

УДК 537.534.7

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЗОНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ “ПЛАЗМА/ПЕРВАЯ СТЕНКА” В ТОКАМАКЕ TRT

© 2022 г. Л. Б. Беграмбеков^{а, *}, А. В. Грунин^{а, **}

^а *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*

**e-mail: lbbegrambekov@mephi.ru*

***e-mail: avgrunin@mephi.ru*

Поступила в редакцию 06.06.2022 г.

После доработки 11.08.2022 г.

Принята к публикации 20.08.2022 г.

Рассмотрены диагностические методы и устройства, используемые для изучения взаимодействия плазмы с материалами в современных термоядерных установках. На основе анализа методов и устройств сделан вывод, что выполняемые ими измерения, разделенные в пространстве и во времени, не составляют достаточно полный объем информации, необходимый для выявления механизмов, закономерностей и параметров развития процессов на поверхности первой стенки при плазменном воздействии. Предложены диагностический многофункциональный зонд, включающий материаловедческую и спектрометрическую части, а также одиночный и двойной зонды Ленгмюра и зонд Маха. Многофункциональный зонд предназначен для проведения комплекса масс-спектрометрических и материаловедческих измерений, необходимых для выявления механизмов и закономерностей явлений на поверхности первой стенки термоядерной установки при интенсивном плазменном облучении, а также для измерения параметров потоков примесей в плазму.

Ключевые слова: диагностика плазмы, зонды Ленгмюра, взаимодействие плазма-стенка, примеси

DOI: 10.31857/S036729212260056X

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие плазмы с материалами первой стенки, диафрагм, дивертора термоядерных установок порождает целую серию явлений, в той или иной степени отрицательно влияющих на параметры удерживаемой горячей плазмы. Среди них эрозия и изменение морфологии поверхности материалов, изменение их состава, структуры, захват, удержание и неконтролируемый выброс газов, эмиссия в плазму атомов и микроскопических частиц материалов, формирование слоев перенапыленных атомов, также захватывающих и удерживающих большие количества газов и загрязняющих плазму при последующем разрушении слоев. Кроме того, процессы взаимодействия плазмы со стенкой отрицательно влияют и на саму первую стенку и компоненты, взаимодействующие с плазмой. Среди негативных явлений для первой стенки стоит отметить ее деградацию с последующим разрушением внутрикамерных элементов.

Исследование взаимодействия плазмы с контактирующими с ней материалами и попытка на этой основе предотвратить развитие указанных явлений или, по крайней мере, ослабить их отрицательное влияние на параметры горячей плаз-

мы — это чрезвычайно актуальная задача, поскольку разворачиваются исследования взаимодействия плазмы с кандидатными материалами элементов будущего поколения термоядерных установок в условиях работы с длинными импульсами.

В действующих термоядерных установках для получения информации о взаимодействии плазмы с материалами вакуумной камеры используется значительное количество методов и устройств, проводящих измерения в режиме реального времени и исследующих материалы, экспонированные в плазме. В статье приводится краткий обзор диагностических устройств, используемых в современных термоядерных установках для изучения процессов и параметров взаимодействия плазмы со стенкой. Обсуждается устройство многофункционального зонда, способного в реальном времени провести комплекс измерений, необходимых для получения достоверной информации о закономерностях взаимодействия со стенкой плазмы в конкретных условиях экспериментальной установки — токамака с реакторными технологиями (TRT).

МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕСЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ ПЛАЗМЕННОЙ КАМЕРЫ

Спектроскопические методы измерения

Спектроскопическими методами, обеспечивающими высокое временное разрешение, регистрируются примеси в плазме в течение разряда токамака в видимом спектральном диапазоне [1, 2] и в области экстремального ультрафиолета и ближнего рентгеновского диапазона (XUV) [3, 4]. В качестве недостатков спектроскопических измерений отмечаются: сильная вариация результатов в зависимости от концентрации и плотности плазмы [5], зависимость результатов измерений от магнитной конфигурации в области анализа [6], низкое пространственное разрешение [7], невозможность выявления участков поверхности, дающих основной вклад в выделение примесей [7].

Регистрация газов и твердотельных частиц, выделяющихся из первой стенки газов при лазерном воздействии на нее

Для регистрации поверхностных примесей и внедренных в объем первой стенки газов производится нагрев поверхностного слоя лазерным лучом с целью газовой выделенности, абляции или плазмообразования, и затем регистрация выделившихся частиц спектрометрически (Laser Induced Desorption Quadrupole Mass Spectrometry) или по их характерному свечению (Laser Induced Ablation Spectrometry – LIAS и Laser Induced Breakdown Spectrometry – LIBS). В работах [8, 9] с этой целью использовались методы LIBS и LIAS, в частности, в исследованиях на токамаке EAST. Сообщается, что анализ тайлов первой стенки со слоями бериллия-вольфрама-дейтерия (BeWD), выполненные техникой LIBS, хорошо согласуются с результатами, полученными с помощью метода SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry), после извлечения образцов из токамака JET [10]. Вместе с тем, в работе [11] отмечается, что сигналы, регистрируемые техникой LIBS, зависят от магнитного поля установки [11], давления рабочего газа, размера кратера, создаваемого лазерным импульсом, а также от интенсивности свечения плазмы [12]. При этом разрушение профиля поверхности первой стенки установки при абляции сопровождается последующими негативными последствиями.

Оценка газообмена плазмы со стенкой по результатам анализа изменений газобаланса установки

Метод измерения полного газобаланса установки широко используется для изучения захвата рабочего газа первой стенкой [13]. К сожалению, данный метод не позволяет определять места локализации захвата и десорбции газов.

Зонды Ленгмюра. Учет параметров плазмы необходим для правильной интерпретации всех измерений в рамках исследования взаимодействий плазма-стенка. С этой целью используют зонды Ленгмюра, способные измерять температуру и плотность электронов, плотность потока тепла, плавающий потенциал. В работах [14–19] представлены устройства зондов Ленгмюра, способные выполнять погружения в плазму [14, 15] и стационарно установленные [17–19] в диверторной области токамаков. При этом, такие зонды выдерживают тепловой поток высокой плотности до 100 МВт/м² в течение 5 с.

Приборы вне камерной диагностики. Известны внекамерные устройства корпускулярной диагностики, работающие в режиме реального времени. В работе [20] представлен энергоанализатор потока частиц плазмы, включающий электростатический анализатор, камеру обдирки и детектор Дейли. Такой анализатор выполняет в режиме реального времени регистрацию количества примесей и энерго-массовый анализ их компонентов. Трудности использования подобных устройств связаны с их значительными размерами. Кроме того, измеряются только потоки частиц, вылетающих из плазмы в пределах малого угла, а регистрация частиц твердотельной примеси практически невозможна [21].

Масс-спектрометрические зонды. Информацию о примеси в плазме, в частности, о продуктах распыления и десорбции газов получают с помощью масс-спектрометрических зондов, вводимых, чаще всего, в периферийную плазму. Так, зонд токамака Alcator C-mod работал в периферийной плазме при магнитном поле 4–8 Тл. Ионы сравнительно высоких зарядовых состояний разделялись в скрещенных $E \times H$ полях с разрешением по массам $M/\Delta M$ около 6. Однако, эффективная регистрация однозарядных ионов бора (B^+), углерода (C^+) и кислорода (O^+) не достигалась [14].

Масс-спектрометрический зонд токамаков DITE [22] и TEXTOR [23] успешно регистрировал многозарядные, но не однозарядные ионы примесей. Такой же недостаток отмечался в зондах, описываемых в работах [24, 25]. Зонд токамака HT-7 [26] измерял в магнитном поле около 2 Тл только массовые спектры ионов пристеночной плазмы.

В масс-спектрометрическом зонде, разработанном в работе [27], для регулировки энергетического диапазона регистрации ионов используется ускоряющая диафрагма. Эта диафрагма за счет доускорения ионов в тороидальном направлении, позволяет при разделении ионов пренебречь поперечной компонентой скорости ионов и за счет этого повысить разрешение по скоростям при регистрации потока ионов. Авторы также сообщают о настраиваемом диапазоне регистрации ионов по отношению их массы к заряду.

Исследование экспонированных в плазме образцов. Образцы для экспонирования в плазме вводились в плазменные камеры термоядерных установок, так называемыми, собирающими (материаловедческими) зондами, или анализу подвергались поверхности контактирующих с плазмой элементов дивертора, лимитера и первой стенки. Анализ поверхностей тайлов токамаков JET и TEXTOR после их вывода из токамаков представлен в работе [28]. Такой анализ позволяет сделать обобщенное заключение о воздействии плазмы на материалы тайлов, включая информацию о напыленных слоях и внедренных атомов газов в результате большого количества различных разрядов. Вместе с тем, по результатам этого анализа невозможно судить о закономерностях развития поверхностных процессов при различных плазменных воздействиях. Подобное же заключение об анализе поверхностей, экспонированных в плазме в течение длительного времени, было сделано и в работах [29, 30]. В первой из них при попытке однозначного определения толщины и количества примесей в углеродной пленке, осажденной в токамаке TEXTOR, оказалось невозможным идентифицировать доминирующие механизмы, ввиду того, что ее толщина определяется балансом между процессами распыления и осаждения. Во второй работе при измерении в токамаке CASTOR количества водорода, захватываемого в пластинку из ванадия в зависимости от подаваемого на нее потенциала, также оказалось трудно идентифицировать процессы, происходящие на контактирующей с плазмой поверхности, поскольку механизмы и вероятности захвата в ванадий ионов и атомов водорода зависят от параметров плазменного облучения.

В токамаке Tore Supra в работе [31] с использованием “прыгающего” материаловедческого зонда с образцами, расположенными вдоль зонда, определялось радиальное распределение потоков водорода, дейтерия и углерода в плазме. Однако, и в этом случае, полученные результаты суммировали информацию за большое количество разрядов. То есть, использование данной методики возможно только для определения общей толщины материала, осажденного на поверхность или удаленного с поверхности внутри камерных эле-

ментов. В целом интегральный эффект воздействия плазмы на внутрикамерные материалы важен, т.к. именно он определяет долговечность службы таких материалов и самих термоядерных установок.

Заключительные замечания о методах анализа взаимодействия плазма-стенка, применяемых на действующих термоядерных установках. Рассмотренные работы свидетельствуют о том, что, для выявления механизмов, закономерностей и параметров, характеризующих взаимодействие плазмы с контактирующими с плазмой материалами, и для определения условий и особенностей поступления в плазму примесей, современные термоядерные установки снабжаются специализированными диагностическими системами. Совокупность результатов их измерений, разделенных в пространстве и во времени, не доступных в режиме “In situ” и имеющих зачастую качественный характер, не позволяет делать однозначных заключений об исследуемых процессах. Причиной перечисленных проблем, как можно заключить на основании анализа работ, является то обстоятельство, что при исследовании определенных процессов и явлений не выполняется достаточно полный объем измерений, необходимых для характеристики условий, определяющих механизмы и особенности их развития. В результате, понижается достоверность и затрудняется интерпретация полученных данных, существенно осложняется и затягивается проведение исследований, что приводит к удорожанию проведения экспериментальных исследований. В частности, при проведении масс-спектрометрических и материаловедческих исследований ограничение спектра выполняемых измерений в значительной степени можно отнести к недостаткам используемых зондовых устройств. Так в работе [27] было показано, что введение соответствующих поправок в конфигурацию электрического поля и конструкцию зонда позволяет ослабить влияние поперечной компоненты скорости ионов на результаты анализа, а ускорение анализируемых ионов делает возможным улучшение разрешения зонда по скоростям ионов и проведение настройки зонда на определенный диапазон масс ионов. В результате, появляется возможность регистрации как легких однозарядных ионов примесей, так и примесных ионов с большим отношением массы к заряду.

Материаловедческий анализ облученных плазмой образцов материалов, напыленных на них слоев, сорбированных и внедренных газов, выполняется во всех рассмотренных случаях в режиме ex-situ после воздействия на образцы плазмы многочисленных разрядов. Поэтому, полученные результаты не дают возможности сделать заключение о закономерностях и параметрах развития исследуемых явлений в зависимости от

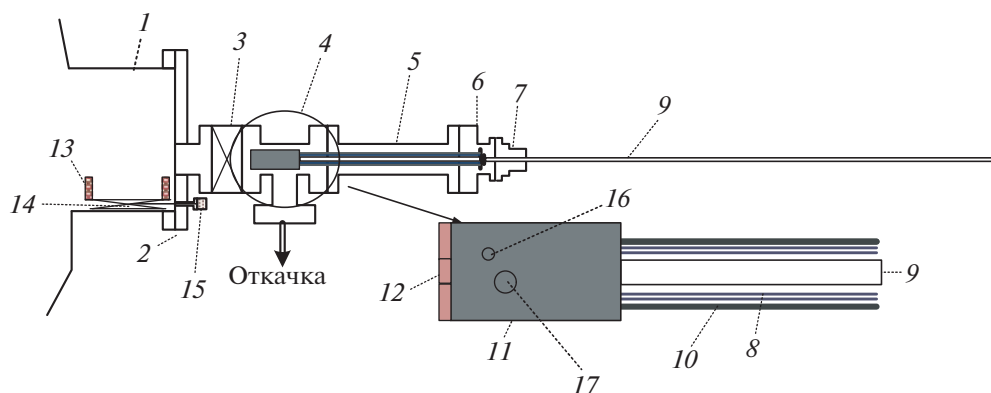


Рис. 1. Схема многофункционального зонда и вакуумированной системы обеспечения его работы. 1 – патрубок вакуумной камеры токамака, 2 – фланец, 3 – затвор ДУ100, 4 – шлюзовая камера, 5 – шлюз манипулятора перемещения, 6 – переходной патрубок, 7 – ввод движения, 8 – молибденовые экраны, 9 – манипулятор перемещения (штанга в виде трубки с проводами, опционально с водяным охлаждением), 10 – внешний экран кожуха манипулятора перемещения, 11 – защитный кожух измерительной части, 12 – облучаемые образцы, 13 – поддержка штанги перемещения, 14 – механизм поддержки штанги перемещения, 15 – ввод вращения механизма поддержки, 16 – отверстие в кожухе для пролета частиц внутри секции зонда, 17 – образец, размещенный на внешней поверхности кожуха.

особенностей воздействия плазмы. Таким образом использование современных методов позволит значительную часть измерений выполнять материаловедческими зондами в режиме реального времени, что существенно повышает эффективность материаловедческих исследований.

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЗОНДА ДЛЯ ТОКАМАКА TRT

Результативность измерений, ведущихся с целью исследования взаимодействия плазмы с контактирующими с плазмой материалами, может быть значительно повышена, а время и труд, затрачиваемые на подобные исследования, сокращены, если одновременно, будет выполняться комплекс измерений, необходимых для всесторонней характеристики исследуемых процессов и явлений. В этих условиях будут определяться факторы и выявляться степень их воздействия на измеряемый процесс и при этом сведется к минимуму часть измерений, выполняемых не в реальном времени. Именно такую организацию и проведение измерений можно будет реализовать с помощью предлагаемого малоразмерного многофункционального зонда, вводимого в плазму. Этот зонд не будет оказывать заметное влияние на параметры плазмы, будет работать в режиме реального времени и проводить комплекс исследований периферийной плазмы на различных стадиях разряда. Факторами повышения эффективности проводимых измерений, выполняемых многофункциональным зондом, будет возможность выводить из установки для анализа экспонируемые в плазме образцы, не прерывая работу установки. Использование автоматизации про-

цессов измерений и обработки результатов, их синхронизация с различными стадиями разряда при объединении систем автоматического управления установки и зонда позволит существенно повысить качество получаемой информации и ее объем.

Многофункциональный зонд и вакуумированная система обеспечения его работы

Система обеспечения работы многофункционального зонда служит для выполнения операций ввода и вывода зонда в вакуумную камеру токамака, фиксации зонда в камере и выполнения операций по установке или замене образцов, экспонируемых в плазме с помощью зонда. Основные элементы системы обеспечения работы многофункционального зонда показаны на рис. 1. Все основные части системы обеспечения работ многофункционального зонда располагаются в вакуумном патрубке 1 токамака или закрепляются на фланце 2 этого патрубка.

Многофункциональный зонд и его системы работают следующим образом. В исходном положении зонд (измерительная часть и часть штанги перемещения в составном защитном кожухе) располагаются в соответствующих шлюзах (рис. 1). Шлюз 4 измерительной части и шлюз 5 для кожуха 8, 10 штанги перемещения откачивается средствами токамака или отдельного вакуумного поста до давления не выше, чем 10^{-6} Па (опционально прогревается до температуры 250–300°C). Открывается затвор 3, разделяющий шлюз диагностической системы и основной объем вакуумной камеры токамака. Через ввод движения 7 измерительная часть зонда на штанге перемещения 9 вдвигается в основной объем токамака. Длина

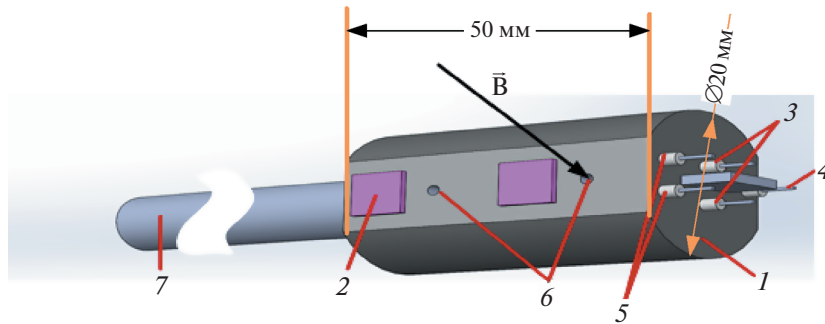


Рис. 2. Возможная конфигурация подвижной части многофункционального зонда. 1 – защитный кожух, 2 – экспонируемые в плазме образцы, 3, 4, 5 – зонды Ленгмюра, 6 – отверстия входа частиц плазмы, 7 – фрагмент вакуумного ввода.

экваториального патрубка 1, размер шлюза 4 и расстояние до интересующей точки измерения определяют размер манипулятора перемещения (1000–1500 мм). Фиксация манипулятора происходит во вводе движения 7 и посредством поддержки 13. Для предотвращения прогиба манипулятора с измерительной частью имеется также механизм поддержки 14 манипулятора перемещения, который оснащенный вводом 15, передающим на него движение от внешнего источника (шаговый двигатель или сервомотор).

Ввод движения 7 может быть реализован различным способом. Это может быть ввод с сильфонным уплотнением, магнитожидкостным уплотнением или уплотнением с помощью обжимного кольца. Использование сильфонного уплотнения является наилучшим вариантом с точки зрения минимизации течей при движении, а уплотнение с помощью обжимного кольца самое простое с конструктивной точки зрения, однако накладывает требования на точность изготовления штанги перемещения.

Устройство многофункционального зонда

На рис. 2 представлен многофункциональный зонд в защитном кожухе. Зонд обеспечивается системой автоматического управления и системой обработки результатов измерений, которые могут быть интегрированы в систему управления токамака.

Зонд включает материаловедческую и спектрометрическую секции, расположенные в кожухе, а также внешние устройства: зонд Маха, зонды Ленгмюра 4 и экспонируемые в плазме образцы 2. Зонд Маха, расположенный на оконечности кожуха, конструктивно состоит из двух зондов Ленгмюра, разделенных перегородкой. Секции зонда работают независимо друг от друга и вместе дают комплексную информацию о компонентах пристеночной плазмы. Извлечение образцов и

собирающих пластин, расположенных внутри защитного кожуха 1 и собирающих пластин 2 вне кожуха, может производиться через вакуумный шлюз на любом этапе работы токамака без прерывания его работы. Материал защитного кожуха выбирается в соответствии с материалами, применяемыми в конкретном токамаке. В случае токамака ТРТ наиболее вероятным является кожух из вольфрама.

Материаловедческая секция зонда.

Схема и выполняемые измерения

Материаловедческая секция зонда (рис. 3) включает в себя два одинаковых аналитических узла, в которые частицы плазмы и примесей могут проникать через отверстия 2 на противоположных сторонах зонда. Каждый из узлов может выполнять одинаковые или различные функции. На рис. 3 показаны различные модификации аналитических узлов.

На схеме одного из аналитических узлов показан датчик QMB 5. При подаче потенциала на электрод 3 для отклонения ионов плазмы от линейной траектории датчик QMB сможет проводить измерение потока частиц твердотельной примеси на свою поверхность при исключении распыления формируемого слоя ионами плазмы. При изменении конфигурации датчика QMB и электрода 3 будет возможно измерять скорости распыления пластин исследуемых материалов ионами плазмы. Для выполнения этих же задач вместо QMB может быть использовано устройство, фиксирующее толщину напыленного слоя по изменению его электропроводности. В обоих случаях зонд получит возможность регистрировать осаждаемые слои или скорость распыления материалов в реальном времени с точностью 1–2 атомных слоя, т.е., в течение одного или нескольких разрядов в токамаке и анализировать on-line получаемую информацию. Возможно размещение образцов исследуемых материалов 4 и на за-

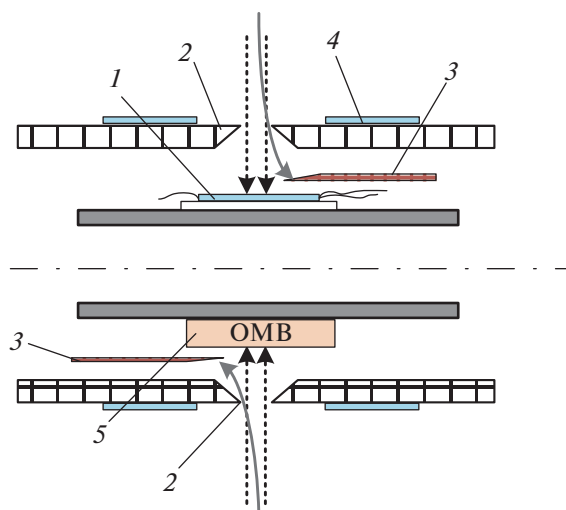


Рис. 3. Схема материаловедческой секции зонда. 1 – коллектор примеси, 2 – входное отверстие, 3 – отклоняющий ионы электрод, 4 – облучаемые в плазме образцы, 5 – датчик кварцевого микробаланса (QMB).

щитном кожухе. В этом случае образцы облучаются непосредственно в плазме токамака.

Второй аналитический узел приспособлен для выполнения ряда измерений в реальном времени, а также этот узел может обеспечить определенные воздействия на поверхность образцов с целью анализа их результатов при последующем лабораторном анализе образцов. Эта секция показана на схеме в конфигурации, обеспечивающей накопления слоев твердотельной примеси, осевшей на поверхность образца коллектора, а также атомов газов, внедрившихся в его объем для их анализа после выноса на атмосферу. На электрод 3, расположенный между входным отверстием и коллектором, может подаваться потенциал, для отклонения ионов плазмы, влетающих во входное отверстие и для предотвращения ионного облучения и распыления атомов, оседающих на образец. После извлечения образца из зонда, предполагается исследование коллекторов методами масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS), спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния (RBS), Оже-спектроскопии (AES) и другими. Анализ внедрившихся в образцы компонентов плазмы проводится методом термодесорбционной спектрометрии. Изменение конфигурации образца и отклоняющего электрода 3, в частности, замена его на диафрагму, а также подача на образец и отклоняющий электрод соответствующих потенциалов, позволит в реальном времени проводить измерения параметров потоков ионов плазмы, примеси и электронов на коллектор 1.

Следует обратить внимание на то, что электрод 3 не позволяет полностью разделить процессы распыления и осаждения, так как нейтраль-

ные частицы (если их энергия высока) вносят определенный вклад в распыление, а ионы вносят вклад в осаждение. Тем не менее, предложенная схема применима для режима “In situ” при измерении скорости распыления или осаждения в условиях, когда один из процессов заведомо преобладает.

Схема масс-спектрометрической секции зонда и выполняемые измерения

Схема масс-спектрометрической секции изображена на рис. 4. Через отверстие 2 частицы плазмы 3 попадают внутрь измерительной части и ускоряются в промежутке между кожухом и ускоряющей диафрагмой 4. Электрическое поле, сформированное пластинами плоского конденсатора 5, и собственное магнитное поле токамака образуют область скрещенных $E \times H$ полей, в которых происходит разделение частиц плазмы по отношению их массы m к заряду Z . Токи частиц, попадающих на коллекторы 6, регистрируются с помощью набора высокоскоростных АЦП, считывающих и запоминающих данные на частотах до 30 кГц.

Для измерения полного ионного тока электрическое поле не формируется, в этом случае не происходит разделения частиц, и, таким образом, весь ионный или электронный ток фиксируется на коллекторе напротив входного отверстия. В качестве прямопролетного коллектора, так же, как и в материаловедческой секции, может быть установлен датчик QMB.

При включении электрического поля ионы будут отклоняться от линейной траектории, и датчик будет фиксировать накопление твердотельной примеси в нейтральном зарядовом состоянии. В то же время, остальные коллекторы смогут продолжать фиксировать примесь, находящуюся в ионизированном состоянии.

Расчеты показывают, что эффективное разделение заряженных частиц в масс-спектрометрической секции с размерами 20×20 мм возможно при собственном тороидальном магнитном поле токамака с индукцией более 0.5 Тл. Минимальное магнитное поле будет соответствовать максимальному напряжению (около 1 кВ) на обкладках пластин, формирующих электрическое поле. Таким образом, предлагаемый многофункциональный зонд может найти свое применение в действующих и создаваемых токамаках Т-15МД, КТМ, ТРТ.

Значительно влияние на траекторию ионов оказывает величина полоидальной компоненты магнитного поля в области разделения ионов, а также угол между осью входного отверстия и направлением скорости ионов. Значительная энергия ионов и наличие полоидальной компоненты

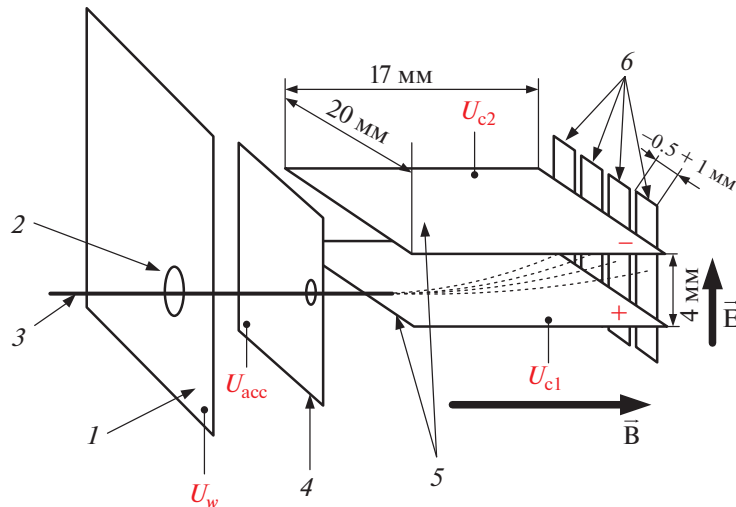


Рис. 4. Схема масс-спектрометрической секции многофункционального зонда. 1 – элемент защитного кожуха, 2 – входное отверстие, 3 – поток ионов, 4 – ускоряющая диафрагма, 5 – пластины плоского конденсатора, 6 – коллекторы ионов.

магнитного поля снижает энергетическое разрешение при регистрации ионов различного зарядового состояния. Для нивелирования обоих этих факторов в масс-спектрометрической секции зонда используется диафрагма, ускоряющая влетавшие в зонд ионы в тороидальном направлении. Расчеты показывают, что, при изменении величины ускоряющего потенциала в области 0–1000 эВ появляется возможность измерять точки ионов с отношением массы иона к заряду m/Z от 1 до 100.

Сводка измерений, выполняемых многофункциональным зондом.

Диапазоны и чувствительности измерений

■ “*In situ*” измерение скорости распыления материалов.

Разрешение: 1–2 распыленных атомных слоев при 20–100 слоях на коллекторе, и 2–5 атомных слоев при 100–1000 напыленных слоях.

■ “*In situ*” измерение скорости формирования слоев твердотельной примеси.

Разрешение: 1–2 атомных слоев при 20–100 слоях на коллекторе, и 2–5 атомных слоев при 100–1000 напыленных слоях.

■ “*In situ*” масс-спектрометрический анализ потока ионов плазмы и примеси.

Диапазон отношений массы иона к заряду $m/Z = 1–100$. Разрешение регистрации $(m/Z)/\Delta(m/Z)$ увеличивается с уменьшением параметра m/Z от трех при $50 < m/Z < 100$ до десяти при $1 < m/Z < 10$.

■ Аккумуляция на коллекторе атомов твердотельной примеси плазмы, быстрых ионов плазмы

и захваченных в осажденный слой атомов газа для последующих измерений.

■ Определение типа и количества атомов газов, сорбированных и захваченных коллектором.

■ Измерение скорости потока периферийной плазмы зондом Маха, а также выполнение измерений, характерных для одиночного зонда Ленгмюра.

■ Экспонирование в плазме образцов для последующего анализа их поверхности внутри кожуха зонда

Многофункциональный зонд для измерения параметров взаимодействия плазмы с кандидатными материалами первой стенки вакуумной камеры термоядерных установок следующего поколения

Термоядерные установки следующего поколения, с большой вероятностью, будут отличаться от ныне действующих и строящихся установок длинными (квазистационарными) плазменными импульсами, значительным радиационным фоном, возможно, использованием жидкометаллической первой стенки. Все эти особенности установок, с одной стороны, внесут много нового в процесс взаимодействия плазмы со стенкой и в механизмы, порождающие потоки примеси в плазму, а, с другой, существенно усложнят их изучение. В частности, существенно возрастет роль “*in situ*” измерений в реальном времени и “*in vacuo*”, анализ образцов, экспонированных в плазме в течение длительного времени.

Можно полагать, что автоматизированный многофункциональный зонд, дополненный

масс-спектрометром в шлюзовой камере и возможностью в автоматическом режиме проводить необходимые измерения выводимых из плазмы образцов в вакуумированной зондовой системе, окажется полезным, как на стадии лабораторных исследований взаимодействий плазма–стенка в установках следующего поколения, так и в процессе последующей эксплуатации установок. Его использование позволит проводить достаточно полный объем измерений различных аспектов взаимодействия плазмы с кандидатными материалами в условиях, соответствующих режимам работы будущих термоядерных установок. Это позволит облегчить выявление слабых сторон исследуемых материалов и ускорить разработку вариантов нейтрализации возможных негативных последствий их использования. Многофункциональный зонд в качестве диагностического средства действующей установки будет полезен для текущего контроля и углубления знаний о плазменных процессах на первой стенке в новом поколении термоядерных установок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены диагностические методы и устройства, используемые для изучения взаимодействия плазмы с контактирующими с плазмой материалами в современных термоядерных установках. Делается вывод о том, что выполняемые ими измерения, зачастую разделенные в пространстве и во времени, и не доступные в режиме “in situ”, не составляют достаточно полный объем информации, необходимый для выявления механизмов, закономерностей и параметров развития процессов на поверхности первой стенки при плазменном воздействии.

Предложено новое диагностическое устройство (многофункциональный зонд), включающее материаловедческую и спектрометрическую части, а также зонды Ленгмюра (одиночный и двойной) и зонд Маха. Многофункциональный зонд предназначен для проведения комплекса масс-спектрометрических и материаловедческих измерений, необходимых для выявления механизмов и закономерностях поверхностных явлений на поверхности первой стенки при плазменном облучении и параметров потоков примеси в плазму.

К особенностям многофункционального зонда можно отнести способность выполнять и анализировать целый ряд материаловедческих и масс-спектрометрических измерений “in-situ” в реальном времени, в частности:

- “In situ” измерение скорости осаждения атомов примеси.
- “In situ” измерение скорости распыления материалов и напыленных слоев.

– “In situ” масс-спектрометрический анализ потока ионов плазмы и примеси в диапазоне отношений массы иона к заряду $m/Z = 1-100$.

– “In situ” анализ энергии ионов H_1^+ и D_1^+ (1–500 эВ).

– Возможность проводить “In situ” масс-спектрометрический анализ потока ионов плазмы и примеси в диапазоне отношений массы иона к заряду $m/Z = 1-100$.

– Способность извлекать для анализа облучаемые плазмой образцы, расположенные внутри и вне кожуха, через вакуумный шлюз на любом этапе работы токамака без прерывания его функционирования.

Делается вывод о том, что автоматизированный многофункциональный зонд, дополненный масс-спектрометром в шлюзовой камере и возможностью в автоматическом режиме проводить необходимые измерения выводимых из плазмы образцов в вакуумированной зондовой системе, окажется полезным, как на стадии исследований взаимодействий плазма–стенка в лабораторных стендах, имитирующих условия термоядерных установок следующего поколения (например, ДЕМО), так и в процессе последующей эксплуатации установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alipour R., Ghorannevissa M., Salar Elahi A. // AIP Advances 2017. V. 7. 115303
<https://doi.org/10.1063/1.4990869>
2. Krupin V.A., Klyuchnikov L.A., Nurgaliev M.R., Nemets A.R., Zemtsov I.A., Dnestrovskiy A.Yu., Grashin S.A., Kislov A.Yu., Myalton T.B., Sarychev D.V., Sergeev D.S., Solovov N.A., Trukhin V.M. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2020. V. 62. 025019.
3. Fornal T., Książek I., Kaczmarczyk J., Figacz W., Kubkowska M., Burhenn R., Kunkel F., Laube R., Renard S., and W7-X Team // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. 093508.
<https://doi.org/10.1063/1.5099448>
4. Gray D.S., Luckhardt S.C., Chousal L., Gunner G., Kellman A.G., Whyte D.G. // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 376.
<https://doi.org/10.1063/1.1642745>
5. Kobayashi T., Kobayashi M., Kuzmin A., Goto M., Tanaka H., Kawamura G., Peterson B.J., Iwama N., and LHD Experiment Group // Plasma and Fusion Research: Regular Articles. 2018. V. 13. 3402030.
<https://doi.org/10.1585/pfr.13.3402030>
6. Ewald F., Schwoerer H., Düsterer S., Sauerbrey R., Magill J., Galy J., Schenkel R., Karsch S., Habs D., Witte K. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2003. V. 45.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/45/12A/006>
7. Philipps V., Wienhold P., Kirschner A., Rubel M. // Vacuum. 2002. V. 67. Iss. 3–4. P. 399.
[https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00238-5](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00238-5)

8. *Hu Z., Li C., Xiao Q., Liu P., Ding F., Mao H., Wu J., Zhao D., Ding H., Luo G.N., and EAST team* // Plasma Sci. Technol. 2017. V. 19. 025502.
<https://doi.org/10.1088/2058-6272/19/2/025502>
9. *Hu Z., Gierse N., Li C., Liu P., Zhao D., Sun L., Oelmann J., Nicolai D., Wu D., Wu J., Mao H., Ding F., Brezinsek S., Liang Y., Ding H., Luo G., Linsmeier C.* // Phys. Scr. 2017. V. 170. 014046.
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa8650>
10. *Veis P., Marín-Roldán A., Dwivedi V., Karhunen J., Paris P., Jögi I., Porosnicu C., Lungu C.P., Nemanic V., Hakola A.* // Phys. Scr. 2020. V. 171. P. 014073
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab7ebd>
11. *Liu P., Wu D., Sun L.Y., Zhao D.Y., Hai R., Li C., Ding H., Hu Z.H., Wang L., Hu J.S., Chen J.L., Luo G.N., and EAST team* // Fusion Eng. Des. 2017. V. 118. P. 98.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.021>
12. *Li C., Zhao D., Hu Z., Wu X., Luo G. N., Hu J., Ding H.* // Journal of Nuclear Materials. 2020. V. 467. P. 915.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.064>
13. *Kuzmina A., Zushi H., Takagi I., Sharma S.K., Rusinov A., Inoue Y., Hirooka Y., Zhou H., Kobayashi M., Sakamoto M., Hanada K., Yoshida N., Nakamura K., Fujisawa A., Matsuoka K., Idei H., Nagashima Y., Hasegawa M., Onchi T., Banerjee S., Mishrad K.* // Journal of Nuclear Materials. 2015. V. 463. P. 1087.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.092>
14. *Nachtrieb R., LaBombard B., Thomas E.Jr.* // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71. № 11. P. 4107.
<https://doi.org/10.1063/1.1311942>
15. *Watkins J.G., Salmonson J., Moyer R., Doerner R., Lehmer R., Schmitz L., Hill D.N.* // Rev. Sci. Instrum. 1992. V. 63. P. 4728
<https://doi.org/10.1063/1.1143621>
16. *Zhang W., Chang J.F., Wan B.N., Xu G.S., Xiao C.J., Li B., Xu C.S., Yan N., Wang L., Liu S.C., Jiang M., Liu P.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. 113501.
<https://doi.org/10.1063/1.3499237>
17. *Fukumoto M., Sakurai S., Asakura N., Itami K.* // Plasma and Fusion Research: Regular Articles. 2013. V. 8. 1405153.
<https://doi.org/10.1585/pfr.8.1405153>
18. *Xu J.C., Wang L., Xu G.S., Feng W., Liu H., Liu J.B., Zhang W., Ming T.F., Yip C.-S., Deng G.Z., Dai S.Y., Yao D.M., Luo G.N., Guo H.Y.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2018. V. 46. № 5. P. 1331.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2794533>
19. *Dejarnac R., Sestak D., Gunn J.P., Firdaouss M., Greuner H., Pascal J.-Y., Richou M., Roche H.* // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 163. 112120
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112120>
20. *Гомм Ю.В., Курнаев В.А., Вайсберг О.Л.* Корпускулярная диагностика лабораторной и космической плазмы. М.: МИФИ, 2008.
21. *Takeuchi H., Matsuda T., Miura Y., Shiho M., Maeda H., Hashimoto K., Hayashi K.* // JAERI-M. 1983. V. 83. P. 146.
22. *Matthews G.F., Pedgley J.M., Pitts R.A., Stangeby P.C.* // Journal of Nuclear Materials. 1990. V. 176–177. P. 1032.
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(90\)90187-R](https://doi.org/10.1016/0022-3115(90)90187-R)
23. *Matthews G.F., Elder D., McCracken G.M., Monk R.D., Pitts R.A., Samm U., Schweer B., Stangeby P.C.* // Journal of Nuclear Materials. 1992. V. 196. P. 253.
[https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(06\)80041-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(06)80041-3)
24. *Matthews G.F., Schustereder W., Cant N., Erents S.K., Vince J., Qayyum A., Mair C., Scheier P., Märk T.D.* // International Journal of Mass Spectrometry. 2003. V. 223–224. P. 45.
[https://doi.org/10.1016/S1387-3806\(02\)00779-0](https://doi.org/10.1016/S1387-3806(02)00779-0)
25. *Schustereder W.* // Proc. XXVIII Intern. Conf. Phenomena in Ionized Gases. 2007. 28th ICPIG, July 15–20, Prague. P. 1628.
26. *Bili L., Enyao W., Wei G., Baonian W., Jiangang L.* // Plasma Science & Technology. 2005. V. 7. № 2. P. 2716.
<https://doi.org/10.1088/1009-0630/7/2/005>
27. Патент RU 166465
28. *Rubel M., Wienhold P., Hildebrandt D.* // Vacuum. 2003. V. 70. P. 423.
[https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00681-4](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00681-4)
29. *Rubel M.J., Coad J.P., Wienhold P., Matthews G., Philipps V., Stamp M., Tanabe T.* // Phys. Scr. 2004. V. 111. P. 112.
<https://doi.org/10.1238/Physica.Topical.111a00112>
30. *Notkin M., Hron M.* // 33rd EPS Conf. Plasma Phys. 2006. Rome, 19–23 ECA V.30I, P-4.075
31. *Беграмбеков Л.Б., Шугин П.А.* // ПТЭ. 2004. № 2. С. 143.