять среднюю плотность слоя вольфрамового нанопуха непосредственно в установке *in vacuo*.

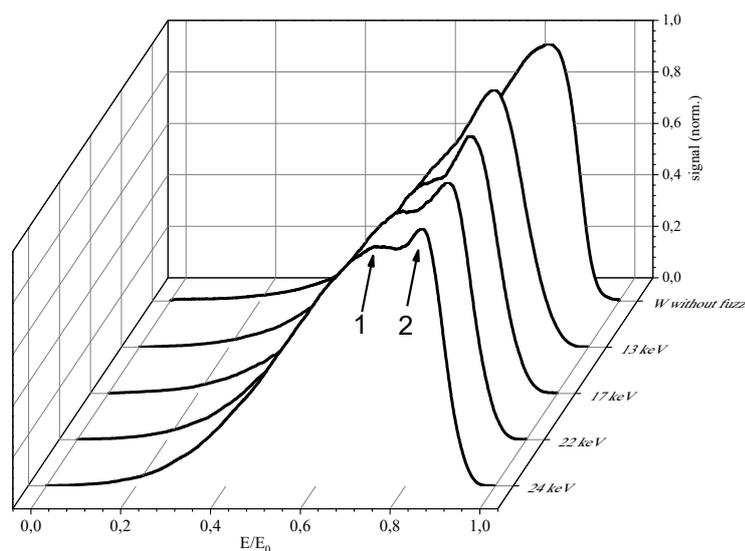


Рис. 6: Энергетические спектры протонов, отраженных от анализируемых образцов с пухом, и спектр от чистого вольфрама без пуха. Пик 1 — отражение от вольфрамовой подложки, пик 2 — вклад в отражение от поверхностного слоя пуха

В четвертой главе описана концепция применения спектроскопии рассеяния протонов кэвных энергий для анализа процессов эрозии и переосаждения непосредственно в термоядерных установках с собственным магнитным полем и результаты разработки и испытания встраиваемого в линейный симулятор ПР-2 анализатора, работающего на этом принципе.

В разделе 4.1 продемонстрированы оценки применимости методики непосредственно в ТЯУ. Общая схема реализации показана на рис. 7. Для этого предлагается установить на обращенном к плазме элементе термоядерной установки с сильным продольным магнитным полем малогабаритный анализатор, включающий в себя источник ионов водорода кэвных энергий и детектор отраженных от стенки ионов. Ионы водорода будут отражаться от анализируемой области стенки на расстоянии от источника, определяемом энергией ионов и величиной магнитного поля. Отраженные от анализируемого участка ионы будут двигаться по траекториям с различным радиусом в зависимости от своей энергии и попадать на ионно-электронный конвертор.

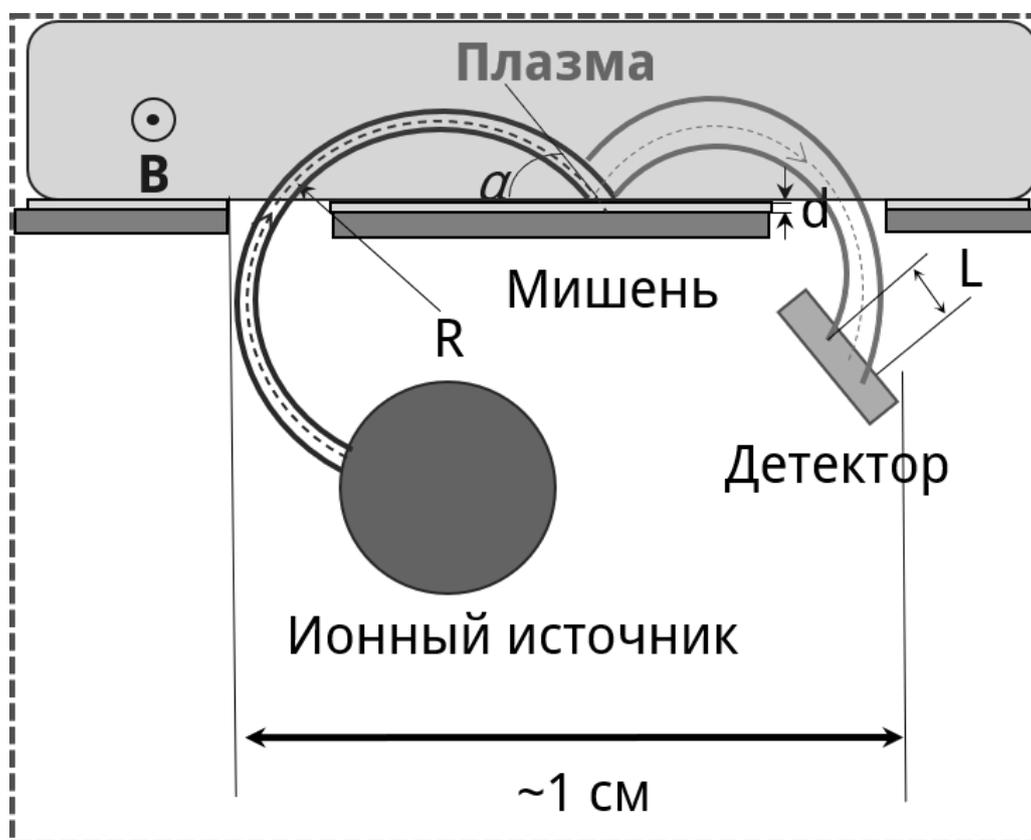


Рис. 7: Принципиальная схема работы встраиваемого анализатора поверхности по ионному рассеянию для применения в термоядерных установках

Эмитированные из конвертора электроны, ведомые сильным магнитным полем установки, попадая, в свою очередь, на позиционно-чувствительный детектор, позволяют зарегистрировать энергетический спектр отраженных ионов. В качестве подобного детектора можно использовать, например, прибор на основе микроканальных пластин. Источник ионов и коллектор располагаются на большем, чем анализируемая поверхность, расстоянии от центра плазменного шнура за небольшими щелями и поэтому не участвуют в поверхностно-плазменном взаимодействии. При магнитном поле 3 Тл и энергии начального пучка протонов 8 кэВ размеры такого анализатора не превышают нескольких кубических сантиметров, поэтому возможна установка таких приборов в разных важных для анализа областях термоядерных установок.

Проведены оценки длины свободного пробега и изменения энергии диагностических частиц в пристеночном слое плазмы с параметрами, характерными для токамака JET. Показано, что рассеянием первичных и отраженных от анализируемой мишени частиц в слое периферийной плазмы можно пренебречь.

В разделе 4.2 описана разработка и тестирование макета встраиваемого анализатора поверхности на линейном симуляторе пристеночной плазмы ПР-2. Экспериментальный макет анализатора размером $40 \times 300 \times 250$ мм, состоящий из ионного источника, анализируемой мишени и детектора отраженных от нее ионов, был помещен в магнитную «пробку» установки. В течение эксперимента магнитное поле в пробке ПР-2 на оси составляло 0,15 Тл. Для создания ионного пучка использовался источник на основе разряда Пеннинга с коаксиальными анодом из нержавеющей стали и катодами из LaB₆. Извлечение ионов осуществлялось радиально через продольную щель. Ускоряющее напряжение изменялось вплоть до 5 кВ, что соответствует максимально допустимому в данной геометрии установки ларморовскому радиусу протонов $R_{Lp} = 6,7$ см. Угол падения протонов на мишень составлял $\alpha = 20^\circ$, что соответствует скользящему падению и формированию достаточно узкой индикатрисы рассеяния частиц вблизи угла зеркального отражения.

В качестве пространственно-чувствительного детектора использовалась микроканальная пластина МКПО 25-10У, установленная на передвижную каретку. Для передвижения МКП использовался компьютерно-управляемый

шаговый двигатель, что позволило автоматически пересчитывать координаты МКП в энергию детектируемых частиц. Фактический коэффициент усиления МКП составил ~ 500 , а энергетическое разрешение системы детектирования отраженных протонов — 150 эВ, что соответствует точности измерения толщины осаждаемых или эродированных поверхностных слоев ~ 1 нм.

Описан эксперимент по осаждению углерода на золото непосредственно в установке ПР-2. Для осаждения углерода использовалось разложение пропана в тлеющем разряде, зажигаемом между золотой мишенью и корпусом макета анализатора при напряжении 1 кВ и давлении 0,1 мбар. Образующие при этом ионы углерода осаждались на вольфрамовую подложку, выступавшую в роли катода. Изменение состояния поверхности мишени от вольфрама до осажденного углерода определялось по энергетическим спектрам отраженных от нее протонов, показанным на рис. 8.

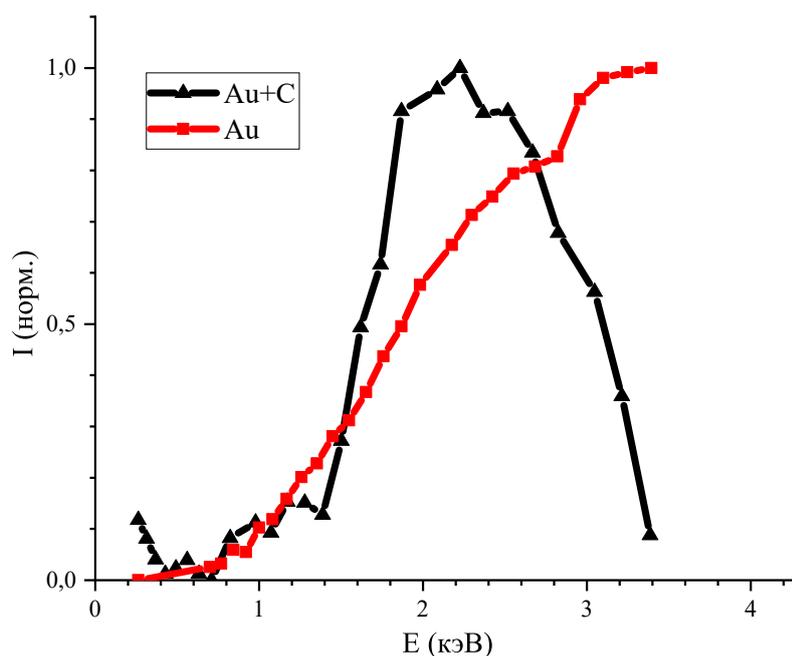


Рис. 8: Энергетические спектры протонов с $E_0 = 4,5$ кэВ, отраженных от золотой мишени до и после осаждения на нее слоя углерода

Таким образом, продемонстрирована чувствительность методики к появлению поверхностной пленки с отличающейся от подложки атомной массой на исследуемом образце.

В заключении приведены основные результаты данной диссертационной работы:

1. На основании анализа литературных данных предложено использовать спектроскопию рассеяния протонов кэвных энергий для анализа толщины тонких осажденных/эродировавших поверхностных слоев.
2. Проведено компьютерное моделирование, продемонстрировавшее применимость спектроскопии рассеяния протонов кэвных энергий для определения толщины поверхностных слоев в диапазоне толщин до десятков нм в случае, если атомная масса поверхностного слоя сильно отличается от атомной массы подложки, что релевантно материалам ОПЭ термоядерных установок. Показано, что в случае наличия легкого слоя на тяжелой подложке толщина этого слоя коррелирует с положением пика на энергетическом спектре отраженных протонов, а в противоположном случае наличия тяжелого слоя на поверхности легкого — с полушириной пика.
3. Применимость спектроскопии рассеяния протонов кэвных энергий для анализа толщины тонких пленок показана экспериментально. Методика применена для *in situ* анализа осаждения золота на кремний и кремния на золото, а также лития на вольфрам. Для условий проведенных экспериментов ($E_0 = 25$ кэВ, $\theta = 38^\circ$, разрешение энергоанализатора 0,01) получены следующие результаты:
 - а. максимальная измеримая толщина слоя золота при осаждении на кремний составляет ~ 7 нм при погрешности $\leq 0,5$ нм;
 - б. в противоположном случае осаждения кремния на золото максимальная измеримая толщина поверхностного слоя кремния составляет $\sim 40 \pm 0,8$ нм;
 - в. при осаждении лития на вольфрам возможно измерение толщины поверхностного слоя вплоть до толщины 55 нм с погрешностью $\pm 2,5$ нм.

4. Использование спектроскопии рассеяния протонов кэвных энергий позволило оценить плотность вольфрамового нанопуха, что свидетельствует о применимости методики и для анализа слоев с одинаковой атомной массой, но сильно отличающейся плотностью.
5. Предложена схема реализации методики для анализа процессов эрозии и/или переосаждения непосредственно в термоядерных установках с собственным магнитным полем.
6. Разработан и испытан на линейном симуляторе с магнитным полем макет встраиваемого анализатора поверхности. Экспериментально продемонстрирована возможность контроля состава поверхности методом рассеяния ионов водорода низких энергий при осаждении слоя в разряде непосредственно на плазменной установке с собственным магнитным полем.

Основные публикации по теме диссертации

- [1] D. Bulgadaryan, D. Kolodko, V. Kurnaev и D. Sinelnikov, «Facility and the method for MEIS analysis of layers redeposited in plasma devices,» *Journal of Physics: Conference Series*, т. 748, № 1, с. 012 016, сент. 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/748/1/012016.
- [2] D. Bulgadaryan, V. Kurnaev, D. Sinelnikov и N. Efimov, «On the possibility of thin layers thickness determination with low energy proton scattering,» *Journal of Physics: Conference Series*, т. 941, № 1, с. 012 022, дек. 2018, ISSN: 1742-6588. DOI: 10.1088/1742-6596/941/1/012022.
- [3] D. Bulgadaryan, D. Sinelnikov, V. Kurnaev, S. Kajita, D. Hwangbo и N. Ohno, «Proton scattering from tungsten fuzz,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, т. 434, с. 9—12, 1 нояб. 2018, ISSN: 0168-583X. DOI: 10.1016/j.nimb.2018.07.038.
- [4] D. Bulgadaryan, D. Sinelnikov, V. Kurnaev, N. Efimov, P. Borisyyuk и Y. Lebedinskii, «Application of keV-energy proton scattering for thin film analysis,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, т. 438, с. 54—57, January 2019 2019, ISSN: 0168583X. DOI: 10.1016/j.nimb.2018.10.043.
- [5] D. G. Bulgadaryan, D. N. Sinelnikov, I. A. Sorokin, V. A. Kurnaev, and N. E. Efimov, “Built-In Surface Analyzer for Plasma Devices with Magnetic Field”, *Phys. Atom. Nuclei*, vol. 82, no. 10, pp. 1364–1367, Dec. 1, 2019, ISSN: 1562-692X. DOI: 10.1134/S1063778819100089.
- [6] Д. Г. Булгадарян, Д. Н. Синельников, Н. Е. Ефимов и В. А. Курнаев, «Применение спектроскопии рассеяния протонов кэвных энергий для анализа осаждения лития на вольфрам», *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, т. 84, № 6, с. 903—907, 2020, ISSN: 0367-6765. DOI: 10.31857/S036767652006006X.
- [7] D. Sinelnikov, D. Bulgadaryan, V. Kurnaev и N. Efimov, «Scattering of hydrogen ion beam from tungsten fuzz,» в *ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНОВ*

С ПОВЕРХНОСТЬЮ ВИП-2017 труды XXIII Международной конференции., Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2017, с. 235—238. url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30639646>.

- [8] D. Bulgadaryan, D. Sinelnikov и V. Kurnaev, «MEIS analysis of Li layers deposition,» в *5TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIQUID METALS APPLICATIONS FOR FUSION book of abstracts and scientific programme.*, Moscow: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 27 сент. 2017, с. 66. url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32559791>.
- [9] D. Bulgadaryan, D. Sinelnikov, V. Kurnaev, and N. Efimov, “Application of kev-energy proton scattering for surface analysis”, presented at the 24th International Conference on Ion-Surface Interactions (ISI-2019), Moscow: National Research Nuclear University MEPhI, 2019, pp. 174–177. [Online]. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41169468> (visited on 03/30/2020).
- [10] В. А. Курнаев, Д. Г. Булгадарян и Д. Н. Синельников, «Способ определения скорости эрозии и осаждения тонких слоев на обращенных к плазме элементах плазменных установок (варианты)», пат. 2 655 666, 29 мая 2018. url: http://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2655666&TypeFile=html.

Цитированная литература

- [11] N. N. Koborov, A. I. Kuzovlev, V. A. Kurnaev, V. S. Remizovich и N. N. Trifonov, «Energy distributions of particles transmitted through free foils at oblique incidence,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, т. 129, № 1, с. 5—10, 1997, ISSN: 0168583X. url: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0031168115&partnerID=tZ0tx3y1>.
- [12] D. Yamaura и Т. Ogino, «Fabrication of Si-nanowires controlled by spontaneously formed nanoholes on annealed Au thin films,» *Materials Science in Semiconductor Processing*, т. 53, с. 28—35, 2016, ISSN: 13698001. DOI: 10.1016/j.mssp.2016.05.018.
- [13] J. H. Kim, D. H. Shin, H. S. Lee, C. W. Jang, J. M. Kim, S. W. Seo, S. Kim и S.-H. Choi, «Enhancement of efficiency in graphene/porous silicon solar cells by co-doping of graphene with gold nanoparticles and bis(trifluoromethanesulfonyl)-amide,» *J. Mater. Chem. C*, т. 5, с. 9005—9011, Cvd 2017, ISSN: 2050-7526. DOI: 10.1039/C7TC02686B.
- [14] A. Vinod, M. S. Rathore и S. R. Nelamarri, «Investigation of electrical and compositional properties of SiO₂/Au/SiO₂ for nonvolatile memory application,» *Applied Physics A*, т. 124, № 8, с. 548, 2018, ISSN: 0947-8396. DOI: 10.1007/s00339-018-1961-2.
- [15] M. Mateev, T. Lautenschläger, D. Spemann, A. Finzel, J. W. Gerlach, F. Frost и C. Bundesmann, «Systematic investigation of the reactive ion beam sputter deposition process of SiO₂,» *The European Physical Journal B*, т. 91, № 2, с. 45, 2018, ISSN: 1434-6028. DOI: 10.1140/epjb/e2018-80453-x.
- [16] J. Derrien, C. Cohen, A. Cros, J. M. Layet, F. Salvan, F. Abel, J. C. Boulliard, J. L. Domange и M. Sotto, «Au on Si (111): A study of the interface under UHV conditions and its modifications in air by surface techniques and MeV ion scattering,» *Applied Physics Letters*, т. 39, № 11, с. 915—917, 1981, ISSN: 00036951. DOI: 10.1063/1.92605.

- [17] R. Kaita, “Fusion applications for lithium: Wall conditioning in magnetic confinement devices”, *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. 61, no. 11, p. 113 001, Oct. 2019, ISSN: 0741-3335. DOI: 10.1088/1361-6587/ab4156.
- [18] L. E. Zakharov, “On a burning plasma low recycling regime with $P_{DT} = 23\text{--}26$ MW, $Q_{DT} = 5\text{--}7$ in a JET-like tokamak”, *Nucl. Fusion*, vol. 59, no. 9, p. 096 008, Jul. 2019, ISSN: 0029-5515. DOI: 10.1088/1741-4326/ab246b.
- [19] L. E. Zakharov, J. P. Allain, S. X. Bennett, M. A. E. Abdelghany, and D. G. Bulgadaryan, “Low Recycling Divertor for JET Burning Plasma Regime ($P_{\text{DT}} > 25$ MW, $Q_{\text{DT}} > 5$), Insensitive to Plasma Physics”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 48, no. 6, pp. 1849–1856, Jun. 2020, ISSN: 0093-3813, 1939-9375. DOI: 10.1109/TPS.2019.2953591.
- [20] I. E. Lyublinski, A. V. Vertkov, and V. A. Evtikhin, “Application of lithium in systems of fusion reactors. 1. Physical and chemical properties of lithium”, *Plasma Devices and Operations*, vol. 17, no. 1, pp. 42–72, Mar. 2009, ISSN: 1051-9998, 1029-4929. DOI: 10.1080/10519990802703277.
- [21] M. Baldwin и R. Doerner, «Formation of helium induced nanostructure ‘fuzz’ on various tungsten grades,» *Journal of Nuclear Materials*, т. 404, № 3, с. 165—173, сент. 2010, ISSN: 00223115. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2010.06.034.
- [22] G. Wright, D. Brunner, M. Baldwin, R. Doerner, B. Labombard, B. Lipschultz, J. Terry и D. Whyte, «Tungsten nano-tendrils growth in the Alcator C-Mod divertor,» *Nuclear Fusion*, т. 52, № 4, с. 042 003, апр. 2012, ISSN: 0029-5515. DOI: 10.1088/0029-5515/52/4/042003.
- [23] J. Matějčiček, V. Weinzettl, M. Vilémová, T. W. Morgan, G. De Temmerman, M. Dimitrova, J. Cavalier, J. Adámek, J. Seidl и A. Jäger, «ELM-induced arcing on tungsten fuzz in the COMPASS divertor region,» *Journal of Nuclear Materials*, т. 492, с. 204—212, авг. 2017, ISSN: 00223115. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2017.05.032.

Научное издание

Булгадарян Даниэль Грантович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Рассеяние протонов кэвных энергий как инструмент анализа тонких слоев на
поверхности материалов ТЯР