

И.А. НИКИТИН*, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, Н.Е. ЕФИМОВ,
М.В. ГРИШАЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
** iv.an.nikitin@mail.ru*

АНАЛИЗ АДсорбЦИИ ПРОТИЯ И ДЕЙТЕРИЯ НА МАТЕРИАЛЫ ТЯЖ С ПОМОЩЬЮ ИОННОГО РАССЕЯНИЯ И АТОМОВ ОТДАЧИ

Одним из ключевых вопросов при создании будущих термоядерных установок является взаимодействие плазмы с поверхностью, которое ведёт, в частности, к накоплению изотопов водорода в обращённых к плазме элементах. Существуют строгие ограничения на допустимое количество накопленного трития, что связано с требованиями безопасности. Это приводит к необходимости развития различных методик анализа поверхности.

Спектроскопия рассеяния ионов низких энергий (LEIS, low energy ion scattering) является методикой анализа поверхности, обладающей высокой чувствительностью к составу и структуре первых поверхностных слоёв. При использовании угла рассеяния менее 90° в детектор будут попадать не только рассеянные ионы, но и ионизованная компонента атомов отдачи. Это позволяет применять малоугловую LEIS спектроскопию для анализа адсорбированного водорода [1] или воды [2]. Однако в случае количественного анализа, как, например, в [3], авторы зачастую не учитывают ряд факторов, таких как сечения рассеяния, влияние используемого энергоанализатора, что может приводить к некорректным результатам. Соответственно, требуется совершенствование этого метода анализа поверхности.

LEIS спектроскопия реализована на установке «Большой масс-монохроматор «МИФИ» (рис. 1). Ионы инертных газов или водорода, ускоренные до энергий в диапазоне 1-25 кэВ, могут применяться в качестве первичного пучка. Подробное описание данной установки может быть найдено в [4]. В описываемых в этом докладе экспериментах по исследованию адсорбции водорода применялось охлаждение мишени, для того чтобы увеличить количество адсорбата на поверхности. Кроме того, для изменения угла рассеяния использовалась мишень, помещённая на ввод движения.

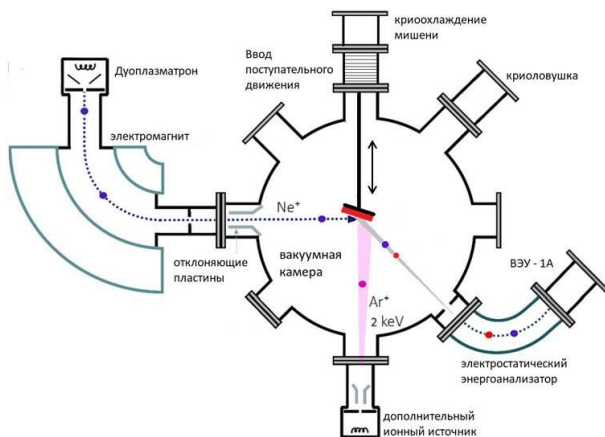


Рисунок 1 – схема установки «Большой масс-монохроматор «МИФИ»

Для демонстрации принципиальной возможности определения концентраций изотопов водорода на поверхности по энергоспектрам LEIS применялось моделирование рассеяния атомов аргона на мишени, покрытой смесью из протия и дейтерия с разными соотношениями этих элементов в коде SDTrimSP [5]. По результатам этого моделирования продемонстрировано, что определение концентраций изотопов водорода по спектрам LEIS возможно и даёт ошибку не более 9%.

В ранее проводившихся на «Большом масс-монохроматоре «МИФИ» экспериментах не удавалось с хорошей повторяемостью получить спектры рассеяния, включающие как протий, так и дейтерий. Для получения таких спектров было применено охлаждение мишени в сочетании с экспозицией образца в парах тяжёлой воды. Такой способ получения спектра применим для нахождения оптимальных условий изучения изотопов водорода на поверхности.

Также на получаемые спектры влияние оказывает геометрия эксперимента. Чтобы исследовать этот фактор, мишень закреплялась на вводе поступательного движения. В роли мишени был выбран поликристаллический полированный вольфрам. Перемещение мишени приводило к изменению угла рассеяния. Его величина определялась по энергии пика выбитого кислорода на спектре отрицательных ионов, так как для него изменение угла рассеяния приводит к наибольшему изменению энергии пика. Полученные спектры для положительных ионов представлены на рис. 1. На данных спектрах наблюдается резкая зависимость соотношения высот пиков рассеяния аргона от вольфрама и выбитого протия от угла

рассеяния. Эта зависимость не соотносится с результатами моделирования рассеяния на аналогичные углы и зависимостью соотношений сечений рассеяния от угла.

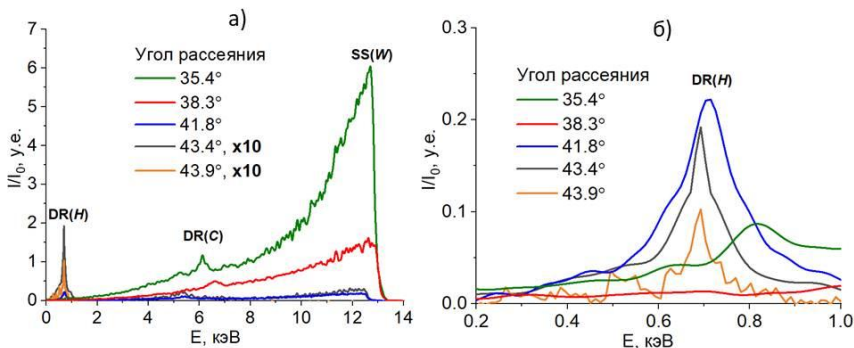


Рисунок 2 – Спектры рассеяния ионов Ar с начальной энергией 14 кэВ от мишени из W , I – ток рассеянных ионов и ионизированные атомы отдачи, I_0 – ток на мишень а) полный спектр, б) участок с пиков протия

В вышеописанных экспериментах движение мишени в направлении держателя (см. рис. 1) приводило к увеличению угла рассеяния. При этом происходило уменьшение угла падения, так как возможность вращения мишени отсутствовала. В связи с этим влияние угла падения на получаемые спектры было рассмотрено отдельно. Для этого расположенная в центре камеры взаимодействия мишень вращалась вокруг своей оси. В данном эксперименте появление пика протия не наблюдалось, что показывает отсутствие связи между наблюдавшимся изменением соотношений амплитуд пиков рассеяния и выбитого протия и углом падения.

Таким образом, в работе с помощью средств численного моделирования показана принципиальная возможность проведения анализа адсорбции изотопов водорода на поверхности с помощью спектроскопии малоуглового рассеяния ионов. Экспериментально продемонстрировано, что чувствительность данной методики к водороду на поверхности вольфрама растёт с увеличением угла рассеяния значительно более резко, чем она должна была бы расти в соответствии с сечениями рассеяния. Причина данного феномена на текущий момент неясна, что требует дальнейшего изучения.

Литература

[1] I. Kambali et al. Applied Surface Science 254 (2008) 4245-4250

- [2] M.H. Mintz, N. Shamir *Applied Surface Science* V. 252 (2005) 633–640
- [3] Z.A. Piazza et al. *J. Phys. Chem.*, 125 (2021) 16086-16096
- [4] D. Bulgadaryan et al. *J. Phys. Conf. Ser.* 748 (2016) 012016
- [5] A. Mutzke et al. *SDTrimSP Version 6.00: IPP report 2019-02* (2019) 91 p