

Н.Е. ЕФИМОВ^{1*}, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ¹, Д.Г. БУЛГАДАРЯН¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

*NEEfimov@mephi.ru

КАЛИБРОВКА АНАЛИЗАТОРА ПОТОКОВ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ ДЛЯ ТОКАМАКА МИФИСТ

Один из наиболее распространённых методов определения температуры ионной компоненты плазмы в токамаках подразумевает анализ энергетических распределений нейтралов перезарядки, покидающих область плазменного шнура. Для этого поток частиц из разрядной камеры предварительно ионизуют и затем осуществляют его разделение в электростатических или магнитных сепараторах. Обдирка нейтральных атомов, как правило, осуществляется путём их пропускания через газовую среду или сквозь тонкую (~50 Å) углеродную плёнку. При этом в случае анализа нейтралов с энергиями до 5 кэВ газовая обдирка оказывается более эффективной [1].

МИФИСТ – малый учебно-исследовательский токамак ($a = 13$ см, $R = 25$ см) с тороидальным полем до 0,8 Тл, током плазмы порядка 8 кА и ожидаемой температурой ионов 200 эВ [2]. Для анализа энергетических распределений потока нейтральных атомов из плазмы будет применена комбинация газовой мишени (длина 50 мм, диаметры входного и выходного отверстий 1 мм) и электростатического энергоанализатора с плоскопараллельными пластинами и тормозящим полем. Подобная конструкция ранее применялась на малых токамаках и отличается надёжностью и компактностью [3].

В качестве рабочего вещества газовых ионизаторов в токамаках распространены H_2 и N_2 . В данной работе предложено применить для обдирки гексафторида серы. Этот газ привлекателен высокой температурой сублимации (-63,8 °С), что позволяет поддерживать низкий уровень его парциального давления в вакуумной камере за счёт применения азотной криоловушки. Таким образом, снижаются требования на скорость откачки основными высоковакуумными насосами данной диагностики. За счет высокой энергии сродства к электрону SF_6 применяется как газ, повышающий вакуумную электрическую изоляцию путем захвата свободных электронов, что также может привести к более эффективной ионизации нейтральных атомов водорода.

В рамках данной работы на ионно-пучковой установке «Большой масс-монохроматор «МИФИ» [4] проведено определение зависимости

коэффициента обдирки атомов водорода при прохождении через различные газовые мишени (H_2 , N_2 , SF_6 , Ar) от давления газа и энергии частиц. В качестве источника нейтральных атомов водорода кэВных энергий использован эффект перезарядки пучка моноэнергетических ионов на твердотельной золотой мишени при малоугловом рассеянии. Показано, что применение SF_6 по сравнению с остальными газами позволяет достичь лучшей эффективности обдирки атомов при меньшем давлении газа (рис. 1), что снижает требования к системе откачки анализатора. Получена кривая зависимости коэффициента ионизации атомов водорода от их энергии (рис. 2), позволяющая осуществить восстановление истинной формы спектра после обдирки атомов.

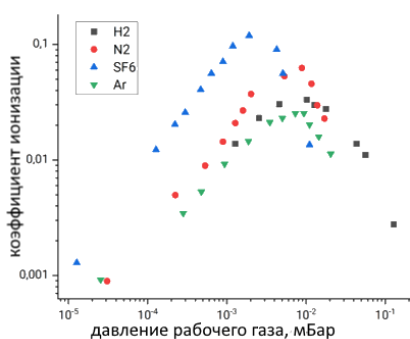


Рисунок 1. Зависимость коэффициента ионизации атомов водорода с энергией 3 кэВ от давления при различных рабочих газах.

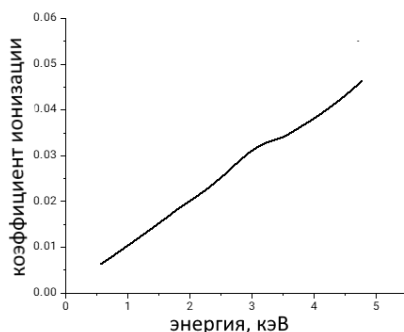


Рисунок 2. Зависимость коэффициента ионизации при рабочем газе SF_6 с давлением $7E-4$ мБар от энергии атомов водорода.

Для определения влияния аппаратной функции анализатора на форму энергетического распределения проведено компьютерное моделирование в среде Comsol Multiphysics траектории движения ионов в созданном электростатическом энергоанализаторе (рис. 3), а также экспериментальная проверка на моноэнергетическом пучке ионов водорода различных энергий. Получены численная и экспериментальная зависимости энергии настройки каждого канала от разности потенциалов на обкладках, а также зависимость $\Delta E/E$ от номера канала (рис. 4). Наблюдается хорошее согласие модели с экспериментом, что позволяет использовать её в дальнейшем для более широкого диапазона энергий частиц. Энергетическое разрешение для каналов

оказывается не хуже 20%.

Таким образом, в работе проведена разработка и калибровка анализатора нейтралов перезарядки для токамака МИФИСТ. Предложена методика определения зависимости коэффициента обдирки нейтралов от давления газовой мишени и энергии частиц с помощью ионного пучка. Показана целесообразность применения гексафторида серы для обдирки пучка атомов, получены калибровочные зависимости для восстановления истинного энергетического распределения частиц.

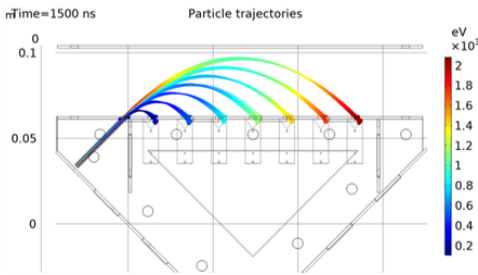


Рисунок 3. Траектории движения протонов с различными энергиями в электрическом поле анализатора нейтралов при потенциале на верхней обкладке 1200 В. Расчёт в Comsol Multiphysics 5.6.

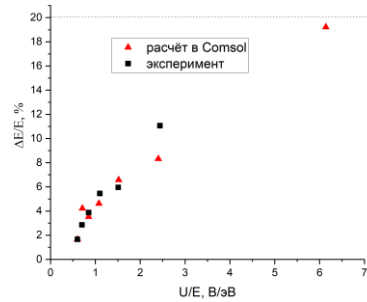


Рисунок 4. Зависимость разрешения анализатора от отношения потенциала на сетке к энергии диагностического пучка ионов.

Список использованных источников

- [1] Kislyakov A.I., Petrov M.P. Neutral atom analyzers for diagnosing hot plasmas: A review of research at the ioffe physicotechnical institute // Plasma Phys. Reports. 2009. Vol. 35, № 7. P. 535–551.
- [2] Kirneva N.A. et al. Working area of the mephist tokamak: Preliminar estimation // Probl. At. Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion. 2020. Vol. 43, № 3. P. 90–100.
- [3] Ajay K., Pandya S.P., Aggarwal S. Experimental Results of Core Ion Temperature and Neutral Density Measurements on ADITYA Tokamak using Four Channels Neutral Particle Analyzer // J. Fusion Energy. Springer US, 2020. Vol. 39, № 3. P. 111–121.
- [4] Bulgadaryan D. et al. Application of keV-energy proton scattering for thin film analysis // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. Elsevier, 2019. Vol. 438, № August 2018. P. 54–57.