

04;09;10;12

Высокочастотный ионный источник с повышенным содержанием протонов в пучке

© А.А. Иванов, А.А. Подыминогин, И.В. Шиховцев

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: I.V. Shikhovtsev@inp.nsk.su

(Поступило в Редакцию 3 мая 2006 г.)

Приведены результаты экспериментальных исследований высокочастотного (ВЧ) ионного источника с улучшенным массовым составом пучка. Увеличение содержания протонов в пучке было достигнуто путем увеличения плотности ВЧ мощности в разряде под антенной и установки вблизи плазменной сетки магнитного фильтра. Дополнительно были приняты меры для предотвращения наблюдавшейся ранее деградации состава пучка вследствие восстановления металлического алюминия на внутренней поверхности керамической разрядной камеры и выделения воды. Для этого камера была покрыта изнутри пластинами из пиролитического нитрида бора.

PACS: 52.80.Pi

Введение

В ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск) ранее был разработан высокочастотный (ВЧ) ионный источник для диагностических инжекторов атомов водорода, предназначенных для использования в спектроскопических диагностиках на крупных современных токамаках [1–3]. Ионный источник формирует пучок протонов с током до 3 А, энергией до 55 keV, угловой расходимостью 0.6° и длительностью до 4 с. В первой версии ионного источника содержание в пучке протонов с полной энергией было относительно небольшим — 60–65%, и заметным было содержание протонов с энергией $\sim 1/18$, образующихся в результате диссоциации ускоренных молекулярных ионов, содержащих кислород (OH^+ , H_2O^+ , H_3O^+).

Для улучшения массового состава пучка нами были внесены несколько изменений в конструкцию источника. Во-первых, увеличена плотность ВЧ мощности в разряде под антенной за счет уменьшения ее ширины и установки на антенне сердечника из высокочастотных ферритов. Кроме того, вблизи плазменной сетки был установлен магнитный фильтр для предотвращения попадания в эту область энергичных электронов из разряда. Магнитная система фильтра создавала вблизи плазменной сетки слабое поперечное магнитное поле, отсекавшее энергичные электроны. Вследствие этого была уменьшена плотность молекулярных ионов, возникающих из-за ионизации рабочего газа электронами большой энергии [4,5].

В первоначальной версии ионного источника наблюдалось увеличение со временем доли молекулярных ионов в пучке, что по-видимому было связано с образованием пленки восстановленного металлического алюминия на стенке разрядной камеры, изготовленной из миналунда (Al_2O_3). Заметное улучшение стабильности состава пучка было достигнуто после установки на стенке пластины из пиролитического нитрида бора (ПНБ). По-видимому,

определенную роль в этом случае играла большая химическая инертность этого материала по сравнению с окисью алюминия. Введение указанных изменений позволило повысить содержание протонов в пучке до 80% (по току). При этом плотность ионного тока вблизи плазменной сетки осталась прежней — 120 mA/cm^2 .

В данной работе представлены результаты измерений параметров пучка ионного источника с улучшенной версией плазменного эмиттера.

Источник плазмы

Первоначальная версия конструкции ионного источника подробно была описана в [1,2]. Общий вид плазменной камеры ионного источника с указанными выше изменениями схематически показан на рис. 1. Цилиндрическая часть газоразрядной камеры (1) изготовлена из керамики (Al_2O_3) и имеет внутренний диаметр 112 и толщину стенки 4 мм. Рабочий газ (водород) подается в камеру через узел (2), установленный на торцевом дюралевом фланце. Этот узел осуществляет одновременно ввод газа в камеру и поджиг разряда. Поджиговое устройство состоит из двух коаксиальных электродов, разделенных керамическим изолятором. Для инициации ВЧ-разряда между электродами прикладывался короткий импульс напряжения амплитудой около 6 kV, что приводило к пробое по поверхности изолятора. Высокочастотный разряд возбуждался на частоте 4.65 MHz при помощи внешней антенны (3). В предыдущей версии источника антенна представляла собой шестивитковую катушку шириной 4 см, намотанную на фторопластовом каркасе. В новой версии газоразрядной камеры источник антенна изготовлена из медной трубки диаметром 3 мм и имеет 4 витка. Изоляция витков осуществляется с помощью термоусаживаемой полиэтиленовой трубки, так что ширина антенны составляет 2 см. По периметру антенны снаружи расположен сердечник из ферритовых

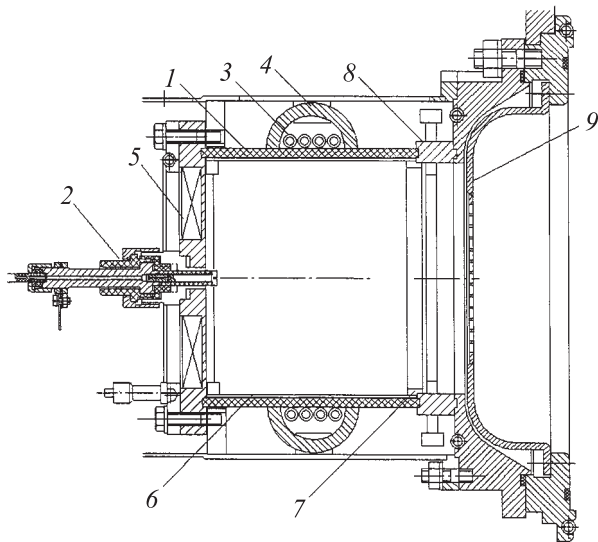


Рис. 1. Плазменная камера ионного источника.

полуколец (4), закрепленных во фторопластовом каркасе. На заднем фланце газоразрядной камеры установлен набор постоянных магнитов (5). Их роль состоит, с одной стороны, в рассеивании потока обратных электронов, поступающих из ионно-оптической системы (ИОС) и тем самым в уменьшении плотности тепловых нагрузок на задний фланец. Кроме того, наличие этих магнитов увеличивает энергетическую эффективность разряда и снижает поток плазмы на задний фланец.

Внутренняя керамическая поверхность камеры покрыта пластинами (6) из пиролитического нитрида бора размером 90×10 и толщиной 1 мм. Крепление пластин и теплосъем с них осуществляется на краях. Для этого вблизи заднего торцевого фланца пластины вставлены

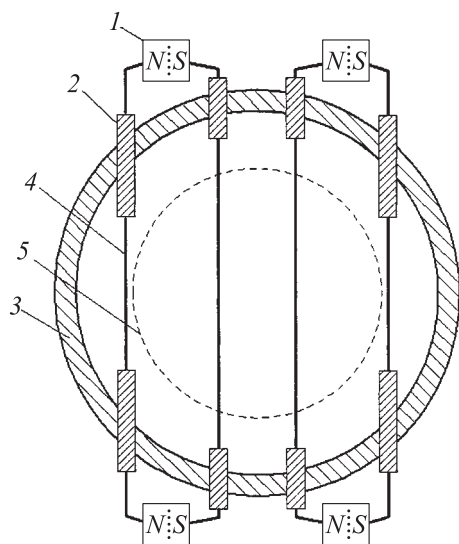


Рис. 2. Магнитный фильтр.

в специальные ламели, закрепленные на торцевом водоохлаждаемом фланце. На противоположном конце, вблизи плазменной сетки, пластины подпружинены с помощью разрезного дюралевого кольца (7). Используемый ПНБ имеет высокую теплопроводность ($\sim 100 \text{ W/m}^2\text{K}$), что позволяет осуществить теплоотвод с пластин в паузах $\sim 3 \text{ min}$ между выстрелами.

Магнитный фильтр (8) устанавливался между керамической камерой и торцевым фланцем вблизи плазменного электрода (9). Конструкция магнитного фильтра показана на рис. 2. Он состоит из четырех постоянных магнитов (1) и магнитопроводов (2). Магнитопроводы представляют собой железные стержни диаметром 6 мм, сваренные в кольцо из нержавеющей стали (3), и железные пластины сечением $4 \times 1 \text{ mm}$. Между пластинами (4) создается магнитное поле, 5 — апертура ИОС. Внутри плазменной камеры железные поверхности фильтра покрыты алюминием для уменьшения коэффициента рекомбинации на них [6].

Параметры плазменного эмиттера

Исследование характеристик плазменного эмиттера проводилось без формирования ионного пучка. Плазменный эмиттер был установлен на специальный стенд, где вместо ИОС была установлена только плазменная сетка. Сетка имела по диаметру щель, вдоль которой перемещался сеточный зонд для измерения профиля плотности ионного тока.

Профиль плотности тока и эффективность разряда зависели от расположения, формы и количества магнитов, расположенных на торце газоразрядной камеры. Постановка магнитов в определенном порядке увеличивала эффективность разряда примерно в два раза. На рис. 3 показан профиль плотности ионного тока по радиусу плазменного эмиттера в двух вариантах: на задней стенке установлены радиально 8 самарий-кобальтовых магнитов размером $32 \times 12 \times 10 \text{ mm}$ (кривая 1) и без магнитов (кривая 2). Эти измерения проводились без магнитного фильтра. Как видно из рисунка, средняя плотность тока по эмиттеру около 110 mA/cm^2 , а неоднородность в пределах диаметра 72 мм составляет $\pm 9\%$. В этом режиме в разряде поглощалась мощность около 6.5 kW. Измерения плотности ионного тока показывают ее линейный рост с увеличением поглощаемой в разряде мощности: при поглощаемой мощности 2 kW плотность ионного тока в центре плазменного эмиттера составляет 50, а при 8.5 kW — 150 mA/cm^2 .

Также были измерены профили плотности ионного тока в различных вариантах с магнитным фильтром (рис. 4). Кривая 1 получена с газоразрядной камерой без магнитов на задней стенке и без магнитов фильтра; 2 — без магнитов на задней стенке и с магнитами фильтра; 3 — с магнитами на задней стенке и с магнитами фильтра; 4 — с магнитами на задней стенке и без магнитов фильтра. Наличие магнитного поля в

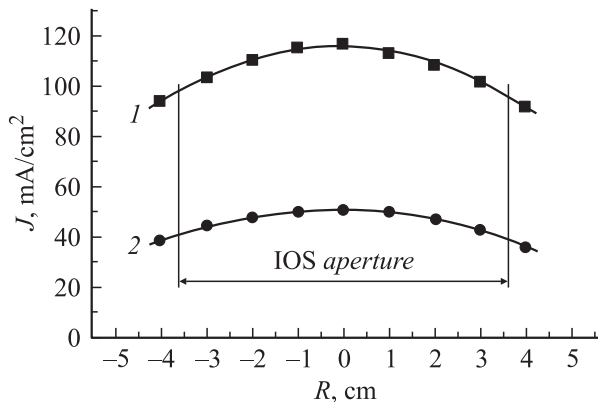


Рис. 3. Распределение плотности ионного тока по радиусу плазменного эмиттера.

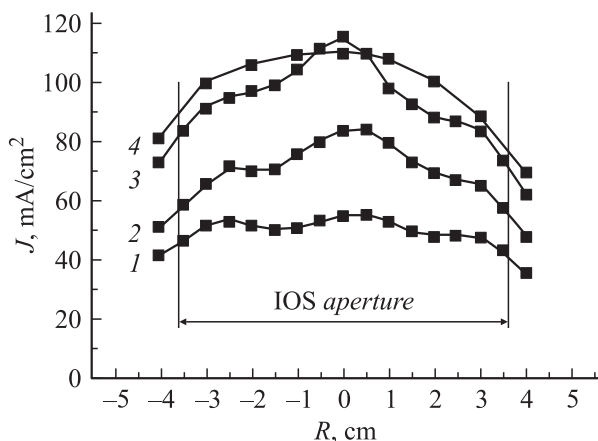


Рис. 4. Профили плотности ионного тока по радиусу в плоскости плазменной стенки в различных вариантах расположения магнитов.

разряде вблизи плазменной сетки (без магнитов на задней стенке) увеличивало плотность ионного тока (кривая 2). По-видимому, это связано с лучшим удержанием ионизирующих электронов в объеме и соответствующим повышении степени ионизации плазмы. Вблизи пластин и посередине между ними магнитное поле составляло 7 и 3 мТ соответственно. При установке магнитов на задней стенке разрядной камеры плотность ионного тока (кривая 4) существенно возрастает, а установка магнитов фильтра несколько увеличивает неоднородность профиля (кривая 3).

Массовый состав пучка

Для определения массового состава пучка описанная выше газоразрядная камера была установлена на 4-электродную ионно-оптическую систему, аналогичную системе ионного источника диагностического инжектора, установленного на токамаке TEXTOR [1]. Используемая ИОС имеет 163 отверстия диаметром 4 мм, расположенных в круге диаметром 72 мм, геометри-

ческая прозрачность сеточной системы — около 50%. Данная ИОС позволяет формировать без пробоев пучок с энергией 50 keV и током до 2.6 А, при этом минимальная расходимость пучка (0.6°) соответствует току 1.8 А. Длительность пучка в данных экспериментах составляла 60 ns.

Измерения массового состава ионного пучка, извлекаемого из плазменного эмиттера, проводились с помощью магнитного масс-анализатора и спектрометра HR2000 фирмы Ocean Optics, Inc. [7].

Масс-анализатор устанавливался на оси на расстоянии 3.5 м от ионного источника. Вытекающий из источника газ представлял собой газовую мишень достаточно большой плотности, на которой происходила диссоциация молекулярных ионов H_2^+ и H_3^+ на протоны и атомы водорода с энергиями соответственно 1/2 и 1/3 от полной энергии пучка. На входе в анализатор центральная часть пучка вырезалась диафрагмой диаметром 2 мм. Затем пучок, состоящий из протонов и атомов водорода, проходил через магнитное поле масс-анализатора, где протонная компонента пучка разделялась на три основные фракции с полной энергией, половинной и одной третьей. Магнитное поле масс-анализатора менялось в нужных пределах в течение работы источника ионов. При этом на коллекторе анализатора наблюдались пики, соответствующие протонам с различной энергией. На рис. 5 приведены характерные осциллограммы тока пучка (верхняя кривая) и тока коллектора (нижняя кривая). Энергия пучка составляла 50 keV, ток — 2 А. Доля фракций ионного пучка определялась с учетом равновесного выхода для данной энергии частиц и количества частиц в молекуле. Приведенному графику соответствует следующий состав извлекаемого пучка по току: протонов — 81.5, ионов H_2^+ — 11.5, ионов H_3^+ — 7%.

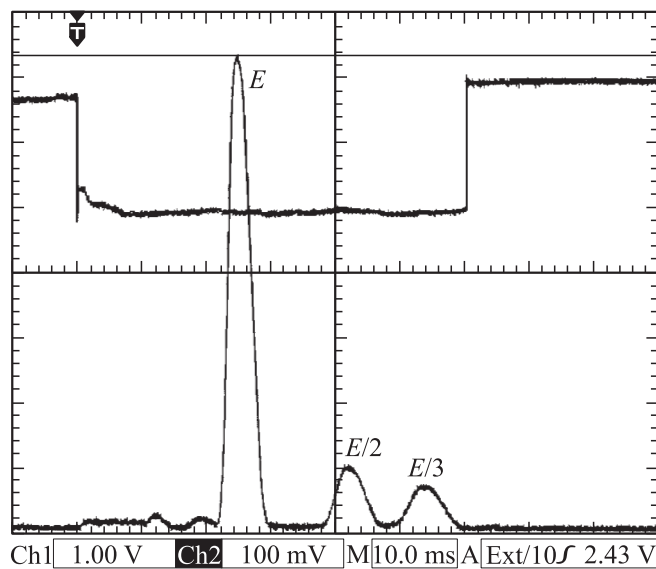


Рис. 5. Осциллограммы тока пучка и тока на коллектор анализатора от времени.

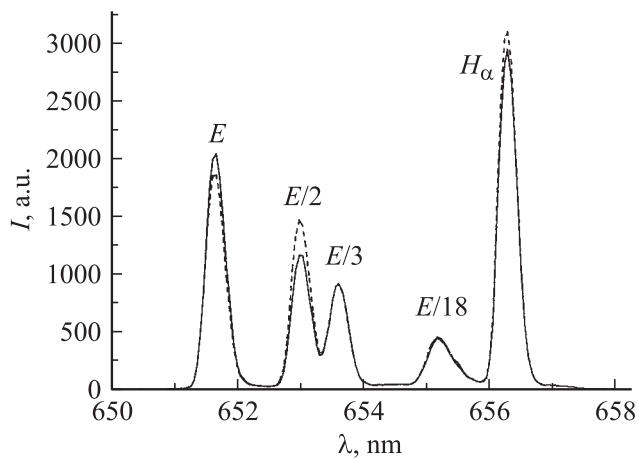


Рис. 6. Спектр излучения линии H_{α} .

На рис. 6 представлены спектры излучения линии H_{α} пучка с энергией 50 keV, измеренные под углом 45° к направлению распространения пучка. Спектр включает пять линий, соответствующих частицам с различной энергией. Наиболее интенсивная линия (справа) соответствует несмещенной линии H_{α} атомарного водорода, возбуждаемого пучком. Три линии (слева) соответствуют свечению быстрых атомов водорода с энергиями E , $E/2$, $E/3$. Линия, близкая к несмещенной, соответствует излучению атомов водорода с энергией $\sim E/18$, образующихся в результате диссоциации примесных ионов воды. Анализ спектрометрических данных проводился в соответствии с методикой, описанной в [8].

Приведенному на рисунке спектру (сплошная линия, источник с магнитным фильтром, без покрытия пластинами из ПНБ) соответствует относительная плотность ионов H^{+} — 70,9, H_2^{+} — 16,2, H_3^{+} — 9 и примесные ионы — 3,9% (по току 80,2, 12,9, 5,9, 1% соответственно). В эксперименте, когда магниты фильтра убраны (пунктирная линия), состав пучка был несколько хуже: H^{+} — 65,7, H_2^{+} — 21, H_3^{+} — 9,3 и примесные ионы — 4% (по току 75,7, 17,1, 6,2, 1% соответственно). Из спектров видно, что магнитный фильтр уменьшает долю ионов H_2^{+} в вытягиваемом пучке и повышает выход атомарных ионов. Ранее в экспериментах, описанных в [4,5], было установлено, что относительная величина тока молекулярных ионов прямо зависит от плотности быстрых электронов вблизи плазменного электрода. Для отсечения горячих электронов в [9] также использовался магнитный фильтр между областью разряда, где расположены накаливаемые катоды, эмитирующие электроны, и плоскостью вытягивания ионов. Фильтр представлял собой линейные каспы магнитного поля между боковыми стенками и задней стенкой источника. Было установлено, что фильтр не позволял быстрым электронам доходить до электродов, формирующих пучок. Это позволило уменьшить долю ионов H_2^{+} в вытягиваемом пучке и повысить выход атомарных ионов.

Механизм отсечки электронов высоких энергий поперечным магнитным полем связан с тем, что в случае, когда циклотронная частота больше частоты столкновений электронов, т. е. плазма „замагничена“, коэффициент диффузии обратно пропорционален корню из температуры и соответственно существенно меньше для горячих электронов [10].

Для ионного пучка с током 2 А и энергией 50 keV был измерен состав в зависимости от тока пучка (рис. 7) и от потока газа в газоразрядную камеру (рис. 8). Как видно, с увеличением тока доля протонов возрастает и заметно убывает доля H_3^{+} . При изменении давления перед клапаном, т. е. изменении потока газа в источник, в исследованных пределах количество H_1^{+} менялось незначительно. В данной конструкции газовой системы, когда поток газа в источник определялся диаметром

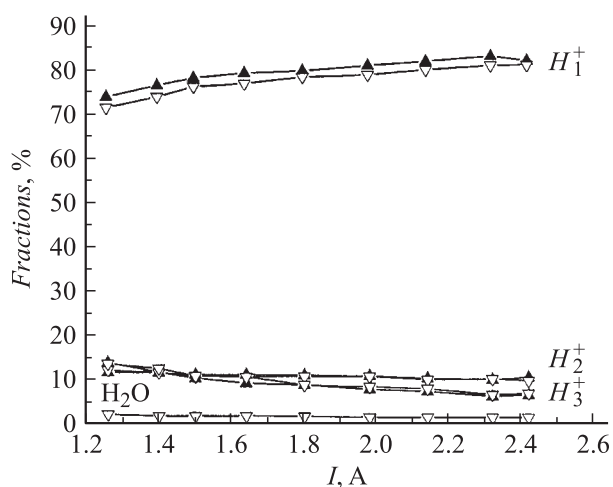


Рис. 7. Массовый состав водородного пучка в зависимости от тока при фиксированном потоке газа (давление перед клапаном — 2 бар). \blacktriangle — данные магнитного анализатора, ∇ — данные спектрометра.

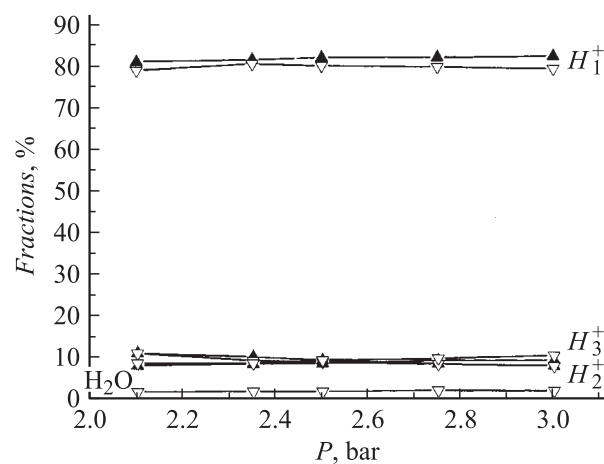


Рис. 8. Массовый состав водородного пучка в зависимости от давления газа над клапаном. Обозначения те же, что и на рис. 7.

диафрагмы (0.1 mm) на конце электрической трубки, подводимой газ к источнику, давление водорода перед клапаном 2.5 bar соответствовало потоку $2.51 \cdot \text{Torr/s}$.

В первоначальном варианте источника после примерно года работы, когда полная длительность работы эмиттера составила несколько тысяч секунд, произошла заметная металлизация керамической поверхности плазменной камеры. Мы считаем, что эта металлизация образовалась в результате восстановления металлического алюминия из керамики и распыления заднего фланца и держателя плазменной сетки, сделанных из меди. В результате чего протонная компонента пучка уменьшилась примерно на 10%. Для предотвращения деградации состава пучка было предпринято несколько действий. Во-первых, керамическая поверхность камеры была покрыта пластинами из пиролитического нитрида бора. Этот материал химически инертен и устойчив к воздействию водородной плазмы. После нескольких секундных импульсов с разрядом в результате прогрева пластин происходило их практически полное обезгаживание и выделение газа с поверхности прекращалось. В эксперименте без магнитного фильтра установка пластин из ПНБ увеличила содержание протонов в ионном пучке примерно на 6% и уменьшила в полтора раза долю ионов воды. Во-вторых, медный задний фланец был заменен дюралевым, и медная поверхность держателя плазменной сетки была прикрыта алюминиевым диском. В-третьих, уменьшение ширины антенны позволило уменьшить ее емкостную связь с плазмой, которая существенно увеличивает взаимодействие плазмы с поверхностью.

Заключение

В результате модификации конструкции плазменного эмиттера ВЧ ионного источника доля протонов с полной энергией увеличилась с 60–65 до 80%. Покрытие внутренней керамической поверхности плазменной камеры пластинами из пиролитического нитрида бора позволило стабилизировать массовый состав пучка и уменьшило примесь воды в пучке.

Список литературы

- [1] *Ivanov A.A., Davydenko V.I., Deichuli P.P.* et al. // Rev. Sci. Instr. 2000. Vol. 71. N 10. P. 3728–3735.
- [2] *Иванов А.А., Шиховцев И.В., Подыминогин А.А.* и др. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 3. С. 221–228.
- [3] *Karpushov A.N., Abdrashitov G.F., Averboukh I.I.* et al. // Fus. Eng. and Design. Elsevier. 2003. Vol. 66–68. P. 899–904.
- [4] *Ehlers K.W., Leung K.N.* // Rev. Sci. Instr. 1981. Vol. 52. N 10. P. 1452–1458.
- [5] *Ehlers K.W., Leung K.N.* // Rev. Sci. Instr. 1982. Vol. 53. N 9. P. 1423–1428.
- [6] *Габович М.Д.* Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат, 1972. 304 с.
- [7] www.oceanoptics.com.

- [8] *Uhlemann R., Hemsworth R.S., Wang G.* et al. // Rev. Sci. Instr. 1993. Vol. 64. N 4. P. 974–982.
- [9] *Holmes A.J.T., Green T.S., Newman A.F.* // Rev. Sci. Instr. 1987. Vol. 57. N 8. P. 1369–1381.
- [10] *Holmes A.J.T., McAdams R., Proudfoot G.* et al. // Rev. Sci. Instr. 1994. Vol. 65. N 4. P. 1153–1158.