

04;10

Исследование примесей в плазменной струе ускорителя с замкнутым дрейфом электронов

© О.А. Горшков, Е.Н. Дышлюк

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Исследовательский центр им. М.В. Келдыша», Москва
E-mail: kercgor@dol.ru

В окончательной редакции 31 октября 2007 г.

Представлен бесконтактный метод диагностики скорости эрозии стенок разрядной камеры ускорителя с замкнутым дрейфом электронов в режиме реального времени. Метод основан на исследовании интенсивностей спектральных линий распыляемых атомов стенок разрядной камеры и опорных линий нейтральной компоненты рабочего газа. Проведены исследования скорости эрозии диэлектрических стенок разрядной камеры ускорителя при увеличении напряжения разряда от 300 до 700 В. Определена зависимость, позволяющая учесть изменения скоростей и зарядового состава распыляемых атомов, что позволило распространить данный метод диагностики на исследования при различных напряжениях разряда.

PACS: 52.50.Dg, 52.25.OS, 52.70.-m

В настоящее время основной причиной, ограничивающей ресурс ускорителей с замкнутым дрейфом электронов (УЗД), является эрозия стенок разрядной камеры. Этот процесс вызван воздействием высокоэнергетических ионов на материал стенки. Скорость эрозии зависит от многих параметров: геометрии разрядной камеры и режимов работы ускорителя, состава, топографии и температуры распыляемых частей и т.д. В связи со сложностью учета всех этих процессов не удается создать модель, адекватно описывающую характер изменения скорости эрозии, и для ее определения применяются экспериментальные методы.

Скорость эрозии мала ($\sim 10^{-5}$ g/s), и для ее надежного определения прямым методом, т.е. по изменению массы или геометрии распыляемых частей, требуется значительное время работы ускорителя. Скорость эрозии зависит от большого количества параметров, поэтому выбор режима с наилучшими ресурсными характеристиками на ранних этапах

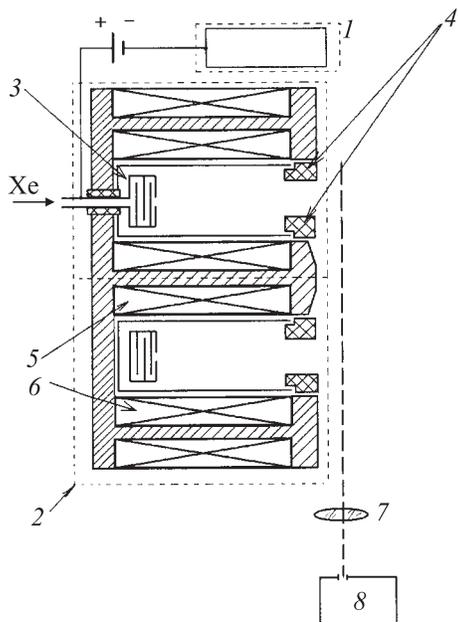


Рис. 1. Схема измерения интенсивностей спектральных линий: 1 — катодный блок; 2 — анодный блок; 3 — анод-газораспределитель; 4 — распыляемые части разрядной камеры; 5, 6 — внутренняя и внешняя магнитные катушки; 7 — линза; 8 — монохроматор.

отработки УЗД является очень кропотливой и дорогостоящей задачей. Таким образом, актуальна задача разработки бесконтактного метода определения скорости эрозии стенок разрядной камеры УЗД в режиме реального времени. Подобные методы могут быть основаны прежде всего на методах оптической диагностики.

При работе УЗД распылению подвержена выходная часть разрядной камеры. В данной работе исследуется ускоритель с диэлектрическими стенками в выходной части камеры. Основной составляющей диэлектрических материалов, применяемых в УЗД, является нитрид бора (BN), что связано с его большой эрозионной стойкостью. На рис. 1 представлены принципиальная схема исследуемого в данной работе ускорителя, а также схема измерения интенсивностей спектральных линий.

Для установления связи скорости эрозии с интенсивностью линий распыляемых элементов разрядной камеры необходимо решить две задачи: во-первых, связать концентрацию распыляемых частиц с интенсивностью излучения их спектральных линий, и, во-вторых, связать скорость эрозии с концентрацией распыляемых частиц в области наблюдения.

Наблюдаемая интенсивность излучения линии определяется локальными параметрами плазмы, оптической прозрачностью плазмы и вероятностью перехода в данной линии. Интерпретацию интенсивности излучения линии можно проводить только в рамках определенной столкновительно-излучательной модели. В настоящей работе проводились исследования в области катодной плазмы вблизи среза УЗД. Для этой области исследований традиционным приближением является модель коронального равновесия [1]. Интенсивность излучения спектральной линии в рамках корональной модели

$$I_{pq}(z) = \frac{h\nu_{pq}}{4\pi} \frac{A_{pq}}{\sum_{q<p} A_{pq}} \int_0^{l_0} n_e n(z, g) Q(g, p, T_e) dl, \quad (1)$$

где h — постоянная Планка; ν_{pq} — частота перехода; A_{pq} — коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения при переходе с уровня p на нижележащий уровень q ; n_e, n — концентрации электронов и атомов (ионов); z — зарядовое состояние; $Q(g, p, T_e) = \langle \sigma_{ex} v_e \rangle$ — коэффициент скорости возбуждения (эффективное сечение возбуждения уровня p с основного уровня g , помноженное на скорость электронов и усредненное по максвелловской функции распределения электронов по скоростям); T_e — температура электронов; l_0 — толщина области излучения.

Для определения скорости эрозии можно использовать линии любого распыляемого элемента, однако, так как азот входит в состав остаточного газа вакуумной камеры, использование его спектральных линий нежелательно. Спектральные линии ионизованного бора обладают очень малыми интенсивностями, кроме того, при малых энергиях распыляющих ионов распыление происходит преимущественно в виде нейтральных атомов [2]. Наиболее интенсивные линии нейтрального бора ВІ 249.68, 249.77 nm находятся в ближней ультрафиолетовой области спектра и соответствуют резонансному переходу.

В [3] для определения скорости эрозии было предложено использовать „опорные“ спектральные линии ионизованной компоненты рабочего газа ускорителя — ксенона. Использование „опорных“ линий позволяет избавиться от необходимости знать концентрацию электронов в области исследования при наличии информации о концентрации „опорного“ элемента в этой области. При использовании линий ионизованной компоненты учет изменения коэффициентов скоростей возбуждения невозможен, так как данные по сечениям возбуждения ионизованного ксенона электронами отсутствуют. В [4] было предложено использовать спектральную линию нейтральной компоненты рабочего газа в качестве „опорной“, благодаря чему становится возможен учет изменения коэффициентов скоростей возбуждения исследуемых спектральных переходов.

Среди пяти нижних уровней атомарного ксенона три являются метастабильными, что делает ступенчатые переходы весьма вероятными. Верхний уровень перехода XeI на длине волны 828.01 nm не подвержен заселению через метастабильные состояния, а влияние заселения верхних уровней переходов на длинах волн 788.74, 834.68 nm через метастабильные состояния мало [5]. При изучении спектра УЗД необходимо принимать во внимание возбуждение атомов и ионов ксенона тяжелыми частицами — однократно и двукратно ионизованными атомами ксенона [5].

Концентрации частиц резко уменьшаются при удалении от среза УЗД, благодаря чему значения концентраций в уравнении (1) можно заменить некоторыми эффективными средними значениями вблизи среза УЗД \bar{n}_{XeI} , \bar{n}_{BI} и перейти от интегрирования к простому арифметическому выражению.

Применяя к линиям BI и XeI модель коронального равновесия и учитывая возбуждение XeI тяжелыми частицами, приходим к соотношению

$$\bar{n}_{\text{BI}} \propto \bar{n}_{\text{XeI}} \frac{I_{\text{BI}}}{I_{\text{XeI}}} \left(\frac{Q_{\text{XeI}}(T_e) + Q'_{\text{XeI}}(U_d) + \frac{p(U_d)}{\sqrt{2}} Q''_{\text{XeI}}(U_d)}{Q_{\text{BI}}(T_e)} \right), \quad (2)$$

где Q_{XeI} , Q'_{XeI} , Q''_{XeI} — коэффициенты скоростей возбуждения XeI электронами, однократно и двукратно ионизованными ионами ксенона соответственно (скорость ионов определяется напряжением разряда — U_d); p — доля двухзарядных ионов в струе ускорителя; коэффициент $2^{-1/2}$ появляется из-за разницы скоростей однократно- и двукратно-ионизованных атомов ксенона.

Средняя концентрация нейтральной компоненты рабочего газа в области исследований определяется в два этапа. Сначала на основании экспериментальных данных о тепловых режимах разрядной камеры проводится расчет динамики нейтральной компоненты газа, истекающей из ускорителя [6], кроме того, при расчете учитывается рабочее давление в вакуумной камере во время эксперимента. Далее для определения доли атомов, претерпевших ионизацию, анализируются различные виды потерь при работе ускорителя [7]. Такой анализ возможен на основании информации о потерях, вызванных немоноэнергетичностью ионного энергоспектра и расходимостью плазменной струи ускорителя, а также доли двухзарядных ионов в струе УЗД. Для определения немоноэнергетичности и расходимости используются измерения энергоспектра струи на различных углах от оси ускорителя при помощи трехсеточного зонда. Зависимость доли двухзарядных ионов от напряжения разряда известна [8]. Предложенный подход позволяет с высокой точностью определять концентрацию нейтральной компоненты рабочего газа в области исследования.

Для определения температуры электронов в области исследования используется метод „оптического термометра“. Этот метод позволяет определять температуру электронов по отношению интенсивностей двух спектральных линий, если имеются данные по сечениям возбуждения этих линий. Температура электронов определялась по отношению интенсивностей двух пар линий XeI 828.01/788.74 и 828.01/834.68 nm. Далее вычислялся коэффициент скорости возбуждения перехода VI 249.77 nm. Информация по сечениям возбуждения используемых линий доступна из литературы [5,9].

При энергии распыляющих ионов, характерной для УЗД, распыление происходит в режиме первичного выбивания с эмиссией первичных атомов отдачи и атомов отдачи более высокого порядка [2]. При таком распылении увеличение скорости распыляющих ионов приводит к сдвигу энергетического спектра распыляемых частиц в сторону больших энергий; кроме того, при распылении диэлектрических материалов увеличивается доля частиц, распыленных в ионизованном виде. Оба этих эффекта необходимо принимать во внимание, проводя оптическую диагностику при различных напряжениях разряда ускорителя (скорость ионов определяется, прежде всего, напряжением разряда) оптическими методами. Получение надежной информации о нейтральной компоненте распыляемых частиц представляет собой сложную техническую задачу, и в настоящей момент подобная информация для распыляемых из

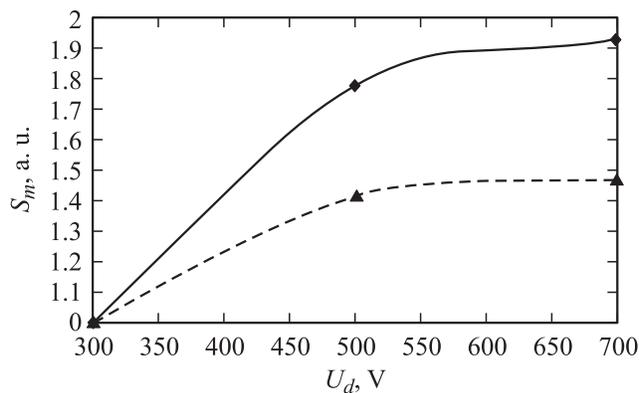


Рис. 2. Зависимость скорости эрозии S_m , измеренной прямым (сплошная линия) и оптическим (пунктирная линия) методами от напряжения разряда УЗД.

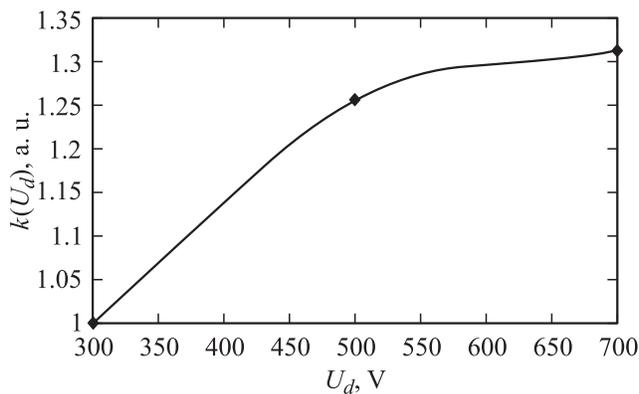


Рис. 3. Зависимость коэффициента $k(U_d)$, отвечающего за изменение скоростей и зарядового состава, распыляемых из нитрида бора атомов бора от напряжения разряда УЗД.

нитрида бора атомов бора при характерных для УЗД энергиях распыляющих ионов (до 1 keV) отсутствует.

В данной работе для определения влияния изменения скорости распыляющих ионов на скорость и состав распыляемых частиц проведены

тарировочные испытания УЗД на различных напряжениях разряда с измерением скорости эрозии прямым (по изменению массы распыляемых частей разрядной камеры) и оптическим методами. Определение подобной зависимости возможно, так как оба перечисленных эффекта приводят к уменьшению концентрации распыляемых атомов в области исследования при увеличении напряжения разряда. Зависимость скорости эрозии от напряжения разряда (при неизменной мощности разряда), измеренная прямым и оптическим методами, представлена на рис. 2. На рис. 3 представлена зависимость коэффициента, отвечающего за изменение скорости и состава распыляемых атомов бора, от напряжения разряда ускорителя. Получение подобной зависимости позволило распространить предлагаемый метод диагностики скорости эрозии диэлектрических стенок разрядной камеры УЗД на исследования при различных напряжениях разряда.

Итак, представленный метод диагностики скорости эрозии диэлектрических стенок разрядной камеры УЗД основан на использовании экспериментально измеренных интенсивностей спектральных линий распыляемых элементов разрядной камеры ускорителя и опорных линий нейтральной компоненты рабочего газа. Использование опорных линий позволяет учесть изменения локальных параметров плазмы (концентрации частиц, температура электронов) при интерпретации результатов спектроскопических измерений. Проведены измерения скорости эрозии при изменении разрядного напряжения ускорителя. Определена зависимость, позволяющая учесть изменение скоростей и зарядового состава распыляемых атомов бора, что позволило распространить предлагаемый метод диагностики на исследование скорости эрозии разрядной камеры УЗД при различных напряжениях разряда.

Список литературы

- [1] *Диагностика плазмы* / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М.: Мир, 1967. 515 с. (Plasma Diagnostic Technique / Ed. R.H. Huddleston, S.L. Leonard. New York: Academic Press, 1965. 515 p.).
- [2] *Распыление под действием бомбардировки частицами* / Под ред. Р. Бериша, К. Витмака. М.: Мир, 1998. 551 с. (Sputtering by Particle Bombardment III / Ed. R. Behrisch, K. Wittmaack. Berlin: Springer, 1991. 551 p.).
- [3] *Karabadzhak G.F., Semenkin A.V., Tverdokhlebov S.O.* // Proc. Intern. Conf. on Space Propulsion. Albuquerque, 2000. 4 p.

- [4] *Dyshlyuk E.N., Gorshkov O.A.* // Proc. 42nd Joint Propulsion Conf. Sacramento, 2006. 8 p.
- [5] *Karabadzhak G.F., Chiu Y.H., Austin B.L., Williams S., Dressler R.A.* // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 113 304.
- [6] *Шагайда А.А.* Метод численного моделирования течений разреженного газа и его применение для расчета электрофизических устройств: Дис. . . . физ.-мат. наук. М., 2000.
- [7] *Blinov N.V., Gorshkov O.A., Rizakhanov R.N., Shagayda A.A.* // Proc. 4th Intern. Spacecraft Propulsion Conf. Sardinia, 2004. 6 p.
- [8] *Hofer R.R., Gallimore A.D.* // Proc. 39th Joint Propulsion Conf. Huntsville, 2003. 10 p.
- [9] *Balance C.P., Griffin D.C., Berrington K.A., Badnell N.R.* // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2007. V. 40. P. 1131.