
**МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ
ДЛЯ НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

УДК 533.924

**О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКТРОСКОПИИ РАССЕЯНИЯ
ПРОТОНОВ КЭВНЫХ ЭНЕРГИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТИ
ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ ЭЛЕМЕНТОВ НЕПОСРЕДСТВЕННО
В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ С СОБСТВЕННЫМ
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

© 2020 г. **В. А. Курнаев^а**, Д. Г. Булгадарян^{а, *}, Д. Н. Синельников^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

^{*}E-mail: DBGulgadaryan@mephi.ru

Поступила в редакцию 31.07.2020 г.

После доработки 31.07.2020 г.

Принята к публикации 31.07.2020 г.

Процессы эрозии и переосаждения обращенных к плазме материалов термоядерных установок (ТЯУ) являются важнейшими факторами, влияющими на конечные параметры получаемой плазмы, ресурс первой стенки и ТЯУ в целом. Метод анализа тонких слоев на поверхности с помощью рассеяния ионов водорода кэвных энергий расширяет функциональные возможности определения скорости эрозии и осаждения слоев с большим атомным номером на подложку из легкого элемента, либо, наоборот, легких слоев на тяжелую подложку, что характерно для современных термоядерных установок. Анализ осаждения и/или эрозии заключается в помещении в плазменную установку специальных маркерных мишеней со слоями материала с малым атомным номером и/или материала с большим атомным номером в те места установки, в которых предполагается исследовать скорость эрозии и/или осаждения, с последующим анализом энергетических спектров отраженных от экспонированных мишеней ионов водорода с энергиями в килоэлектронвольтном диапазоне. В данной работе приведены оценки применимости данной методики непосредственно в ТЯУ с учетом характерных параметров пристеночной плазмы.

Ключевые слова: взаимодействие плазмы с поверхностью, ионное рассеяние, анализ поверхности

DOI: 10.1134/S2079562920040107

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых аспектов, определяющих работоспособность современных термоядерных установок (ТЯУ), является поверхностно-плазменное взаимодействие, приводящее, в том числе, к эрозии и переосаждению материалов обращенных к плазме элементов (ОПЭ) [1, 2].

Компьютерное моделирование [3, 4] и проведенные на установке “Большой масс-монохроматор “МИФИ” эксперименты [5, 6] показали, что спектроскопия рассеяния протонов кэвных энергий может быть применена для анализа толщины поверхностных слоев из тяжелого материала на легкой подложке (и наоборот) в диапазоне толщин до нескольких десятков нанометров, что релевантно современным ТЯУ, в которых используются комбинации легких и тяжелых материалов ОПЭ. Использование протонов кэвных энергий делает возможным применение данной методики непосредственно в термоядерных установках с

магнитным удержанием. В работе [7] описаны испытания анализатора, реализующего данную методику, на линейном симуляторе ПР-2. В данной работе приведены оценки применимости метода с учетом движения первичных и отраженных частиц в слое пристеночной плазмы с параметрами, характерными для современных ТЯУ.

2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТЫ

Анализ энергетических спектров протонов, отраженных от бериллиевой мишени с поверхностным слоем вольфрама разной толщины [4], показывает, что с ростом толщины вольфрамового слоя растет амплитуда и полуширина пика, сформированного этим слоем. При толщинах вольфрама до 10 нм, диагностическом пучке ионов водорода с энергией до 25 кэВ и регистрации отраженных частиц под углом 30°–60° зависимость полуширины пика от толщины слоя хо-

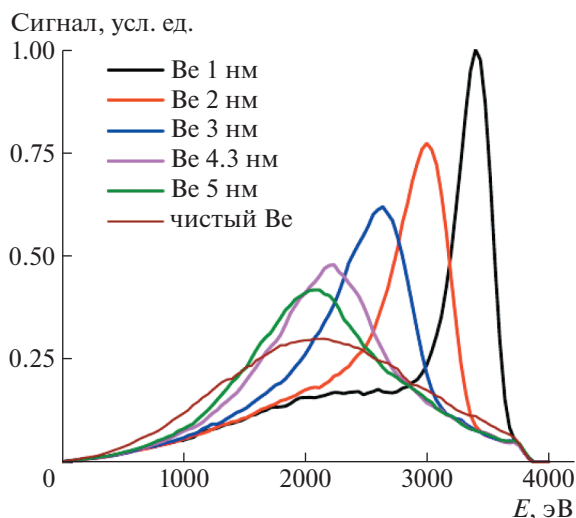


Рис. 1. Расчетные энергетические спектры ионов водорода с начальной энергией $E_0 = 4000$ эВ, отраженных на угол $\theta \approx 40^\circ$ от трехслойной мишени, состоящей из бериллиевой подложки, тонкого (0.6 нм) слоя вольфрама и напыленного поверх него слоя бериллия разной толщины. Также показан референсный спектр частиц, отраженных от чистого бериллия.

рошо аппроксимируется линейной функцией. При использовании энергоанализатора с энергетическим разрешением порядка 0.01 погрешность определения толщины поверхностного слоя составляет ~ 0.3 нм. Естественно, что с уменьшением энергии ионов диагностического пучка погрешность падает, но при этом уменьшается и диапазон толщин поверхностного слоя, в котором зависимость толщины от ширины пика является линейной. Например, при начальной энергии пучка $E_0 = 4000$ эВ погрешность определения толщины в диапазоне 0.5–2.5 нм составляет 0.15 нм. При увеличении энергии возрастает глубина анализа и положительная зарядовая фракция отраженных частиц [8], что повышает чувствительность метода или снижает необходимую для проведения анализа дозу облучения. В диапазоне энергий 4–25 кэВ разрешение по глубине более чем на порядок выше, чем при использовании спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния (~ 5 нм), что позволяет определять скорость осаждения при существенно меньшей экспозиции в плазме.

На рис. 1 в качестве примера показаны смоделированные в коде бинарных столкновений SCATTER [9] энергетические спектры ионов водорода с начальной энергией $E_0 = 4000$ эВ, отраженных от маркерной мишени, состоящей из бериллиевой подложки и тонкого (0.6 нм) слоя вольфрама, на поверхность которого происходит осаждение бериллия. С увеличением толщины

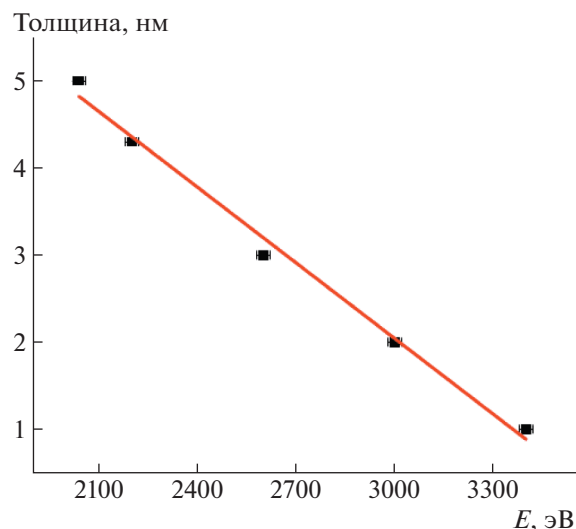


Рис. 2. Зависимость положения пика от толщины поверхностного слоя Ве.

поверхностного слоя бериллия пик, сформированный ионами, смещается в сторону низких энергий. Зависимость толщины слоя бериллия от положения пика в диапазоне толщин вплоть до 5 нм линейна (рис. 2). Погрешность определения толщины поверхностного слоя в данном случае составляет не более 0.16 нм, что в ~ 20 раз меньше, чем при методе обратного резерфордовского рассеяния. Таким образом, использование маркерной мишени с тонким слоем напыленного вольфрама позволяет определять осаждение слоев Ве до толщины примерно 4.5 нм, даже используя для анализа низкоэнергетические пучки ионов водорода. Увеличение энергии существенно повышает глубину анализа. Трехслойная маркерная мишень со слоем Ве, нанесенного поверх слоя вольфрама, наоборот, позволит определить его эрозию по мере утонения напыленного слоя. Если маркерная мишень установлена на подвижном вводе, который позволяет ее периодически извлекать из установки для анализа, то рассеяние ионов водорода кэВных энергий позволяет следить за осаждением даже после незначительной по времени экспозиции в установке.

Как показали эксперименты, описанные в статье [5], нанесение тяжелых элементов на подложку из более легкого материала (Au на Si) позволяет при той же энергии диагностического пучка в 25 кэВ контролировать по ширине спектра отраженных частиц толщину осажденного слоя до 7 нм. Таким образом, с использованием специально приготовленных маркерных мишеней с помощью рассеяния ионов водорода кэВных энергий можно контролировать как процессы осаждения, так и эрозии в разных обращенных к плазме

элементах установок тонких слоев вещества либо с большим, либо с малым атомным номером.

Этот метод также возможно применять непосредственно в термоядерных установках *in situ*, без извлечения маркерной мишени из установки. 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 [7].

Например, для поля на внешнем обводе тора величиной 3 Тл ларморовский радиус протонов

$$R_{Lp} [\text{м}] = 1.44 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{E [\text{эВ}]} }{B [\text{Тл}]} \text{ с энергией 8 кэВ со-}$$

ставляет всего 0.43 см, что позволяет реализовать данный анализатор в очень маленьком объеме как вставную часть обращенных к плазме элементов (рис. 3). Входная щель размером примерно в 1 мм вырезает из пучка различных по массе ионов водорода только протоны, поэтому компонентный состав извлекаемого из источника пучка не влияет на результаты анализа. Анализ можно проводить непосредственно во время рабочего импульса, так как длина свободного пробега протонов с энергией порядка 10 кэВ в пристеночной плазме с типичными параметрами: экспоненциально спадающая концентрация от $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ у сепаратрисы до $\sim 10^9 \text{ см}^{-3}$ у стенки делает длину свободного пробега частиц диагностического пучка много больше длины их траектории до попадания на контрольную мишень и затем на конвертор. Действительно, даже при концентрации нейтралов $n_a \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и сечении перезарядки $\sigma_{cx} \approx 10^{-15} \text{ см}^2$ [10] длина свободного пробега $\lambda = 1/(n_a \sigma_{cx}) \approx 100 \text{ см}$, то есть много больше R_{Lp} . Расчетное пристеночное падение потенциала $\sim 3kT_e$ [11] действует на очень небольшой длине порядка долей мм, сначала тормозя, а затем ускоряя ионы диагностического пучка, и практически не влияет на траекторию протонов с энергией порядка 10 кэВ. В [12] на основании данных о параметрах пристеночной плазмы в разных токамаках приведены значения величины электрического поля, которое может быть достаточно сильным, но лишь на малых расстояниях.

Экспериментальные данные по распределению плотности и температуры плазмы в пристеночной области в самом крупном в настоящее время токамаке JET в H-моду показывают [13], что даже с учетом формирования локализованной на периферии моды с повышенными потоками энергии в пристеночном слое (ELM) на расстоянии 2–3 см от стенки концентрация плазмы не превышает 10^{13} см^{-3} , а температура составляет 50 эВ и к стен-

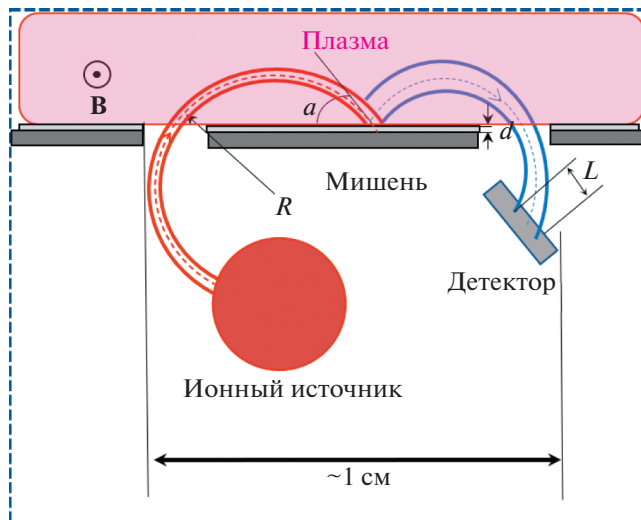


Рис. 3. Принципиальная схема работы встраиваемого анализатора поверхности по ионному рассеянию для применения в термоядерных установках.

ке плавно падает. После прохождения ELM электронная температура совсем низкая (до 30 эВ, что дает значение пристеночного падения потенциала менее 100 эВ).

Несколько сложнее обстоит дело с отраженными протонами в низкоэнергетической части спектра при установке анализатора в области дивертора. В случае повышенной концентрации нейтральных атомов, как, например, это может быть в так называемом газовом диверторе (в котором концентрация может повышаться до $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$), достигающий конвертера поток частиц может быть ослаблен из-за перезарядки. Следует также иметь в виду, что на последнем участке траектории первичных ионов до падения на мишень перезарядка в нейтралы практически не влияет на угол падения частиц, а формирование отраженной протонной фракции не зависит от начального зарядового состояния падающих частиц. Поэтому в большинстве случаев рассеянием частиц и их перезарядкой на нейтралах в пристеночном слое можно пренебречь [14].

Для установок со сверхпроводящим соленоидом тороидального магнитного поля такой анализ в промежутках между плазменными импульсами вообще свободен от наводок и возможных дополнительных искажений сигнала в пристеночной плазме. Для увеличения чувствительности ширина ленточного пучка и, следовательно, полная интенсивность извлекаемого из источника ионов тока может быть увеличена в направлении магнитного поля без большого изменения разрешающей способности анализатора, не-

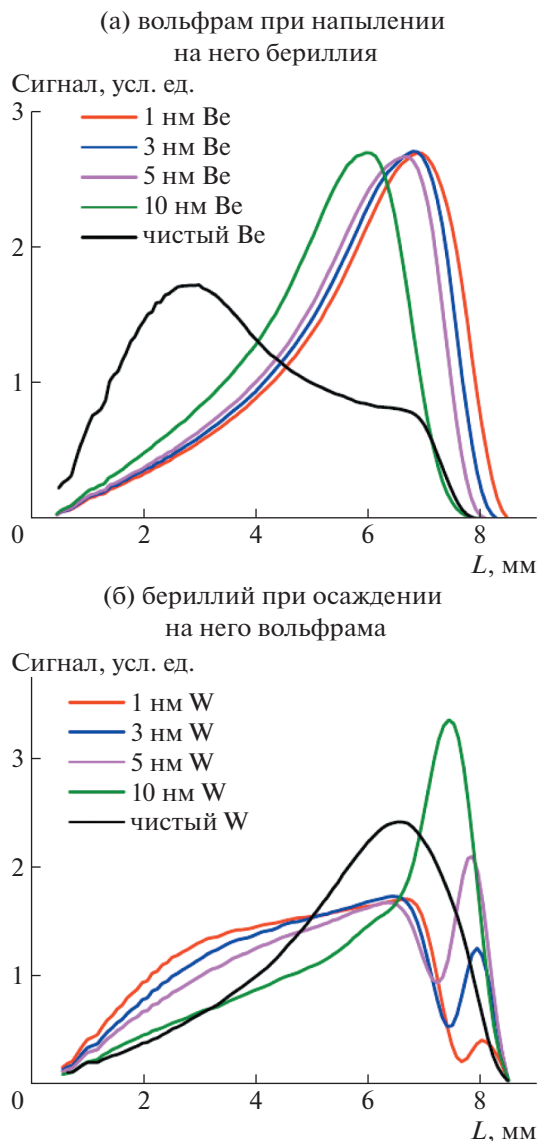


Рис. 4. Расчетные распределения по длине конвертера протонов, отраженных от контрольной мишени при энергии протонов 8 кэВ и угле падения на мишень 45° .

сколько ухудшающейся из-за попадания на поверхность конвертера частиц, отраженных под углами, лежащими вне плоскости рисунка, однако их вклад довольно мал, так как при таких углах падения отраженный пучок еще сильно анизотропен с максимумом интенсивности вблизи угла зеркального отражения. На рис. 4 приведены рассчитанные в коде SCATTER с учетом движения частиц в магнитном поле распределения по длине конвертера отраженных протонов для двух типичных случаев: осаждения тонких слоев бериллия на поверхности вольфрама и, наоборот, — осаждения атомов вольфрама на поверхность из

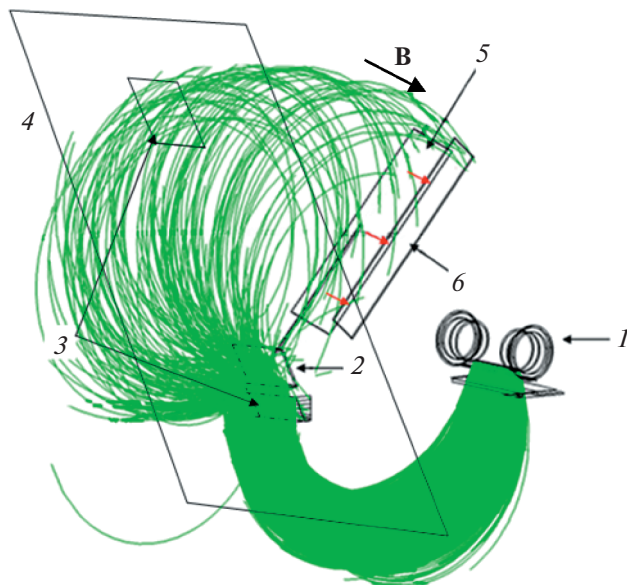


Рис. 5. Движение частиц в модели встраиваемого анализатора. 1 — ионный источник, 2 — мишень, 3 — диафрагмы для входа в разрядную камеру пучка и выхода отраженных частиц, 4 — элемент первой стенки, 5 — ионно-электронный конвертор, 6 — позиционно-чувствительный детектор, стрелками показано направление движения вторичных электронов.

бериллия. Видно, что заметное изменение спектра при анализе осаждения Ве на W начинается при толщинах порядка 10 нм. При осаждении же W на Ве даже при очень тонких слоях осажденного вещества наблюдается очень резкий рост высокоэнергетического пика при толщинах до 10 нм.

На рис. 5 показаны траектории движения первичных и отраженных от мишени протонов в виртуальном макете подобного анализатора, смоделированные в пакете COMSOL Multiphysics. При моделировании ионного источника расходимость моноэнергетического пучка протонов была принята равной 8° , поэтому наблюдается достаточно большой угловой разброс траекторий. Частицы ускоряются в промежутке между ионным источником и электродом, находящимся под потенциалом первой стенки и диафрагмируются в плоскости первой стенки установки и движутся в поперечном магнитном поле до и после столкновения с мишенью. Поле в пределах траектории ионов можно считать практически однородным из-за малого радиуса траектории ионов, в пределах которого изменение значения тороидального магнитного поля существующих и проектируемых термоядерных установок очень мало $R_{Lp}/R = (1-5) \cdot 10^{-3}$, где R — значение большого радиуса установки в месте расположения анали-

затора. Отраженные от мишени протоны также через щель попадают в конвертор, состоящий из наклоненной по отношению к магнитному полю установки пластины, эмитированные из которой вторичные электроны, распространяясь с малым ларморовским радиусом вдоль поля, попадают в позиционно чувствительный детектор вторичных электронов.

В модели учитывалась резонансная перезарядка первичных ионов на нейтральных атомах водорода с повышенной их концентрацией (10^{13} см^{-3}) при сечении перезарядки 10^{-15} см^2 . Поскольку при этом длина свободного пробега значительно больше характерной длины траектории протонов в анализаторе ($\sim 3 \text{ см}$), то существенного ослабления потока первичных частиц не происходит. Таким образом, регистрируя изменение сигнала в наиболее характерных областях попадания частиц на поверхности конвертора, можно наблюдать начальные стадии процесса осаждения слоев элементов с резко отличающимся атомным номером.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена схема реализации спектроскопии рассеяния протонов кэВных энергий непосредственно в ТЯУ с магнитным полем для непосредственного контроля переосаждения вещества на обращенный к плазме контрольный элемент поверхности установки, расположенный на уровне окружающих его поверхностей. Приведены смоделированные энергетические спектры отраженных протонов при их начальной энергии $\sim 10 \text{ кэВ}$, демонстрирующие реализуемость методики при движении первичных и отраженных частиц в собственном магнитном поле установки с полем порядка единиц Тесла. Проведены оценки, показывающие, что рассеянием частиц в пристеночной плазме с характерными для современных ТЯУ параметрами можно пренебречь.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Philipps V., Wienhold P., Kirschner A., Rubel M. // *Vacuum*. 2002. V. 67. P. 399.
2. Naujoks D., Behrisch R. // *J. Nucl. Mater.* 1995. V. 220–222. P. 227.
3. Bulgadaryan D., Kolodko D., Kurnaev V., Sinelnikov D. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 748. P. 012016.
4. Bulgadaryan D., Kurnaev V., Sinelnikov D., Efimov N. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 941. P. 012022.
5. Bulgadaryan D., Sinelnikov D., Kurnaev V., Efimov N., Borisyuk P., Lebedinskii Y. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B., Sect. B.* 2019. V. 438. P. 54.
6. Bulgadaryan D.G., Sinelnikov D.N., Efimov N.E., Kurnaev V.A. // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys., Sect. B.* 2020. V. 84. P. 742.
7. Булгадарян Д.Г., Синельников Д.Н., Сорокин И.А., Курнаев В.А., Ефимов Н.Е. // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2019. Т. 10. № 1. С. 63–66 [Bulgadaryan D.G., Sinelnikov D.N., Sorokin I.A., Kurnaev V.A., Efimov N.E. // *Phys. At. Nucl.* 2019. V. 82. P. 1364].
8. Курнаев В.А., Протасов Ю.С., Цветков И.В. // *Введение в пучковую электронику*. 2008. Москва: Троянт.
9. Koborov N.N. et al. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 1997. V. 129. P. 5.
10. Смирнов Б.М. // *Физическая энциклопедия* (в 5-ти томах). Гл. ред. Прохоров А.М. 1988. Москва: Советская энциклопедия.
11. Stangeby P.C. // *Nucl. Fusion*. 2012. V. 52. P. 083012.
12. Kurnaev V.A., Tatarinova N.V. // *J. Nucl. Mater.* 1995. V. 220–222. P. 939.
13. Borodkina I., Borodin D., Kirschner A., Tsvetkov I.V., Kurnaev V.A., Komm M., Dejarnac R., *JET Contributors* // *Contrib. Plasma Phys.* 2016. V. 56. P. 640.
14. Wiesen S., Brezinsek S., Wischmeier M., la Luna E.D., Groth M., Jaervinen A.E., de la Cal E., Losada U., de Aguilera A.M., Frassinetti L., Gao Y., Guillemaut C., Harting D., Meigs A., Schmid K., Sergienko G., *JET Contributors* // *Nucl. Fusion*. 2017. V. 57. P. 066024.

On the Possibility of Surface Analysis by keV-Energy Proton Scattering in Magnetic Fusion Devices

V.A. Kurnaev^{1, †}, D.G. Bulgadaryan^{1, *}, and D.N. Sinelnikov¹

¹ National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: DGBulgadaryan@mephi.ru

Received July 31, 2020; revised July 31, 2020; accepted July 31, 2020

Erosion and redeposition processes of plasma-facing materials in fusion devices are the essential factors affecting near-wall and core plasma parameters and device lifetime. To determine the possibility of *in situ* analyzing these processes we developed the experimental model of built-in surface analyzer utilizing low-energy

proton scattering spectroscopy. We present the results of experimental approbation of the proposed method. The processes of erosion and redeposition of plasma-facing materials in fusion devices are some of the most important factors affecting the plasma parameters and the resource of the first wall. The method of analyzing thin layers on a surface using keV-energy proton scattering expands the functionality of determining the rate of erosion and deposition of layers with a large atomic number on a substrate from a light element, or, conversely, light layers on a heavy substrate, which is typical for modern fusion installations. The analysis of deposition and/or erosion consists in placing special marker targets with layers of material with a low atomic number and/or material with a large atomic number in the places of the installation in which it is supposed to study the rate of erosion and/or deposition, with the subsequent analysis of energy spectra of hydrogen ions reflected from exposed targets with energies in the kiloelectron-volt range. In this paper, estimates of the applicability of this technique directly in a fusion device are given, considering the characteristic parameters of the near-wall plasma.

Keywords: plasma-surface interaction, ion scattering, surface analysis

[†] Deceased.