

Исследование взаимодействия плазмы с кандидатным материалом первой стенки термоядерного реактора — бериллием

© И.А. Соколов, М.К. Скаков, В.А. Зуев, Д.А. Гановичев, Т.Р. Туленбергенов, А.Ж. Миниязов

Филиал „Институт атомной энергии“ Республиканского государственного предприятия „Национальный ядерный центр Республики Казахстан“,
071100 Курчатов, Республика Казахстан
e-mail: sokolov@nnc.kz

(Поступило в Редакцию 7 июня 2017 г. В окончательной редакции 13 сентября 2017 г.)

Определены режимы проведения экспериментов по облучению кандидатного материала первой стенки бериллия плазмой. Приведены параметры плазмы, достигнутые на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой при облучении образцов, результаты материаловедческих исследований, полученные методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа поверхностного слоя бериллия.

DOI: 10.21883/JTF.2018.04.45719.2379

Введение

В начале восьмидесятых годов прошлого века на ионно-пучковых установках были получены основные представления о процессах, которые происходят под действием ионов на поверхность твердого тела. К таким процессам относятся распыление материала, захват и отражение от поверхности твердого тела частиц. В настоящее время продолжают исследования взаимодействия плазмы с конструкционными материалами ИТЭР на действующих токамаках. Но материаловедческие исследования процессов на токамаках достаточно сложны и дорогостоящи. Поэтому большая доля таких исследований проводится на сравнительно простых имитационных установках.

Существует достаточно много установок, используемых для моделирования взаимодействия плазмы термоядерных установок с обращенными к ним элементами. Это американская установка PISCES-A и PISCES-B, японская NAGDIS (TPD, NAGDIS-II), немецкая PSI (PSI-1, PSI-2). Все эти установки получили название линейные симуляторы, так как представляют собой источники плазмы с дуговым разрядом в продольном магнитном поле напряженностью до 0.1 Т [1].

Эти установки используются для изучения приграничной плазмы и поведения в ней различных материалов. Типичная схема реализации подобного симулятора — это длинная, как правило, цилиндрическая вакуумная камера, помещенная в прямой соленоид из коротких катушек (первый PISCES, ЛЕНТА, NAGDIS, PSI и др.) длиной несколько метров.

Несмотря на то, что существующие имитационные установки могут воспроизводить лишь отдельные повреждающие факторы термоядерного реактора (ТЯР), они весьма эффективны для проведения исследований, поскольку позволяют оперативно проводить испытания кандидатных материалов, пополнять базу данных по разнообразным аспектам плазменно-поверхностного взаимодействия, проверять расчетные модели и обрабаты-

вать диагностические методики в достаточно хорошо программируемых условиях.

1. Описание плазменно-пучковой установки

Стенд имитационных испытаний предназначен для изучения взаимодействия плазмы с кандидатными конструкционными материалами, для проведения испытательного диагностического оборудования, а также для развития существующих и разработки новых методов моделирования нагрузок на конструкционные материалы, изучения свойств и поведения материалов при взаимодействии с плазмой [2].

Использование плазменно-пучковой установки (ППУ) дает возможность оперативно получать предварительные экспериментальные данные о поведении материалов



Рис. 1. Общий вид плазменно-пучковой установки имитационного стенда: 1 — вакуумметры, 2 — блок подачи ускоряющего напряжения на ЭЛП, 3 — ЭЛП, 4 — электромагнитные катушки, 5 — ручной натекаль подачи рабочего газа, 6 — регулятор расхода газа, 7 — подвижный зонд Ленгмюра, 8 — смотровое окно камеры взаимодействия для визуального наблюдения за ППР, 9 — блок подачи отрицательного смещения и регистрации ионного тока на мишени, 10 — масс-спектрометр с автономной системой откачки, 11 — камера загрузки с устройством перемещения и размещения образцов в камере взаимодействия.

Таблица 1. Режимы облучения образцов бериллия

№ образца	Мощность электронного пучка W_{eb}, W	Рабочий газ	Потенциал смещения на мишени, V	Ток ионов на мишенном узле, mA	Электронная температура, eV	Концентрация ионов, $10^{17} m^{-3}$	Температура образца, $^{\circ}C$
Be 1	1500	Водород	0	0	—	—	1120
Be 2	1500	Водород	-1200	730	11.7	5.84	1140
Be 3	1000	Дейтерий	-1600	700	10.2	4.68	1080
Be 4	1500	Дейтерий	-1200	330	10.6	3.04	1090
Be 5	1500	Гелий	-1200	290	7.29	5.16	1000

в условиях взаимодействия их с плазмой, что позволяет вносить коррективы в основные экспериментальные исследования на Казахском Токамаке Материаловедческом (КТМ).

Проект КТМ выполняется в поддержку международной программы по созданию первого в мире прототипа термоядерного реактора ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), а также для развития в Республике Казахстан современной науки и технологий, подготовки научных и инженерных кадров высокой квалификации. Основное назначение токамака КТМ — это проведение исследований и испытаний материалов и узлов будущих термоядерных реакторов.

Основными элементами ППУ являются электронно-лучевая пушка (ЭЛП), камера плазменно-пучкового разряда (ППР), камера откачки ЭЛП, вакуумная камера взаимодействия, катушки ЭЛП, мишенное устройство, шлюзовое устройство и камера загрузки. Общий вид плазменно-пучковой установки имитационного стенда показан на рис. 1.

Установка обеспечивает получение следующих параметров плазменного потока: диаметр плазменного потока перед мишенью 5–30 mm, плотность потока ионов $\sim 10^{21} s^{-1} m^{-2}$; плотность плазмы в пучке — до $10^{18} m^{-3}$; электронная температура плазмы — до 20 eV.

2. Подготовка и проведение экспериментов по взаимодействию плазмы с образцами

Как известно, для изготовления первой стенки ТЯР рассматриваются материалы с малыми атомными номерами Z — литий, бериллий, бор. Бериллий выбран международной проектной группой реактора ИТЭР (ITER) в качестве кандидатного материала первой стенки [3,4].

В настоящей работе в качестве объекта исследования выбран бериллий марки ТПП-56. ППР зажигался на трех видах рабочих газов: водород, дейтерий и гелий. Заготовки исследуемых образцов были изготовлены в виде параллелепипеда 10×10 mm и высотой 5 mm. Вырезка образцов выполнялась на электроэрозионном станке. При этом образец не испытывал деформации и термического воздействия.

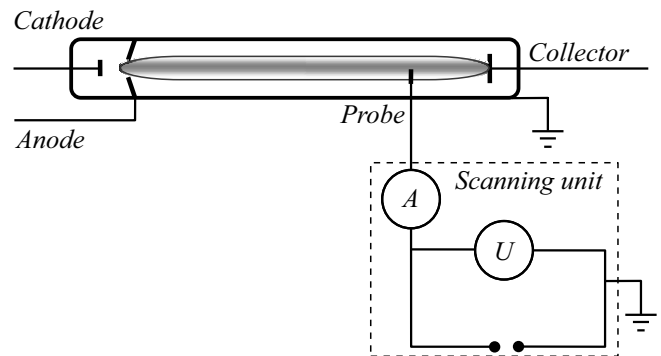


Рис. 2. Схема измерения параметров плазменно-пучкового разряда с помощью зонда Ленгмюра.

Были проведены работы по облучению образцов бериллия марки ТПП-56 плазменным пучком в среде водорода, гелия и дейтерия. Длительность облучения для каждого режима составила 30 min. В табл. 1 приведены режимы облучения образцов из бериллия.

Для фокусировки электронного пучка, зажигающего ППР, на оси установки создавалось электромагнитное поле с напряженностью магнитного поля 0.1 Т.

Параметры плазмы определены методом зондовой диагностики плазмы. По полученным вольт-амперным характеристикам с помощью одиночного зонда Ленгмюра были проведены расчеты электронной температуры и концентрации плазмы согласно методикам [5,6]. Схема измерений параметров плазменно-пучкового разряда с помощью зонда Ленгмюра на ППУ показана на рис. 2.

Для проведения экспериментов по облучению бериллия плазменным пучком в камеру взаимодействия подавались рабочие газы: водород, дейтерий и гелий до показаний высоковакуумных датчиков 10^{-3} Torr. Давление в камере ЭЛП составляло $5 \cdot 10^{-5}$ Torr. После напуска рабочего газа в камеру ППР в каждом эксперименте определялся состав остаточных газов в камере взаимодействия. Анализ показал, что присутствие примесей не превышает 1–2%.

Образцы бериллия были обращены облучаемой стороной к торцу ППР. Электронная составляющая исключалась из области взаимодействия с помощью системы развертки. Взаимодействие ионов плазмы осуществлялось

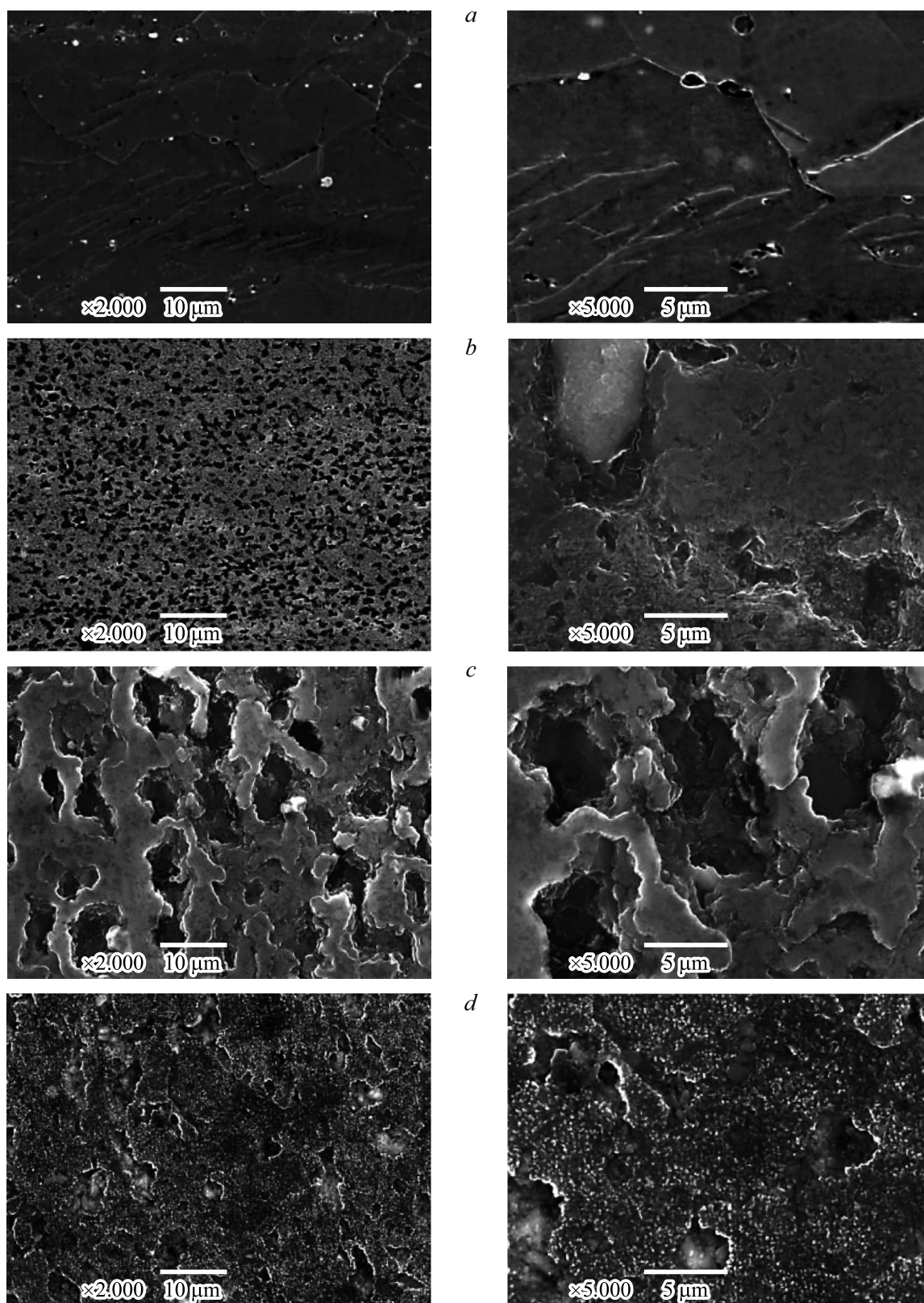


Рис. 3. Результаты микроструктурных исследований, полученных методом сканирующей электронной микроскопии: *a* — исходный образец Be, *b* — облученный образец Be 1, *c* — облученный образец Be 2, *d* — облученный образец Be 3, *e* — облученный образец Be 4, *f* — облученный образец Be 5.

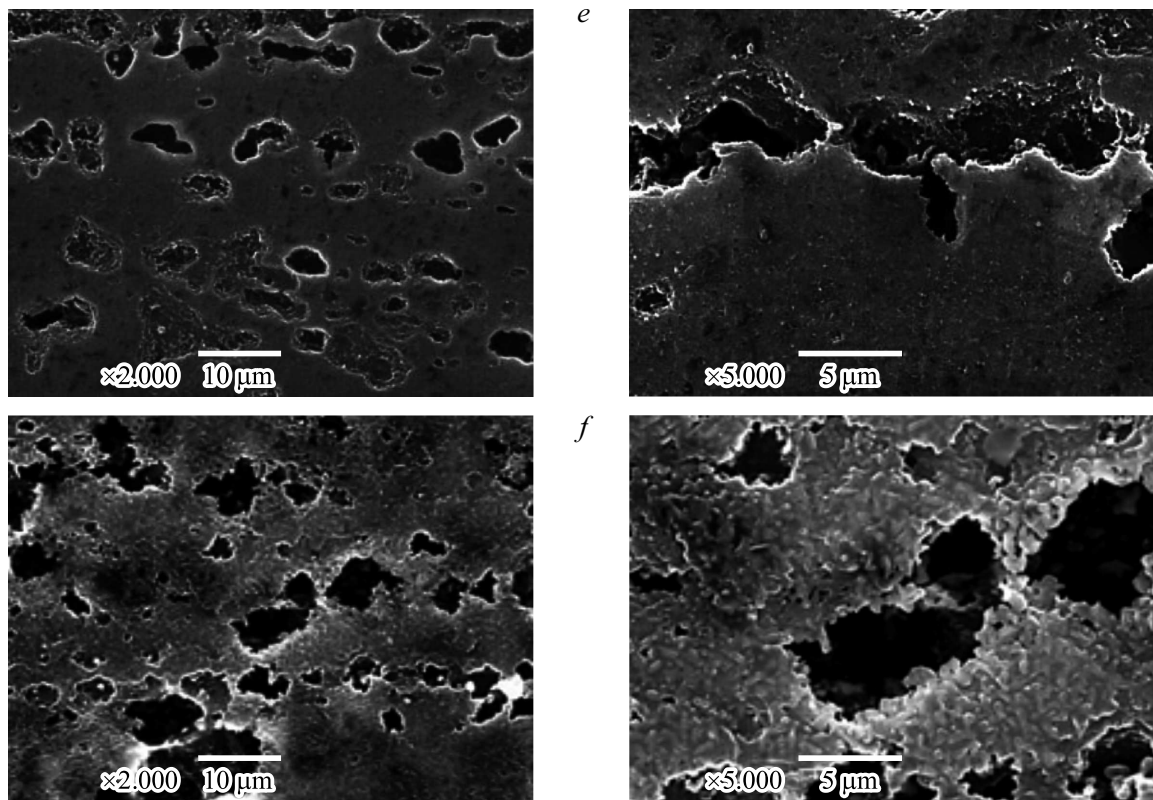
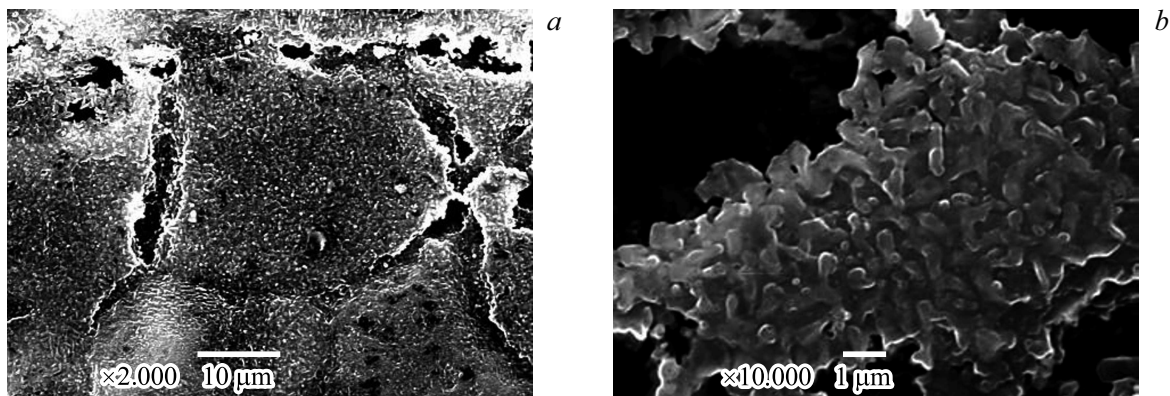


Рис. 3 (продолжение).

Рис. 4. Модификация поверхности бериллиевых образцов после облучения: *a* — формирование сетки пор на границах зерен; *b* — губчатая структура при высоком увеличении.

путем подачи отрицательного потенциала смещения на образец.

Было облучено 5 образцов бериллия с продолжительностью облучения по 30 min в стационарном режиме ППР в различных газах и при изменении отрицательного потенциала смещения на мишени.

3. Результаты исследований

Исследование микроструктуры и морфологии поверхности бериллиевых образцов до и после их облучения

проводилось при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-6390. Изображения поверхности на сканирующем электронном микроскопе были получены во вторичных электронах при ускоряющем напряжении 20 kV.

Исследования микроструктуры бериллия на растровом электронном микроскопе показали, что в исходном состоянии на поверхности образца имеются поры небольшого размера и малого количества, которые в основном расположены на границах зерен (рис. 3, *a*). После облучения основным радиационным дефектом

Таблица 2. Результаты ЭДС-анализа приповерхностного слоя образцов

Образец	Элемент								
	O		N		C		Be		Total
	wt.%	at.%	wt.%	at.%	wt.%	at.%	wt.%	at.%	100.00
Be исходный	0.11	0.06	—	—	0.26	0.20	99.63	99.74	100.00
Be 1	0.32	0.18	—	—	1.31	0.98	98.37	98.83	100.00
Be 2	0.11	0.06	—	—	1.44	0.93	98.44	99.00	100.00
Be 3	0.69	0.40	0.42	0.28	6.40	4.90	92.49	94.42	100.00
Be 4	0.17	0.10	0.09	0.06	0.76	0.57	98.98	99.27	100.00
Be 5	0.54	0.30	—	—	1.42	1.07	98.05	98.63	100.00

является образование пор различной объемной плотности (рис. 3, *b, c, d, e, f*), зависящей от режима облучения и плазмообразующего газа, приведенных в табл. 1. Под воздействием облучения в бериллии происходит наполнение пор атомами водорода, дейтерия и гелия, что приводит к увеличению давления внутри пор и к увеличению различного рода напряжений на границах зерен.

Увеличение размеров и концентрации, наблюдающихся в исходном состоянии пор, происходит за счет анизотропии распухания отдельных кристаллитов, так как имеется тенденция зерен сместиться относительно друг друга вследствие возникающих напряжений на границах зерен. При этом значительное накопление водорода, дейтерия и гелия в бериллии также является определяющим для процесса образования пор, поскольку диффузионная подвижность гелиевых атомов при облучении достаточна для их массового перемещения.

Обнаружено, что в бериллиевых образцах облучение плазменным пучком ведет к увеличению размера пор, что приводит к снижению плотности материала.

Детальное изучение микроструктуры показало образование и скопление пор вдоль границ зерен (рис. 4, *a*). В результате облучения поверхности некоторые образцы бериллии приобрели губчатую структуру. На поверхностях образцов видны растекшиеся капли. Можно предположить, что это продукты эрозии, вернувшиеся обратно на образец из плазмы, во время облучения. Об образовании капель в трещинах можно судить по фотографиям, приведенным на рис. 4, *b*.

Определение элементного состава было выполнено с применением энергодисперсионного спектрометра JED-2300 на сканирующем электронном микроскопе.

Результаты ЭДС-анализа в приповерхностном слое бериллиевых образцов приведены в табл. 2. Как видно из табл. 2, в образце Be 3, облученном в дейтериевой среде, увеличилось количество углерода.

Присутствие менее 1% примесей кислорода и азота обусловлено их наличием в вакуумной среде камеры микроскопа при проведении анализа.

Заключение

Были подготовлены и облучены в среде водорода, гелия и дейтерия 5 образцов бериллия марки ТГП-56 при мощности электронного пучка 1 и 1.5 kW и ускоряющем напряжении на мишени — 1000 и —1200 V. При этом электронная температура составила ~ 10 eV, а концентрация ионов $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-3}$.

Микроструктурные исследования образцов бериллия показали наличие в исходном состоянии микропор незначительного размера и малого количества, расположенных преимущественно на границах зерен. Определено, что эволюция микроструктуры бериллия после облучения при электронной температуре ~ 10 eV и концентрации ионов $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-3}$ значительна, в частности возрос и диаметр пор с 1 до $\sim 10 \mu\text{m}$, и их объемная плотность.

Снимки поверхности бериллиевого образца, облученного дейтериевой плазмой, характеризуются менее выраженной пористостью по сравнению с поверхностью, облученной водородной плазмой. Наименее выражена пористость поверхности образца, облученного гелиевой плазмой.

Список литературы

- [1] Обзор имитационных установок для моделирования взаимодействия плазмы с веществом в термоядерном реакторе и обоснование параметров имитационного стенда в сопровождение исследования на токамаке КТМ: промежуточный отчет: 85-3-021-129. Ч. 1. М.: МИФИ, 2005. 40 с.
- [2] Стенд имитационных испытаний в сопровождении исследований на токамаке КТМ (СИИ-КТМ): итоговый отчет: 85-3-021-129. Ч. 1. М.: МИФИ, 2005. 46 с.
- [3] Perkins F.W., Post D.E., Uckan N.A. et al. // Nucl. Fusion. 1999. Vol. 39. N 12. P. 2137–2637.
- [4] Summary of the ITER final design report. Garching, 2001. 80 p. (Report of ITER Joint Central Team, G AO FDR 4 01-07-21 R0.4).
- [5] Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. 291 с.
- [6] Сеченов В.А., Сон Э.Е., Менарт Д.Ж. Зондовые методы исследования плазмы. Лабораторная работа. М.: МФТИ, 2002.