

*На правах рукописи*

**Мамедов Никита Вадимович**

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ  
СПЕКТРОСКОПИИ ИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ И  
УСТАНОВКА ДЛЯ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ**

Специальность: 01.04.08 - физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва - 2013

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

**Научный руководитель:**

Доктор физико-математических наук, профессор Курнаев Валерий Александрович

**Официальные оппоненты:**

Вайсберг Олег Леонидович доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ИКИ РАН

Волков Степан Степанович доктор физико-математических наук, профессор кафедры электронной техники и технологии РГРТУ

**Ведущая организация:** Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится 18 декабря 2013 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 при НИЯУ МИФИ. Адрес: 115409 Москва, Каширское ш. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан 18 ноября 2013г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-  
математических наук



Р.С.Стариков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В создаваемом в настоящее время первом экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР большое внимание уделяется явлениям, сопровождающим взаимодействие плазмы с поверхностью окружающих плазму элементов (ОПЭ) реактора. Это связано с тем, что под воздействием потоков частиц и излучений, происходит их эрозия, изменение физических свойств, в результате распыления материалов плазма загрязняется, а в стенках накапливается тритий, количество которого ограничено требованиями безопасности.

При диагностике взаимодействия плазмы с поверхностью именно регистрация изменения самой поверхности в процессе такого воздействия является наиболее сложной задачей, так как при этом происходит множество процессов, включая обмен веществом, зарядами и энергией между плазмой и стенкой. Как следствие, невозможно выделить и изучить физику какого-то процесса в отдельности. Это становится возможным с использованием лабораторных установок, позволяющих промоделировать определенный процесс с известными и фиксированными параметрами облучения и получить информацию об изменении свойств поверхности при взаимодействии. Для моделирования используется либо низкотемпературная плазма в так называемых плазменных симуляторах, либо ионные пучки, при этом род и энергия частиц могут быть точно заданы, а поток частиц на поверхность измерен с достаточной точностью. Однако в существующих плазменных симуляторах анализ поверхности проводится, как правило, после окончания облучения, что не позволяет проследить динамику поверхностно-плазменного взаимодействия.

В данной работе для анализа поверхности непосредственно в процессе плазменного воздействия предложено использовать спектроскопию ионного рассеяния.

### **Цель диссертационной работы:**

Целью данной работы является разработка установки, аппаратуры и методик для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью при одновременном контроле элементного состава и толщины пленки на поверхности с помощью спектроскопии ионного рассеяния.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Создать экспериментальную установку, позволяющую воздействовать на поверхность плазменным/ионным облучением и одновременно проводить ее анализ с помощью спектроскопии рассеяния ионов низких и средних энергий.

2. Создать встраиваемый источник плазмы и её компонент для исследования *in situ* взаимодействия плазмы с поверхностью совместимый с методикой ионного рассеяния.

3. Разработать аппаратуру и методики измерения энергетических спектров отраженных и выбитых из мишени ионов для одновременного определения ее элементного состава и толщины пленки на поверхности и проверить работоспособность аппаратуры и методик на некоторых типичных задачах.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Компьютерно-управляемая установка, позволяющая определять с помощью спектроскопии ионного рассеяния ионов элементный состав и толщину пленки на поверхности в процессе плазменного воздействия при контролируемых условиях облучения.

2. Встраиваемый плазменный источник, позволяющий *in situ* исследовать с помощью ионного рассеяния взаимодействие плазмы и ее компонент с поверхностью твердотельных мишеней.

3. Методика исследования динамики поведения примесей углерода и кислорода на поверхности материалов со средним и большим атомным номером по отрицательно заряженным ионам отдачи при облучении ионами инертных газов.

4. Методика определения элементного состава и толщины пленки на поверхности по одновременно и независимо измеренным энергетическим спектрам отраженных ионов водорода и инертного газа.

### **Научная новизна**

1. Создана новая установка, позволяющая определять с помощью спектроскопии ионного рассеяния элементный состав и толщину пленки на поверхности непосредственно в процессе плазменного воздействия.

2. Разработан малогабаритный плазменный источник на основе пеннинговского разряда, совместимый с методикой ионного рассеяния.

3. Впервые проведено исследование динамики изменения на поверхности вольфрама и нержавеющей стали примесей углерода и кислорода по их отрицательно заряженным ионам отдачи.

4. Разработана (подтвержденная положительным решением на заявку о патенте) методика определения элементного состава и толщины пленки на поверхности по одновременно и независимо измеренным энергетическим спектрам отраженных ионов водорода и инертного газа.

### **Научная и практическая значимость:**

Разработанные приборы, оборудование и методики нашли применение:

- при определении конверсионной способности конвертеров анализатора заряженных частиц прибора АРИЕС-Л космического аппарата «Луна-Ресурс»,

- в исследовании аналитических свойств фольговых конвертеров для корпускулярной диагностики импульсной лазерной плазмы в РФЯЦ ВНИИЭФ.

а также могут найти применение:

- в исследованиях по взаимодействию плазмы с поверхностью материалов в задачах УТС,

- при исследовании элементарных процессов, сопровождающих взаимодействие ионов с поверхностью,

- при калибровке аппаратуры для диагностики плазмы,

### **Апробация работы:**

По результатам работы опубликовано 15 печатных работ, 4 из которых в реферируемых журналах, получен 1 патент. Основные результаты доложены на следующих конференциях:

1. 7-ой Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды» (Москва, 2011);

2. 3-ей и 5-ой Всероссийских молодежных конференциях «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» (Москва 2009, 2011);

3. 20-ой и 21-ой Международных конференциях «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Звенигород, 2011; Ярославль, 2013);

4. 15-ой и 16-ой Всероссийских конференциях «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (Москва, НИЯУ МИФИ 2012, 2013);

5. 13-ой, 14-ой и 15-ой научных сессиях НИЯУ МИФИ (Москва, 2011, 2012, 2013);

6. 20-й Международной конференции «Plasma surface interactions in controlled fusion devices» (Aachen, 2012).

### **Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, 4 главы и заключения. Работа содержит 140 страниц текста, включая 84 рисунка, 9 таблиц. Список литературы включает 91 наименование.

### **Личный вклад автора**

Результаты, описанные в работе, получены соискателем самостоятельно, либо с соавторами. Радикальная модернизация экспериментальной установки, ее дооснащение, включая сборку, наладку всех узлов, написание программ по автоматизации управления осуществлены автором самостоятельно. Проведение экспериментов, обработка полученных данных, разработка метода интерпретации полученных спектров с помощью моделирования в коде SCATTER получены на паритетной основе с соавторами.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая ценность работы, а также кратко описана структура диссертации.

**Первая глава** представляет собой литературный обзор по теме диссертации. В лабораторных установках для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью ее анализ после плазменного воздействия осуществляется, как правило, *post mortem* путем перемещения образца в специальную сверхвысоковакуумную камеру, (оснащенную такими методиками анализа поверхности как Оже-электронная спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, вторично-ионная масс-спектроскопия и другими), поскольку для изучения поверхности необходимы сверхвысоковакуумные условия, при которых не происходит заметной сорбции остаточного газа и примесей на поверхности. Именно так производится анализ поверхности после плазменного воздействия на широко известной установке PISCES [1] в США или крупнейшей европейской установке MAGNUM [2].

Спектроскопия рассеяния и ионов отдачи средних и низких энергий [3],[4] несет информацию о реальном составе самого поверхностного слоя независимо от давления остаточных газов, так как используются частицы с энергией в единицы и десятки кэВ, взаимодействие которых с разреженной газовой средой намного меньше, чем с поверхностью твердого тела. Анализ массового состава поверхности основан на том, что потерявшие (или получившие) энергию в результате упругого парного соударения частицы с большой вероятностью покидают поверхность в виде ионов, в то время как отразившиеся (или выбитые) из более глубоких слоев эффективно нейтрализуются электронами мишени. Таким образом данный метод позволяет регистрировать состав поверхности, включая адсорбированные на ней атомы примесей, что важно для анализа взаимодействия плазмы с поверхностью. В частности, возможность исследования с помощью спектроскопии ионного рассеяния и спектроскопии атомов отдачи состава поверхности, структуры и механизма роста пленки на ней в среде

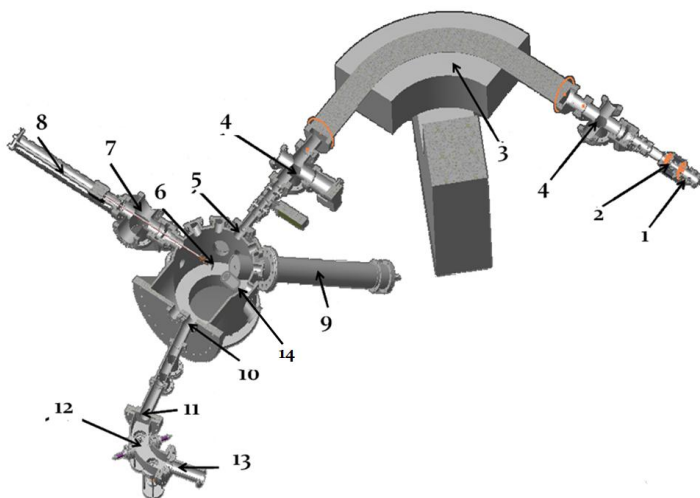


химически активных газов (углерода, кислорода, азота) при давлениях в несколько мбар была продемонстрирована в [5],[6]. Применение же в методе ионного рассеяния легких, глубоко проникающих в мишень ионов, позволяет в некоторых случаях по энергетическому спектру отраженных частиц определить с ангстремным разрешением толщину тонких слоев на поверхности мишени [7].

В конце главы сформулирована цель данной работы, которая заключается в создании установки на базе ионного монохроматора («Большой масс-монохроматор МИФИ» или БММ), позволяющей проводить модифицирование поверхности, исследование элементарных процессов, а также определение элементного состава и толщины пленки на поверхности в процессе ионного и плазменного воздействия. При этом для анализа состава поверхностных загрязнений и динамики их поведения предусмотрено использование спектроскопии однократно рассеянных ионов и ионов отдачи, а для контроля толщины слоев легких примесей на поверхности материалов со средним (нержавеющая сталь) и большим атомным номером (W, Mo) – спектров многократного рассеяния ионов водорода и гелия с энергиями от единиц до десятков кэВ.

**Во второй главе** описана экспериментальная установка, созданная на основе радикальной модернизации и дооснащения установки БММ (рис.1 и 2). Приведено расчетное обоснование ионно-оптической и вакуумной систем установки и результаты их испытаний. Описаны разработанные мишенные устройства, а также представлены характеристики созданного встраиваемого малогабаритного источника плазмы. Эта глава содержит также результаты расчетного исследования выносного энергоанализатора энергетических спектров отраженных и выбитых ионов и результаты его калибровки.

Все основные системы установки автоматизированы, и вторая глава содержит подробное описание разработанной системы автоматизации.

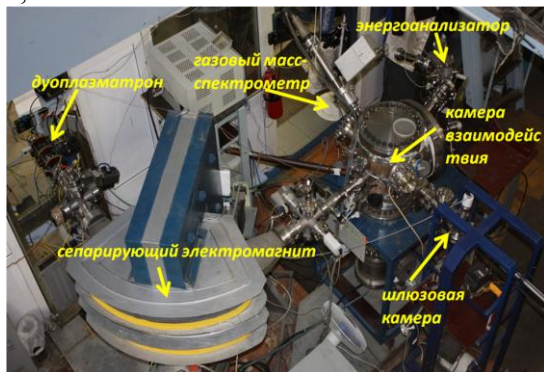


*Рис. 1. Схема установки: 1 - дуоплазматрон, 2 - электростатическая линза, 3 - сепарирующий электромагнит, 4 - вакуумная камера дифференциальной откачки, 5 - входная диафрагма основного ионного пучка, 6 - мишень, 7 - вакуумная камера для замены мишени, 8 - манипулятор ввода – вывода мишени, 9 – масс-спектрометр, 10 – входная диафрагма энергоанализатора, 11 – выходная диафрагма энергоанализатора, 12 - электростатический энергоанализатор, 13 – вторично-электронный умножитель ВЭУ-1, 14 – встраиваемый источник плазмы и ее компонент.*

Основные параметры установки: энергия первичного пучка ионов - от 0,5 до 40 кэВ, энергетический разброс первичного пучка – 30 эВ, типичный ток первичного пучка - 5мкА (для ионов  $\text{He}^+$  5 кэВ), угловой разброс первичного пучка - 0,01рад, рабочее давление в камере - от  $10^{-3}$  до  $10^{-6}$  Торр, предельный остаточный вакуум в камере  $10^{-8}$  Торр.

В качестве анализатора рассеянных ионов разработан выносной четвертьсферический электростатический анализатор с автономной системой откачки. Разрешение электростатического анализатора – не хуже 1,5%, что при калибровке совпало с

результатами компьютерного моделирования ионно-оптических свойств этого анализатора. Для увеличения интенсивности отраженного сигнала была выбрана геометрия малоуглового рассеяния (угол рассеяния  $\theta = 16^\circ$ ), которая, кроме того, упрощает размещение источника плазмы и ее компонентов для облучения поверхности, а также позволяет регистрировать выбитые из поверхности ионы водорода. Телесный угол регистрации рассеянных частиц равен  $8 \cdot 10^{-5}$  стерадиан с полушириной угла рассеяния  $\pm 0,6^\circ$ .



*Рис. 2. Внешний вид установки*

Встраиваемый источник плазмы и ее компоненты разработаны на основе пеннинговского разряда, что позволяет ограничить давление в камере взаимодействия. Различные газы подаются в источник через компьютерно-управляемый натекатель, на источник можно подавать ускоряющее напряжение до  $\pm 3$  кВ, питание разряда осуществляется от блока мощностью 1,4 кВт. Плотность ионного тока из плазменного источника на мишень (в зависимости от сорта рабочего газа, напряжения и тока разряда) - от 1 до 100 мкА/см<sup>2</sup>. Температура и концентрация плазмы в вытягивающем канале плазменного источника (Ar,  $10^{-5}$  Торр, напряжение разряда 2,5 кВ)  $5$  эВ и  $10^8$  см<sup>-3</sup>. При изменении прикладываемых к его корпусу и вытягивающим диафрагмам потенциалов, возможно облучение мишени различными компонентами плазмы (электронами, атомами и др.). На рис. 3 показан внешний вид источника.

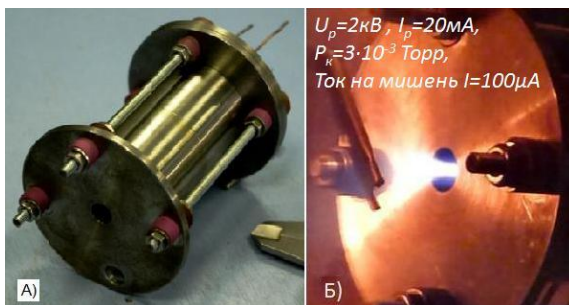


Рис. 3. Плазменный источник на основе пеннинговского разряда: А) внешний вид, Б) вид в процессе работы

Разработаны два мишенных устройства, одно из которых с магнитным приводом позволяет через шлюзовое устройство вводить под пучок прогреваемую до  $750^{\circ}\text{C}$  мишень, а второе позволяет точно позиционировать под пучком несколько непрогреваемых мишеней.

Автоматизация экспериментальной установки осуществлена с использованием АЦП-ЦАП модулей фирмы ICP DAS и National Instruments. Система состоит из двух основных блоков:

1) находящегося под высоким напряжением и управляемого через ИК-порт блока, который управляет накалом катода, разрядом и напуском рабочего газа в диагностический ионный источник - дуоплазматрон;

2) блока управления ионно-оптической системой и напряжением на обкладках энергоанализатора. С помощью данного блока также осуществляется регистрация измеряемых сигналов, обеспечивается мониторинг формы ионного пучка на входе в камеру взаимодействия и стабилизация ионного тока. С помощью этого блока управляются также монопольный спектрометр MX-7403 и встраиваемый плазменный источник.

Величина магнитного поля в масс-сепараторе определяется по сигналу с магнитного датчика холловского типа CMUS 1.0\_02. Ионный ток на мишень измеряется микровольт-наноамперметром ЭК-1601 или наноамперметром Tektronix DMM 4020. Ток прошедших энергоанализатор ионов усиливается вторичным

электронным умножителем ВЭУ-1а и измеряется пикоамперметром Keithley 6485, подключенным к персональному компьютеру.

Для автоматизации установки в среде Labview 8.6 написан ряд программ, отвечающих за управление определенными частями установки и способных работать как по отдельности, так и одновременно (см. рис. 4). Система автоматизации и программное обеспечение позволяют проводить ионно-пучковые эксперименты по заранее разработанным программам облучения, а также:

1) измерять масс-спектры первичного ионного пучка с различным шагом развертки,

2) осуществлять автоматическое сканирование около выбранной массы для поиска максимального значения тока,

3) измерять энергетические спектры отраженных частиц с различным шагом развертки, количеством измерений и точностью измерений,

4) записывать данные всех показателей всех датчиков (первичный ток на мишень, ее температуру, давление и состав остаточного газа),

5) управлять параметрами диагностического источника и встраиваемого плазменного источника,

б) записывать все получаемые данные в файл журнала эксперимента.

В итоге, проведенная модернизация переводит установку БММ в класс современных компьютерно-управляемых электрофизических установок с широким диапазоном возможностей для проведения облучения и анализа поверхности материалов с применением различных газовых ионов в диапазоне  $(EM/Z) < 4000$  кэВ·а.е.м. с энергиями до 40 кэВ и возможностью одновременного облучения потоками плазмы, электронов и ионов из дополнительного источника.

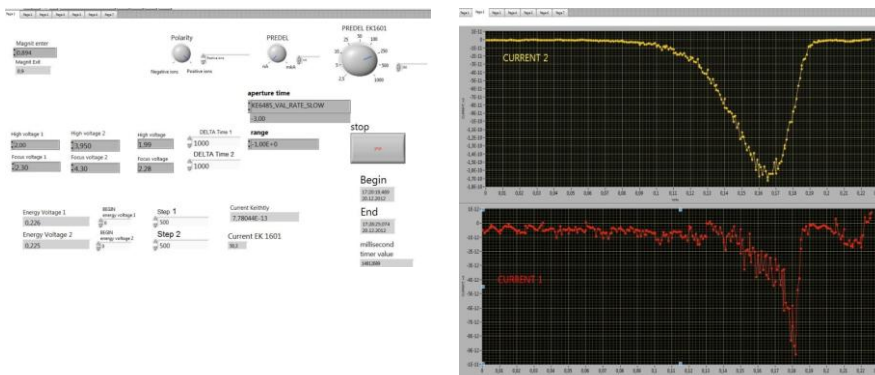


Рис. 4. Основные окна интерфейса программы одновременного измерения энергетических спектров ионов при облучении поверхности пучками ионов водорода (вверху) и гелия (внизу)

В третьей главе приводятся результаты разработки и тестирования различных методик для анализа с помощью ионного рассеяния обращенных к плазме материалов.

В первой части приведено исследование динамики поведения углерода и кислорода на поверхности твердого тела с помощью отрицательно заряженных ионов отдачи и рассеянных ионов гелия и аргона. Так как основными легкими примесями в термоядерных установках (помимо специально вводимых при кондиционировании стенок бора либо лития) являются углеводороды и вода, то необходимо следить за динамикой поведения примесей С, О, Н на поверхности ОПЭ в процессах окисления, плазменного травления и т.д.

Эксперименты с различными материалами ОПЭ (нержавеющая сталь, вольфрам, алюминий - как аналог бериллия) показали, что для регистрации таких примесей как О и С, обладающих большим сродством к электрону, удобно воспользоваться анализом отрицательно заряженных атомов отдачи при облучении ионами инертных газов (см. рис.5). Это позволяет увеличить чувствительность метода за счет малой вероятности образования отрицательных ионов инертных газов.

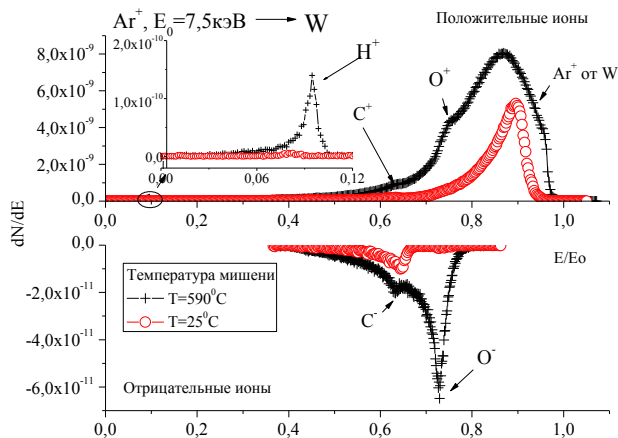


Рис. 5. Энергетические спектры ионов, отраженных и выбитых с поверхности W при бомбардировке ионами  $\text{Ag}^+$  положительных – (верхний график) и отрицательных – (нижний график) при температуре мишени  $25^\circ\text{C}$  и  $590^\circ\text{C}$

Как видно из рис. 5, значение соотношения сигнал/шум ( $J_{\text{ника}}^0 / \Delta J$ ) для упруго выбитых отрицательных ионов на порядок больше, чем для положительных:

$$\frac{J_{\text{ника}}^{0+}}{\Delta J} \approx 1,3 \ll \frac{J_{\text{ника}}^{0-}}{\Delta J} \approx 30 \quad (1)$$

В качестве примера анализа динамики поведения примесей на поверхности на рис. 5 и 6 показано изменение пиков ионов  $\text{C}^-$  и  $\text{O}^-$ , выбитых с поверхности W при нагреве и травлении пучком  $\text{Xe}^+$  с энергией 3,5 кэВ и плотностью тока  $30 \text{ мкА/см}^2$  из плазменного источника (диагностический пучок  $\text{Ag}^+$ ,  $5 \text{ мкА/см}^2$ ,  $E_0 = 7,5 \text{ кэВ}$ ), а также характерные энергетические спектры положительных ионов при разных температурах мишени. Из рис. 5 и 6 следует, что слабосвязанный углерод слетает с вольфрама значительно лучше, чем кислород, который вступает в химическое взаимодействие с вольфрамом. Однако при температурах свыше  $500^\circ\text{C}$  пик ионов  $\text{O}^-$  также резко уменьшается. При этом, на высокоэнергетичном склоне энергетического спектра появляется пик, соответствующий частицам, упруго отраженным от основного материала мишени (в

данном случае от вольфрама). Это свидетельствует о существенной очистке поверхности от адсорбентов при  $T > 500^{\circ}\text{C}$

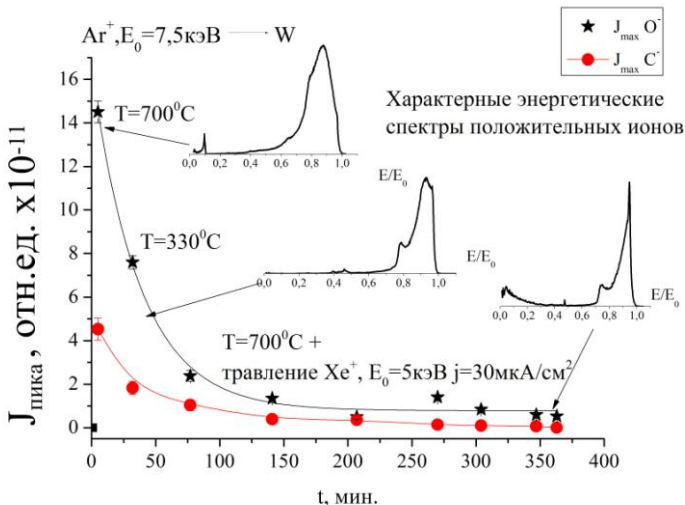


Рис. 6 Динамика поведения пиков ионов  $\text{C}^+$  и  $\text{O}^+$ , выбитых с поверхности  $\text{W}$  в зависимости от времени при нагреве и при травлении поверхности пучком  $\text{Xe}^+$  с энергией  $3,5 \text{ кэВ}$  и плотностью тока  $j=30 \text{ мкА/см}^2$  (диагностический пучок  $\text{Ar}^+$   $j=5 \text{ мкА/см}^2$   $E_0=7,5 \text{ кэВ}$ ).

Во второй части главы 3 описаны эксперименты по калибровке метода определения толщины поверхностных пленок на специально изготовленных электронно-лучевым испарением в лаборатории МЛЭиНЛ ИФЯЭ НИЯУ МИФИ образцы из кремния с последовательно напыленными на поверхность слоями  $\text{W}$  и  $\text{Al}$  (см. таблицу).

Образец №1	Образец №2
$\text{Al}$ толщина $10\text{Å} \pm 5\text{Å}$	$\text{Al}$ толщина $36\text{Å} \pm 5\text{Å}$
$\text{W}$ толщина $150\text{Å} \pm 10\text{Å}$	$\text{W}$ толщина $150\text{Å} \pm 10\text{Å}$
$\text{Si}$ толщина $\infty$	$\text{Si}$ толщина $\infty$
$R_z=21 \text{ нм}$	$R_z=39 \text{ нм}$

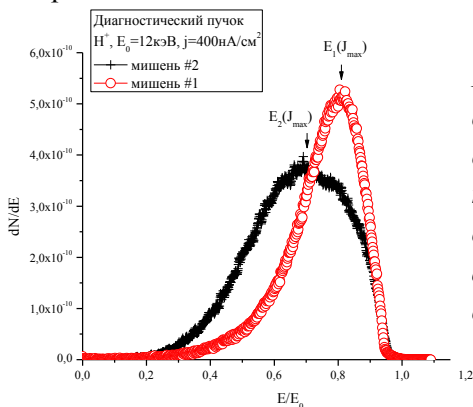
На рис. 7 представлены энергетические спектры отраженных от исследуемых образцов ионов водорода с энергией  $12 \text{ кэВ}$ . Для



оценки толщины слоя атомов Al (с примесью O) в коде SCATTER задавались поверхностные пленки с различной толщиной из этих элементов таким образом, чтобы максимумы экспериментальных и моделируемых энергетических спектров и их уширение совпадали. Из рис. 5 следует, что увеличение толщины слоя Al (O) с 10 до 36A приводит к значительному изменению формы спектра. Оценка чувствительности к изменению такой пленки дает значение

$$\frac{(E_1(J_{\max})/E_0 - E_2(J_{\max})/E_0) \cdot E_0}{\Delta_1 - \Delta_2} \approx 0,9 \pm 0,1 \text{кэВ/нм} \quad (2)$$

где  $E_1(J_{\max})/E_0$  - положение максимума пика для образца №1 и №2 соответственно,  $\Delta_1 - \Delta_2$  - разница в номинальных толщинах исследуемых образцов,  $E_0$  - начальная энергия. Таким образом, спектроскопия малоуглового рассеяния оказалась исключительно чувствительной к осаждению на вольфрам легких примесей, что в настоящее время является весьма актуальной задачей в термоядерных исследованиях.

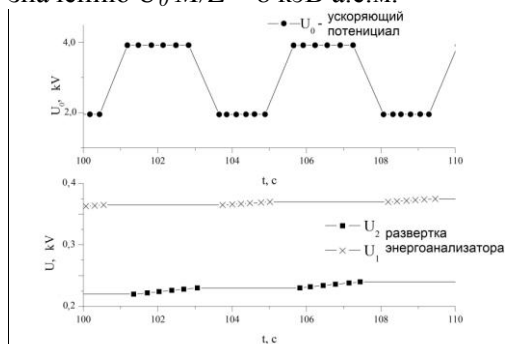


*Рис. 7 Энергетические спектры отраженных от образцов с разной толщиной напыленных на слой вольфрама слоев алюминия ионов водорода с энергией 12 кэВ*

В третьей части третьей главы продемонстрирована возможность одновременного определения элементного состава и толщины поверхностной пленки твердого тела. Для этого исследуемая поверхность облучалась сепарированными по отношению массы к заряду ионами водорода и инертных газов. При этом величина магнитного поля оставалась неизменной, а нужная

для облучения массовая компонента выделялась путем подачи на источник, работающий на смеси газов, ускоряющего напряжения в соответствии с условием  $U_0 M/Z = \text{const}$ , где  $U_0$  потенциал, ускоряющий ионы массой  $M$  и зарядом  $Z$ .

Например, при использовании для анализа однозарядных ионов гелия  ${}^4\text{He}^+$  и молекулярных ионов водорода  $\text{H}_2^+$  переход от первых ко вторым сводится к уменьшению величины ускоряющего потенциала в 2 раза. На рис. 8 показано изменение потенциала на диагностическом источнике, а также на обкладках анализатора для случая, когда магнитное поле масс-монохроматора соответствует значению  $U_0 \cdot M/Z = 8 \text{ кэВ} \cdot \text{а.е.м.}$



*Рис. 8  
Графики изменения  
ускоряющего  
напряжения  
(вверху) и  
развертки анали-  
затора в интервале  
от 100-й до 110-й  
секунды (снизу)*

Изменение ускоряющего напряжения синхронизировано с измерением спектров, т.е. каждому значению зарегистрированного сигнала соответствует значение напряжения развертки энергоанализатора, тем самым регистрация спектров для разных бомбардирующих ионов происходит одновременно и независимо. Шаг развертки и начальное напряжения развертки, а также выделение необходимых для анализа частей спектра можно задавать независимо для разных ионов.

На рис. 9 в качестве примера представлены полученные с помощью данной методики энергетические спектры ионов водорода и гелия при облучении мишени из InGaAs, приготовленной в МЛЭиНЛ ИФЯЭ НИЯУ МИФИ методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Как видно из рис.7, в спектре отрицательных ионов помимо ионов гелия хорошо видны выбитые ионы углерода и кислорода (водорода?). Предполагая, что водород, претерпев на

некоторой глубине акт упругого рассеяния, теряет энергию только за счет электронного торможения, и полагая в первом приближении, что тормозная способность не зависит от энергии и соответствует ее значению для наиболее вероятной энергии отраженных частиц, можно оценочно перевести энергетическую шкалу в спектрах (см. рис.9) в шкалу глубины.

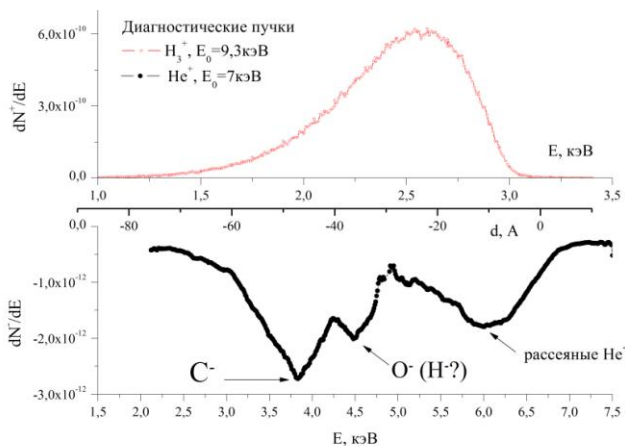
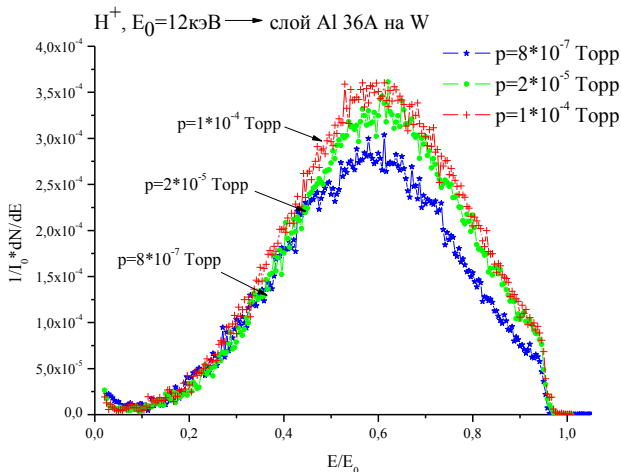


Рис. 9 Энергетические спектры протонов (вверху) и отрицательных ионов (внизу), при одновременном облучении мишени из InGaAs ионами  $\text{H}_3^+$  9,3 кэВ и  $^4\text{He}^+$  7 кэВ.

Нижняя ось абсцисс примерно соответствует глубине проникновения ионов водорода

Таким образом, одновременно регистрируются отраженные с некоторой глубины протоны и вылетающие с поверхности ионы примесей, а предложенный метод может быть использован как неразрушающий метод одновременного определения как состава, так и толщины поверхностных слоев мишеней в процессе их трансформации при плазменном или ином воздействии.

В четвертой части третьей главы показано, что при увеличении давления в камере взаимодействия во время работы плазменного источника происходит увеличение регистрируемой протонной фракции (см. рис.8).



*Рис. 10 Энергетические спектры положительных ионов зарегистрированных анализатором в зависимости от*

Это происходит за счет дополнительной обдирки на газе отраженных от мишени возбужденных нейтральных атомов водорода. Чувствительность же элементного анализа методом ионного рассеяния за счет нейтрализации на газе однократно отраженных и первично выбитых ионов уменьшается в 3-5 раз (в зависимости от концентрации рабочего газа в камере взаимодействия) при повышении давления на 2 порядка (до 0,5 мТорр).

В **четвертой главе** приведены примеры практического применения созданной экспериментальной установки.

1. Установка и аппаратура для спектроскопии ионного рассеяния была использована для характеристики аналитических свойств фольговых конвертеров, применяемых при корпускулярной диагностики импульсной лазерной плазмы в РФЯЦ ВНИИЭФ. А именно: с помощью спектроскопии прошедших через фольги ионов водорода кэвных энергий были определены как толщины ультратонких фольг ( $\approx 50\text{Å}-100\text{Å}$ ), так и флуктуации их толщины. Путем сравнения экспериментальных данных с компьютерным

моделированием в коде SCATTER толщина и абсолютная флуктуация толщины анализируемых фольг определена с точностью 5%;

2. Разработанная аппаратура методики и многопозиционный мишенный узел были использованы при определении конверсионной способности конвертеров анализатора заряженных частиц прибора АРИЕС-Л (космического аппарата «Луна-Ресурс»), предназначенного для определения состава реголита по взаимодействию с ним солнечного ветра. В данном исследовании благодаря мишенному устройству, позволяющему точно позиционировать под пучком несколько непрогреваемых мишеней, проведен сравнительный анализ спектров частиц, отраженных и выбитых с поверхности нескольких образцов при одинаковых внешних параметрах (одинаковом первичном токе на мишень, давлении и составе остаточного газа) и предложен конвертор с максимальным коэффициентом преобразования (для водорода и гелия с энергиями 1-3 кэВ) в положительно заряженную ионную фракцию.

В **заключении** сформулированы выводы и перечислены основные результаты работы:

- Создана современная компьютерно-управляемая экспериментальная установка, позволяющая определять элементный состав и толщину пленки на поверхности в процессе плазменного воздействия с помощью спектроскопии ионного рассеяния.

- Создан и испытан встраиваемый, малогабаритный совместимый с методикой ионного рассеяния источник плазмы и её компонент для исследования *in situ* взаимодействия плазмы с поверхностью. Определены его рабочие характеристика для различных рабочих газов и давлений.

- Показано, что при облучении мишени ионами гелия или аргона регистрация отрицательно заряженных ионов и атомов отдачи позволяет наблюдать динамику изменения примесей углерода, кислорода и водорода на поверхности материалов со средним и большим атомным номером.

- Показано, что при облучении ионами водорода регистрация спектров рассеянных ионов позволяет по сдвигу максимума энергетического спектра оценить толщину пленок из легких элементов на поверхности мишени с большим атомным номером непосредственно в процессе ионного (или плазменного) воздействия.

- Предложен, апробирован и запатентован метод одновременного определения как состава, так и толщины поверхностных слоев мишеней по энергетическим спектрам отраженных и выбитых ионов при одновременном облучении мишеней ионами водорода и инертных газов.

Разработанная установка и методики использованы:

- а) для определения конверсионной способности конвертеров анализатора заряженных частиц разрабатываемого в ИКИ РАН прибора АРИЕС-Л космического аппарата «Луна-Ресурс».

- б) при характеристике аналитических свойств фольговых конвертеров для корпускулярной диагностики импульсной лазерной плазмы в РФЯЦ ВНИИЭФ.

### Список публикаций по теме диссертации:

1. Мамедов Н.В., Курнаев В.А. Модернизированная установка для исследования взаимодействия с поверхностью ионов с энергиями до 40 кэВ // **Краткие сообщения по физике ФИАН** - Москва, 2010. №5, с. 45-48.
2. Мамедов Н.В., Курнаев В.А., Иванов Д.В., Синельников Д.Н.. Применение спектроскопии рассеянных ионов для анализа взаимодействия плазмы с поверхностью // **Известия РАН. Серия физическая** – Москва, 2012, том 76, № 6, с. 781–784
3. Мамедов Н.В., Курнаев В.А., Визгалов И.В., Синельников Д.Н.. Встраиваемый малогабаритный источник плазмы для ее исследования *in situ* ее взаимодействия с поверхностью // **Ядерная физика и инжиниринг** – Москва, 2013, том 4, № 5, с. 436–442
4. Sinelnikov, D.N., Kurnaev V.A., Mamedov N.V., Popov, A.P. Emission of Negative Ions From Surfaces With High Emissivity // **IEEE Transactions on Plasma Sciences**, 2013 Vol.:41, Issue:8, Part:2 p. 2113 – 2116
5. Мамедов Н.В., Курнаев В.А., Синельников Д.Н.. Способ определения элементного состава и толщины поверхностной пленки твердого тела при внешнем воздействии на поверхность (решение о выдаче патента по заявке № 2012132557), от 30.07.2012).
6. Гриднева Е.А., Курнаев В.А., Коборов Н.Н., Мамедов Н.В. Корпускулярная диагностика плазмы по нейтралам перезарядки // Лабораторный практикум «Методы генерации и диагностики плазмы» - Москва, МИФИ, 2008, с. 176-206.
7. Мамедов Н.В., Иванов Д.В., Курнаев В.А., Синельников Д.Н. Разработка спектрометрических методов диагностики эмиссии заряженных частиц с поверхности, ее состава и структуры под воздействием потоков ионов и плазмы // Тезисы докладов седьмой Российской конференции «Современные средства диагностики

плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды». - Москва, 2010, с. 186-189

8. Мамедов Н.В, Курнаев В.А., Синельников Д.Н. Методика прецизионной идентификации ионов с примерно одинаковым отношением массы к заряду // Тезисы докладов 5-ой Всероссийской молодежной конференции «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики». Москва ,2011, стр.48

9. Алхимова М.А., Мамедов Н.В., Колодко Д.В. Моделирование в среде Comsol MPh распределение электрического и магнитного поля в плазменном источнике низкого давления // Тезисы докладов научной сессии МИФИ 2012 - Москва, 2012, Том 1, с.81

10. Мамедов Н.В., Курнаев В.А., Визгалов И.В., Синельников Д.Н., Алхимова М.А, Колодко Д.В. Встраиваемый малогабаритный источник плазмы // Тезисы докладов 15-ой конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью» – Москва, 2012, с. 76-79.

11. V.Kurnaev, K.Gutorov, N.Mamedov, A.Popov, D. Sinelnikov, I.Vizgalov. Emission properties of PFCs under plasma and its components impact // Abstract of the 20<sup>th</sup> International conference «Plasma Surface Interaction» - Aachen, 2012, p.233

12. Иванов Д.В., Курнаев В.А., Мамедов Н.В., Синельников Д.Н. Модернизированная установка для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью // Тезисы докладов научной сессии МИФИ 2011 - Москва , 2011, Том 1, с.74

13. Мамедов Н.В., Курнаев В.А., Синельников Д.Н., Труфанов Д.А. О возможности одновременного определения элементного состава и толщины пленки на поверхности // Тезисы докладов 16-ой конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью»– Москва, 2013, с. 83-87



14. Мамедов Н.В., Курнаев В.А., Синельников Д.Н., Труфанов Д.А. Испытание макета конвертера нейтральных частиц прибора Ариес-Л // Тезисы докладов научной сессии МИФИ 2013, Москва, 2013, Том 1, с.77

15. Н.В. Мамедов, В.А. Курнаев, Д.Н. Синельников, Д.В. Колодко, Д.А. Труфанов, Конверсионная способность материалов конвертера для прибора «Ариес-Л»// Тезисы докладов 21-Ой конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» - Ярославль, 2013, том 1, стр. 336-339

### Список цитируемой литературы

Список цитируемой литературы

1. D.M.Goeble, G.Campbell, R.W.Conn // J Nucl.Mater.121 (1984), 277

2. J.Rapp //Proc.International workshop on requirements for next generation PMI stands in fusion research, Oak Ridge, USA, August 31-September 2,(2010)

3. Курнаев В.А., Машкова Е.С., Молчанов В.А. Отражение легких ионов от поверхности твердого тела, М. Энергоатомиздат, (1985), 192с

4. Brongersma H.H., Draxler M., de Ridder M., Bauer P.// Surface Science Reports. 2007. V. 62. p. 63-109.

5. Jaemo Im et al.// Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res. B. 1996. v.118. p. 772-781.

6. Yuping Lin et al.// Thin Solid Films. 1994. v.253.p. 247 – 253.

7. V.A. Kurnaev, N.N. Trifonov, M.N. Drozdov, N.N. Salashchenko // Vacuum. 2000.V. 56. p. 253-255.