



Сибирское отделение Российской Академии наук  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

4.93  
1999

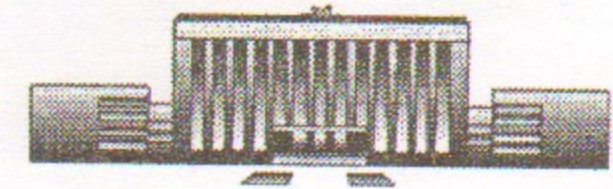
И.Н. Чуркин, В.В. Деменев

ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
РАДИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
В ПЛАЗМЕ ИСП ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ  
СПЕКТРУ ТЯЖЕЛЫХ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ

ИЯФ 98-88

<http://www.inp.nsk.su/publications>

БИБЛИОТЕКА  
Института ядерной  
Физики СО АН СССР  
ИНВ. № 2 ж.



НОВОСИБИРСК  
1998

# ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ ИСП ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ СПЕКТРУ ТЯЖЕЛЫХ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ.

*И.Н. Чуркин, В.В. Деменев*

“Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН”,  
630090, Новосибирск

## Аннотация

В работе рассмотрена методика измерения распределения радиальных электрических полей в плазме Источника в скрещенных полях (ИСП) корпускулярным диагностическим методом, основанным на измерениях энергетических спектров тяжелых атомов перезарядки, выходящих из плазмы. В работе рассмотрены: особенности применения корпускулярного метода диагностики для установки ИСП; диагностическая система для измерения энергетических спектров атомов перезарядки различных масс. Представлены результаты измерений распределения радиального электрического поля, полученные при помощи диагностической системы в одном из режимов работы источника. Приведены контрольные измерения одиночным электрическим зондом в тех же режимах. Получено хорошее совпадение между измерениями, выполненными этими двумя методами.

## THE MEASUREMENT OF RADIAL ELECTRICAL FIELD DISTRIBUTION INSIDE THE SCF PLASMA BY ENERGY SPECTRA OF HEAVY CHARGE-EXCHANGED ATOMS.

*I.N. Churkin, V.V. Demenev*  
The Budker Institute of Nuclear Physics  
630090, Novosibirsk, Russia

### Abstract

The measurement methods of the radial electrical field distribution inside the SCF (Source with crossed fields) plasma by the corpuscular diagnostic method is considered. This method is based on measurements of energy spectra of heavy charge-exchanged atoms leaving from plasma. The results of measurements of the radial electrical field distribution obtained in one of working regime of SCF by the diagnostic system are represented. The control measurements by a single electrical probe in the same regime are given. The good agreement between data of these two methods is obtained.

@ “Институт Ядерной Физики им. Г. И. Будкера СО РАН”

## Введение.

В 90-е годы в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН был разработан “Источник в скрещенных полях” (ИСП) на основе магнитной ловушки с аксиальным магнитным и радиальным электрическим полями (рис.1) [1]. Магнитное поле создается соленоидальными катушками, а электрическое вводится при помощи внешних торцевых электродов. В источнике горит разряд с тяжелыми ионами. Плазма образуется за счет распыления катода ионами и последующей ионизации распыленных атомов в плазме. Помимо ионов вещества катода (тяжелые) в состав плазмы входят легкие ионы, образующиеся в результате ионизации газа, на котором зажигается разряд. Основные особенности ИСП: универсальность, то есть возможность получение плазмы, состоящей практически из любого материала (определяется веществом катода), замагниченность тяжелых ионов ( $A > 1$ ) и вращение плазмы вокруг оси источника.

В настоящее время ИСП имеет три перспективных приложения:

- как источник плазменного потока для установки по разделению изотопов методом ИЦР-нагрева;
- как источник интенсивных атомарных потоков в установке по модификации поверхностей различных материалов: нанесение тонких пленок и имплантация.
- как движитель для вывода на геостационарную орбиту и в системах коррекции космических летательных аппаратов.

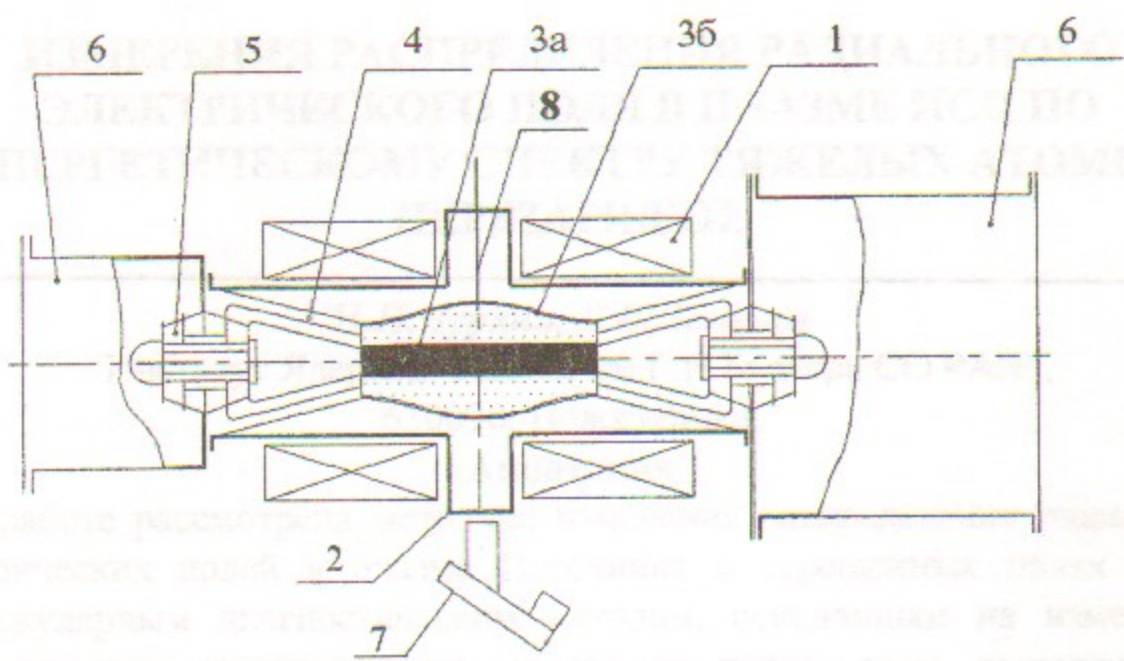


Рис.1. Установка "Источник в скрещенных полях". 1 - катушки электромагнита, 2 - вакуумная камера, 3а - внутренний лайнер - катод, 3б- внешний лайнер - анод, 4 - торцевые электроды, 5 - изолятор, 6 - система высоковольтного питания, 7 - диагностическая система, 8 - одиночный электрический зонд.

Для оптимизации работы источника в различных приложениях и усовершенствования физической модели источника необходимо знать параметры плазмы: температуру электронов, плотность плазмы. Особый интерес представляет измерение распределения радиальных электрических полей и энергетических спектров атомов перезарядки, выходящих из плазмы.

Для измерения распределения электрических полей в плазме в настоящее время разработано множество различных диагностических методов: оптические, основанные на штарк-эффекте, корпускулярные, зондовые и другие [2, 3, 4, 5].

В представленной работе применялось два метода: корпускулярный и, дополнительно к нему, зондовый. Корпускулярный метод использует особенность плазмы в ИСП - вращение плазмы, кроме того этот метод позволяет проводить измерения энергетических спектров атомов перезарядки. Зондовый

метод - универсальный и простой, использовался для контроля корпускулярных измерений.

### Корпускулярный метод диагностики.

Корпускулярный метод использует особенности ИСП - замагниченность ионов и вращение плазмы вокруг оси источника в межэлектродном пространстве. Метод основан на измерении энергетических спектров выходящих из источника атомов перезарядки.

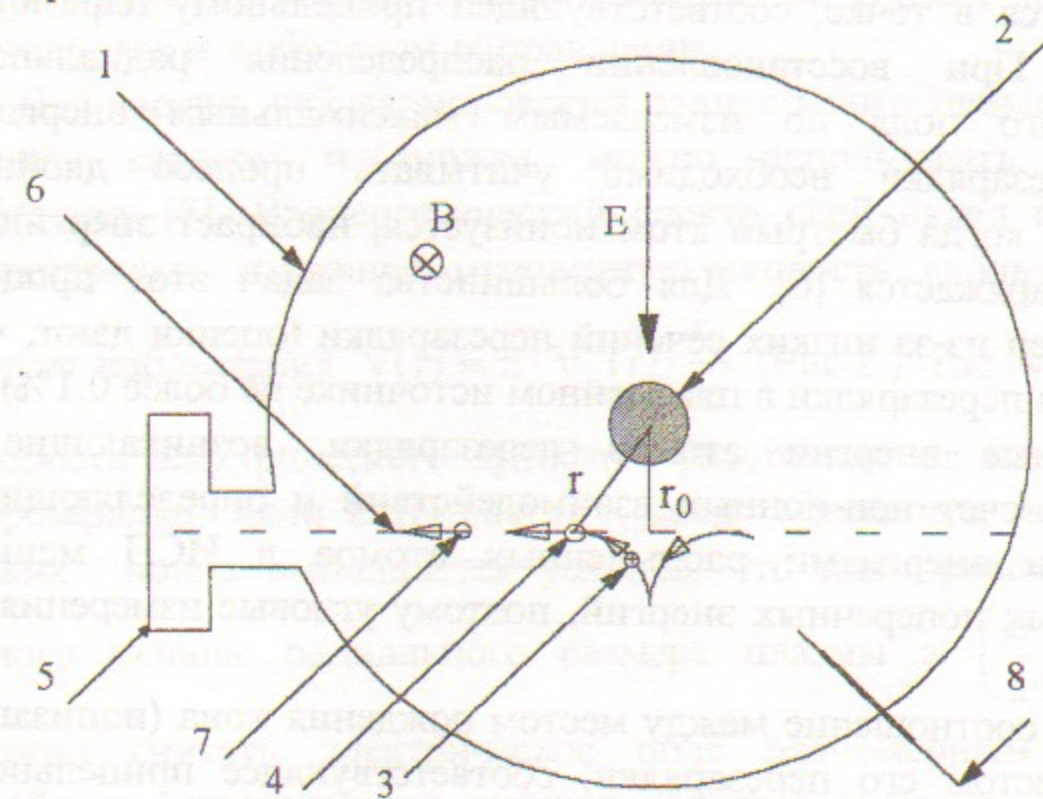


Рис.2. Схема расположения электрического зонда и диагностической системы для измерения энергетических спектров атомов перезарядки (центральная плоскость ИСП):

- |                                  |                            |
|----------------------------------|----------------------------|
| 1-анод,                          | 5-диагностическая система, |
| 2-катод,                         | 6-хорда наблюдения,        |
| 3-траектория движения иона,      | 7-атом перезарядки,        |
| 4-место перезарядки иона в атом, | 8-электрический зонд.      |

Ионы двигаются в скрещенных полях по циклоидам (рис.2) и, перезарядившись на нейтральных частицах в объеме плазмы, покидают источник вдоль касательной к траектории движения первоначального иона в месте перезарядки с энергией, близкой к его энергии. Измерения энергетических спектров атомов перезарядки проводятся на различных хордах наблюдения с соответствующими прицельными параметрами  $r_0$ . При условии, что электрическое поле  $E(r)$  монотонно и растет к аноду медленнее, чем  $r$ , максимальной энергией на данной хорде наблюдения будет обладать атом, который перезарядается в точке, соответствующей прицельному параметру хорды  $r_0$ . При восстановлении распределения радиального электрического поля по измеряемым максимальным энергиям атомов перезарядки необходимо учитывать процесс двойной перезарядки, когда быстрый атом ионизуется, набирает энергию и вновь перезарядается [6]. Для большинства задач этот процесс несущественен из-за низких сечений перезарядки (оценки дают, что таких атомов перезарядки в плазменном источнике не более 0.1%).

Продольные энергии атомов перезарядки, возникающие в основном за счет ион-ионных взаимодействий и определяющиеся продольными энергиями распыленных атомов в ИСП меньше максимальных поперечных энергий, поэтому угловые измерения не проводились.

Известно соотношение между местом рождения иона (ионизации атома) и местом его перезарядки, соответствующее прицельному параметру данной хорды наблюдения (т.е. для атома перезарядки с максимальной энергией для данной хорды наблюдения) [7]:

$$W_{\max} = \frac{q^2 \cdot B^2 \cdot (R^2 - r_0^2)^2}{8 \cdot M \cdot r_0^2}, \text{ где } R - \text{ место рождения иона, } M -$$

масса иона.

Зная величину магнитного поля  $B$ , массу иона  $M$ , прицельный параметр хорды наблюдения  $r_0$  и, измеряя максимальную энергию  $W_{\max}$  атома перезарядки, выходящего вдоль данной хорды, можно рассчитать место рождения  $R$  первоначального иона. Тогда, считая поведение электрического поля монотонным и, задаваясь различным

распределением  $U(r)$ , можно с помощью расчетов по методу наименьших квадратов подобрать для поля такую зависимость ( $U=U(r)$ ), при которой на этой кривой будут находиться одновременно место рождения этого иона и прицельный параметр хорды наблюдения, так что  $W_{\max}=q(U(R)-U(r_0))$  (здесь:  $q$  - заряд иона,  $U(R)$  - потенциал пространства в месте рождения иона,  $U(r_0)$  - потенциал пространства на прицельном параметре  $r_0$  хорды наблюдения), и этой зависимости будут удовлетворять измерения, проведенные для всех хорд наблюдения. Данная методика работает при измерении энергетических спектров по хордам как от анода к катоду, так и в обратном направлении.

Для частиц, чей ларморовский радиус много меньше расстояния между катодом и анодом, можно использовать упрощенную методику [8]. В энергетический спектр свой вклад вносят атомы перезарядки, имеющие мгновенную скорость вдоль направления

хорды наблюдения  $V(r) \approx 2 \cdot V_E(r) \cdot \frac{r_0}{r}$  (Рис.2.), где  $V_E(r) = \frac{E(r)}{B(r)}$  -

скорость электрического дрейфа,  $r$ -расстояние от катода до места перезарядки. Если  $E(r)$  растет к аноду медленнее, чем  $r/r_0$ , и для таких ионов выполняется условие, что ларморовский радиус  $\rho$  много меньше радиального размера плазмы  $a$  ( $\frac{\rho}{a} \leq 0.1$ ). Тогда

можно считать электрическое поле равномерным на размере двойного ларморовского радиуса, траекторию ионов - классической циклоидой, а энергию иона на данной хорде максимальной при  $r=r_0$ :

$$W(r_0)_{\max} \approx 4 \cdot W_E(r_0).$$

Тогда электрическое поле в точке  $r_0$ :

$$E(r_0) = B(r_0) \cdot \sqrt{\frac{W(r_0)}{2 \cdot M}}, \text{ где } M - \text{ масса иона.}$$

Для измерения энергетических спектров атомов перезарядки используется диагностическая система, состоящая из следующих узлов: ионизационной камеры, электростатического анализатора энергий, масс-сепаратора, детектора (рис.3).

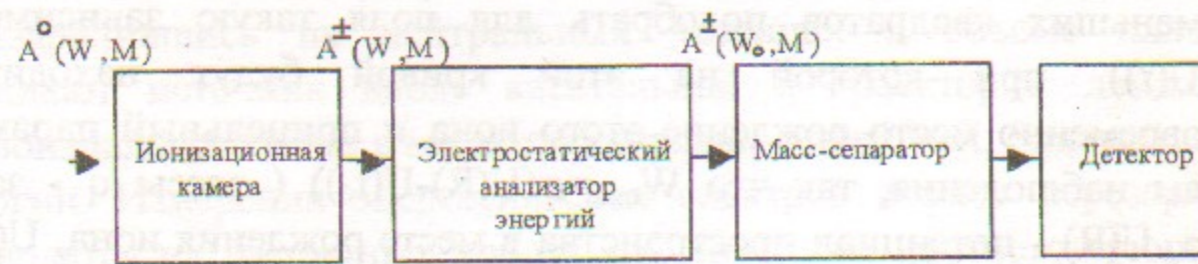


Рис.3. Функциональная схема диагностической системы

Атомы перезарядки покидают плазменный источник вдоль хорды измерения перпендикулярно оси плазменного источника. Далее поток атомов проходит через систему коллимирующих отверстий, выделяющую определенную хорду наблюдения со своим прицельным параметром. В дальнейшем в ионизационной камере атомы перезарядки превращаются в ионы (рис.4).

Эффективность диагностики атомов перезарядки в значительной мере определяется применяемым методом преобразования атомов в ионы. В зависимости от задачи диагностики могут применяться те или иные методы: для измерения в области средних энергий ( $>1000$  эВ) - газовые мишени, преобразующие атомы в положительные ионы; для области низких энергий (прежде всего для водорода) - цезиевая мишень, преобразующая атомы в отрицательные ионы. В данной работе применяется ионизация атомов в импульсной газовой мишени.

Из ионизационной камеры ионы попадают в  $45^\circ$  электростатический энергоанализатор типа плоского конденсатора [9], где они летят по параболическим траекториям, разделяясь в зависимости от собственной энергии так, что в выходное окно попадают частицы только с определенной энергией и угловой разходимостью, остальные оседают на стенках. В применяемом энергоанализаторе выполняется соотношение между напряжением на обкладках  $U_{за}$  и энергией выделяемых частиц  $W_0$ :  $W_0 = 1.25 \cdot U_{за}$ .

Ионы с выделенной в энергоанализаторе энергией попадают в электромагнитный масс-сепаратор, где, двигаясь в однородном магнитном поле разделяются по массам. Несмотря на то, что при движении внутри источника максимальные энергии тяжелых ионов

(5 КэВ) много больше максимальных энергий легких (300 эВ) из-за разности в массах, для измерения энергетических спектров отдельно легких и тяжелых атомов перезарядки, так как в области низких энергий их спектры могут перекрываются, и необходимо их разделить, для чего и предназначен масс-сепаратор. Масс-сепаратор позволяет разделять частицы с отношением масс  $> 2.8$ . Таким образом электромагнитный масс-сепаратор дает возможность отделять легкие ионы от тяжелых, при использовании практически любых материалов катода и легкого стабилизирующего газа.

Регистрация частиц осуществляется детекторами, выполненными на основе МКП (микроканальных пластин) [10].

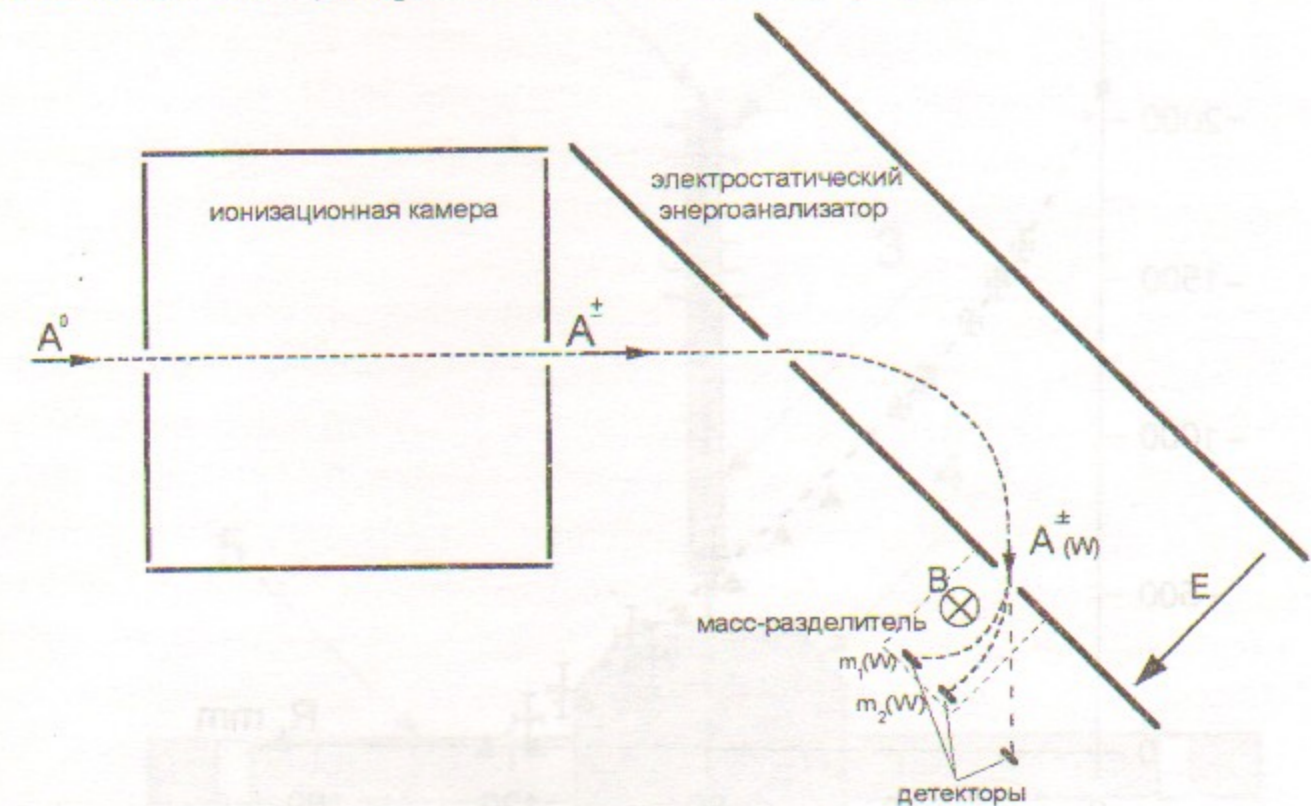


Рис.4. Принцип работы элементов диагностической системы.

Для повышения эффективности регистрации микроканальными умножителями в области энергии регистрируемых частиц  $< 1000$  эВ в системе предусмотрена возможность их доускорения. Доускорение частиц производится как за счет доускорения ионов непосредственно перед МКП (это связано с падением эффективности МКП при энергии частиц  $< 500$  эВ) [10], так и за счет "повешенной" ионизационной камеры, на которую подается потенциал, и заземленной сеткой, установленной на входе анализатора энергии.

## Результаты измерений.

Были проведены эксперименты по измерению распределения радиального электрического поля по максимальным энергиям спектра атомов перезарядки, используя выше описанную диагностическую систему (рис.5). Измерения проводились по хордам наблюдения от катода к аноду до середины плазменного промежутка ( $R=56$  мм). Этих измерений достаточно для восстановления распределения описанным выше методом.

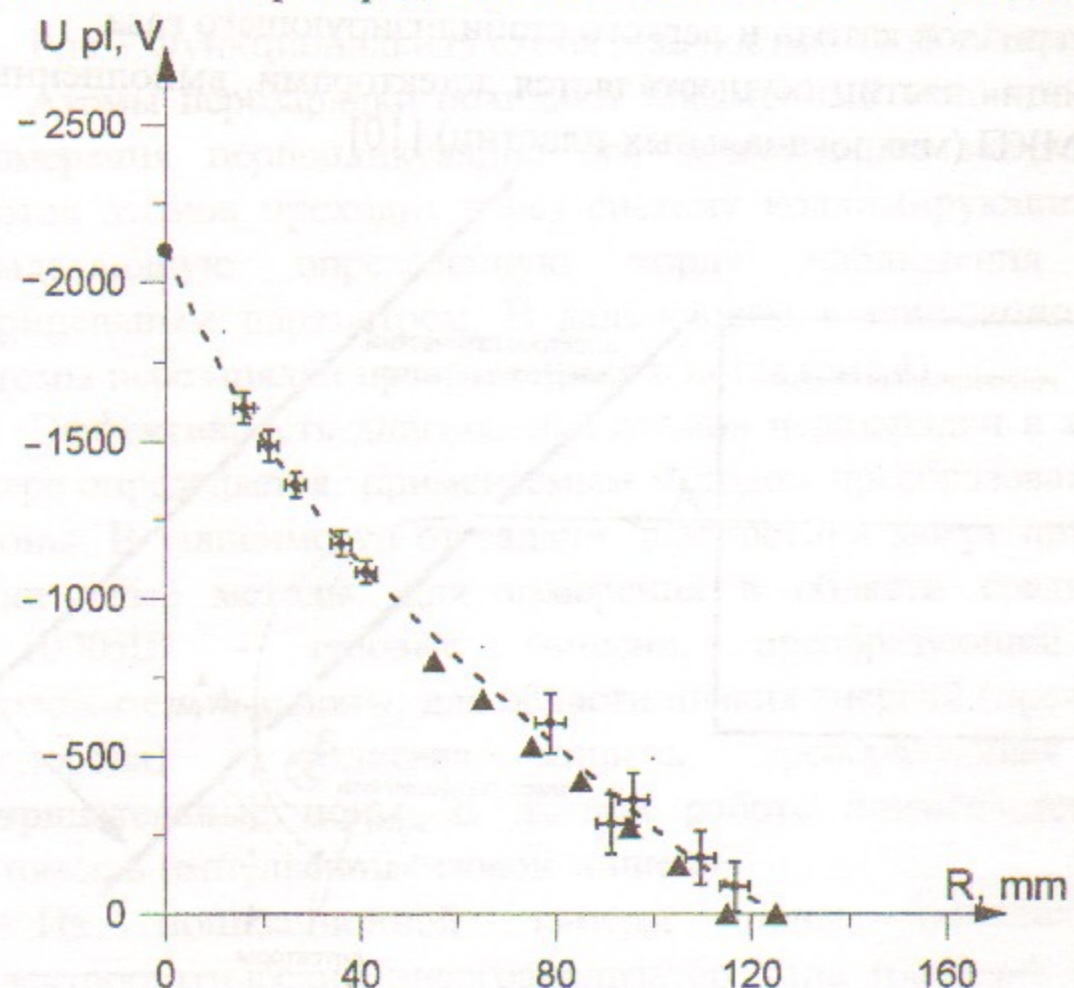


Рис.5. Распределение потенциала в плазме как функция расстояния от катода (напряжение на катоде  $U = -2.1$  кВ, материал катода - титан, стабилизирующий газ - водород):  $\bullet$  - по энергетическим спектрам,  $\blacktriangle$  - по зондовым измерениям.

На рисунке указаны погрешности, вносимые диагностической системой в измерения энергетических спектров и определения прицельного параметра хорды наблюдения. Эти погрешности вблизи анода выше, чем у катода, что связано с накоплением погрешностей из-за расчетного характера этих точек.

Так как зависимость  $U(r)$  является экстраполированной, то желателен контроль полученных результатов, осуществляемый другим диагностическим методом.

В работе для контроля использовался метод измерения распределения потенциала одиночным электрическим зондом (рис.6). Зонд вводился на расстояние до 70 мм от анода, на большем расстоянии он вносил заметные искажения в плазму, что не позволяло правильно интерпретировать результаты.

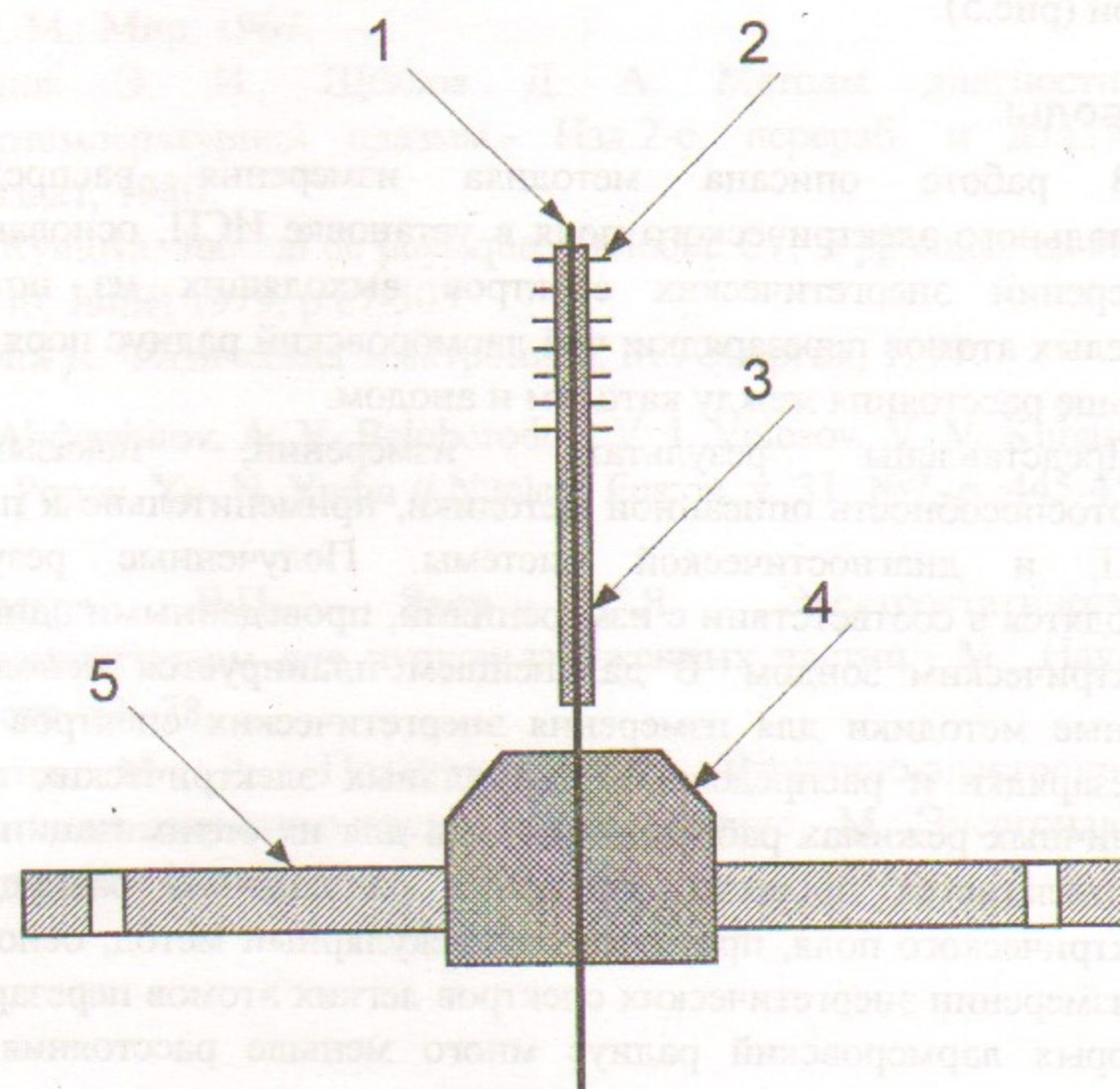


Рис.6. Электрический зонд. 1- Измерительный вольфрамовый стержень; 2- металлические кольца; 3- изолирующая керамическая трубка; 4- вакуумный ввод; 5- фланец.

Электрический зонд представляет из себя вольфрамовый стержень диаметром 0.5 мм и длиной 3 мм. На керамической трубке, изолирующей стержень, находятся металлические кольца, которые

поддерживают локальное распределение электрического потенциала в плазме и защищают трубку от напыления проводящего слоя.

При восстановлении распределения электрического поля по зондовым измерениям плавающего потенциала была принята температура электронов  $T_e \sim 50 \text{eV}$ , определенная из вольтамперных характеристик зонда, эта температура являлась практически постоянной на доступных для зонда расстояниях.

Распределение электрического потенциала в плазме, измеренное корпускулярным и зондовым методами хорошо согласуется между собой (рис.5).

### Выводы.

В работе описана методика измерения распределения радиального электрического поля в установке ИСП, основанная на измерении энергетических спектров выходящих из источника тяжелых атомов перезарядки, чей ларморовский радиус порядка или больше расстояния между катодом и анодом.

Представлены результаты измерений, показывающие работоспособность описанной методики, применительно к плазме в ИСП, и диагностической системы. Полученные результаты находятся в соответствии с измерениями, проведенными одиночным электрическим зондом. В дальнейшем планируется использовать данные методики для измерения энергетических спектров атомов перезарядки и распределения радиальных электрических полей в различных режимах работы источника для их оптимизации. Также предполагается провести измерения радиального распределения электрического поля, применяя корпускулярный метод, основанный на измерении энергетических спектров легких атомов перезарядки, у которых ларморовский радиус много меньше расстояния между катодом и анодом.

Авторы выражают благодарность В. И. Волосову и А. Г. Стешову за полезные обсуждения и критические замечания.

### Литература.

1. Чуркин И.Н. // Разряд с тяжелыми ионами в скрещенных полях, его модификации и приложения // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Новосибирск, Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера, 1997.
2. Методы исследования плазмы. /Под. Ред. Лохте-Хольтгревена. М.: Изд-во Мир, 1971.
3. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969.
4. Диагностика плазмы. Под. ред. Р. Халдстоуна, С. Леонарда. Пер. с англ. М.: Мир, 1967.
5. Кузнецов Э. И., Щеглов Д. А. Методы диагностики высокотемпературной плазмы.- Изд.2-е, перераб. и доп.-М.: Атомиздат, 1980.
6. M. P. Ryutova. Journal de physique, Colloque C7, supplement au №7, Tome 40, Juillet 1979, p.с7-503.
7. Шимони К. Физическая электроника. М.: Энергия, 1977.
8. G. F. Abdrashitov, A. V. Beloborodov, V. I. Volosov, V. V. Kubarev, Yu. S. Popov, Yu. N. Yudin // Nuclear Fusion, v. 31, №7, p. 445-451, 1991.
9. Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц.- М.: Наука, 1978, стр. 53- 78.
10. Айнбунд М. Р., Поленов Б. В. Вторично-электронные умножители открытого типа и их применение.- М.: Энергоиздат, 1981, стр.42 - 105.

*И.Н. Чуркин, В.В. Деменев*

**Измерения распределения радиального  
электрического поля в плазме ИСП  
по энергетическому спектру  
тяжелых атомов перезарядки**

*I.N. Churkin, V.V. Demenev*

**The measurement of radial electrical  
field distribution inside the SCF plasma  
by energy spectra of heavy charge-exchanged atoms**

ИЯФ 98-88

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 30.11. 1998 г.

---

Сдано в набор 4.12.1998 г.

Подписано в печать 4.12.1998 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0.9 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 88

---

Обработано на IBM PC и отпечатано на  
ротапринтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.