

45

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
СО АН СССР

В.Н.Бочаров, С.Г.Константинов, А.М.Кудрявцев,  
О.К.Мыскин, В.М.Панасюк, Ф.А.Цельник

ЗОНДИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ  
ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫМИ ПУЧКАМИ АТОМОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОГОВЫХ  
ДЕТЕКТОРОВ

ПРЕПРИНТ 82-144



Новосибирск

ЗОНДИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫМИ ПУЧКАМИ  
АТОМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОГОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

В.Н.Бочаров, С.Г.Константинов, А.М.Кудрявцев,  
О.К.Мыскин, В.М.Панасюк, Ф.А.Цельник

А Н Н О Т А Ц И Я

Описан способ существенного увеличения (до  $10^4$ ) отношения сигнал/шум при активной корпускулярной диагностике плазмы за счет использования высокоэнергичного (до 80 кэВ) пучка атомов гелия и системы полупроводниковых кремниевых детекторов с нижним порогом регистрации  $\sim 15$  кэВ. Измерены коэффициенты усиления детекторов в диапазоне 10-70 кэВ, приведены результаты измерений радиального профиля плотности и потенциала вращающейся плазмы.

Зондирование корпускулярными пучками является одним из наиболее информативных методов диагностики плазмы. Различные способы такого зондирования, основанные на использовании многообразных процессов взаимодействия пучков с плазмой, описаны в большом количестве работ (см., например, обзор /1/). Однако практическое применение этих способов часто бывает осложнено из-за трудности выделения сигнала из шумов, создаваемых потоками плазменных частиц и фотонов. Мы хотим обратить внимание на возможность существенного улучшения отношения сигнал/шум в тех измерениях, когда информация о параметрах плазмы извлекается из анализа провзаимодействовавшего с ней пучка. В таких случаях можно сильно подавить как прямые, так и "просачивающиеся" в результате многократных отражений через входные устройства анализаторов шумовые потоки, если использовать в качестве регистрирующих устройств пороговые по энергии детекторы. Естественно, что величина порога и энергия зондирующего пучка должны заметно превышать характерные энергии частиц плазмы. Такие детекторы и высокоэнергичный (50+80 кэВ) атомарный пучок применяются на установке с вращающейся плазмой СВПП /2/ для измерения пространственных распределений плотности и потенциала плазмы. В условиях этих экспериментов (см. ниже) оказалось возможным измерять полезный сигнал на уровне  $10^{-8}$  А при шумовом токе на поверхность детектора порядка  $10^{-4}$  А.

В качестве детекторов используются твердотельные (кремниевые) пропорциональные счетчики, изготавливаемые в ИЯФ СО АН /3/. Золотое покрытие толщиной  $\sim 300 \text{ \AA}$ , а также наличие у счетчиков "мертвого слоя" обеспечивают порог регистрации по протонам и ионам  $\text{He}^+ \approx 15 \text{ кэВ}$ . Потоки частиц с энергией выше пороговой регистрируются таким счетчиком со значительным усилением (рис.1), что естественно, так как на образование пары в нем требуется всего 3,5 эВ. Счетчики не чувствительны к магнитному полю, имеют малые размеры ( $2 \times 1 \times 0,1 \text{ см}^3$ ) и в токовом режиме включаются по простой электрической схеме. Величина выходного тока в линейном режиме усиления может достигать нескольких миллиампер при длительности токового импульса 1 мс. Внедрение в тело счетчика протонов и ионов  $\text{He}^+$  с общим зарядом  $10^{-6}$  К не приводило к изменению его свойств.

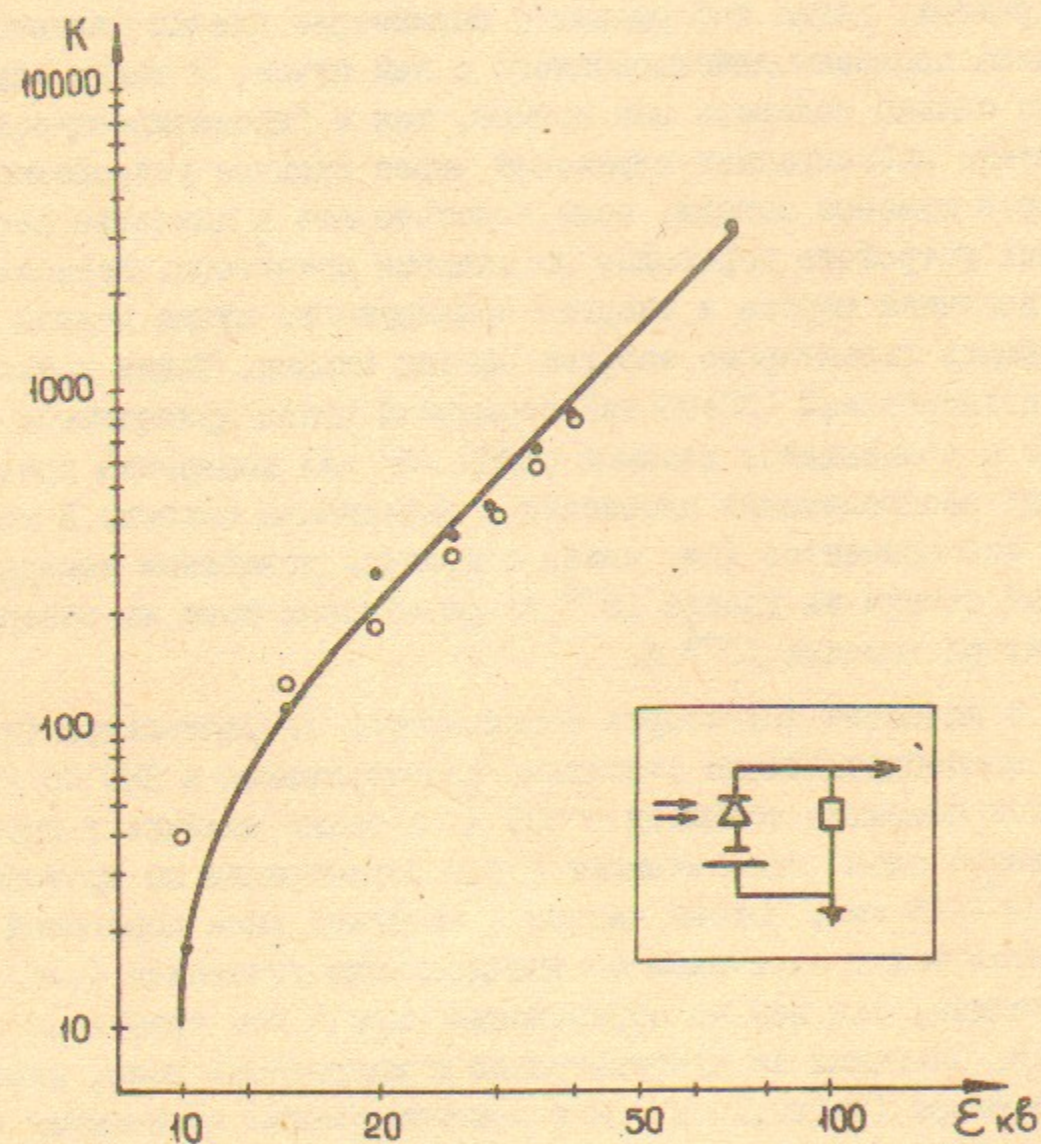


Рис.1. Зависимость коэффициента усиления счетчика от энергии ионов • — ионы He<sup>+</sup>; ○ — ионы H<sup>+</sup>

В качестве пороговых детекторов мы также применяли и выпускаемые промышленностью кремниевые фотопреобразователи — т.н.солнечные фотоэлементы /4/. Они обладают сходными со счетчиками свойствами, но имеют меньшие коэффициенты усиления.

Для проведения корректных измерений параметров плазмы необходимо иметь стабильный по току и энергии частиц, обладающий малой угловой расходимостью зондирующий атомарный пучок. Поэтому созданию и отработке инжектора пучка, способного работать на различных газах и допускающего перестройку по энергии от 20 до 100 кэВ, было уделено особое внимание (рис.2). Источником плазмы, из которой затем вытягиваются ионы, является дуговой разряд с холодным катодом с системой контрагирующих диафрагм и магнетронным поджигом. Электрод-экстрактор имеет фиксированный потенциал — 35 кВ относительно плазменной границы. Экстрагируемые ионы формируются электростатической линзой в почти параллельный пучок и доускоряются регулируемой разностью потенциалов (20+100 кВ). Такая схема позволяет менять энергию пучка в широких пределах при неизменных условиях в области экстракции, что существенно повышает устойчивость работы инжектора. После доускорения ионный пучок перезаряжается в атомарный на импульсной газовой мишени и проходит коллимирующие диафрагмы. Инжектор может работать на различных газах — в ряде экспериментов использовались дейтерий, азот, аргон /5/. В данной работе использовался гелий. Ток пучка атомов He на расстоянии 1,5 м составляет 0,25 экв.мА при сечении 0,4 x 3см<sup>2</sup> и слабо зависит от энергии в диапазоне 30+70 кВ. Инжектор не требует повседневной тренировки и обеспечивает стабильный (не хуже 1%) поток атомов от импульса к импульсу. Длительность импульса до 10 мс. Предусмотрено применение цуга импульсов длительностью 300 мкс каждый.

Особенностью экспериментов на установке с вращающейся плазмой СВМП является то, что удерживаемая в пробочной ловушке плазма находится внутри плотной завитой плазменной оболочки ( $r = 13$  см,  $\Delta r = 1$  см), которая создается с помощью кольцевых плазменных источников /6/. Плотность плазмы в оболочке ( $n \sim 10^{14}$  см<sup>-3</sup>) в ряде случаев существенно больше, чем плотность удерживаемой плазмы в основном объеме ( $10^{12} + 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>). В таких условиях практически исключено многохордовое зондирование и возможны лишь локальные измерения плотности. Как и в работах /7,8/ в на-

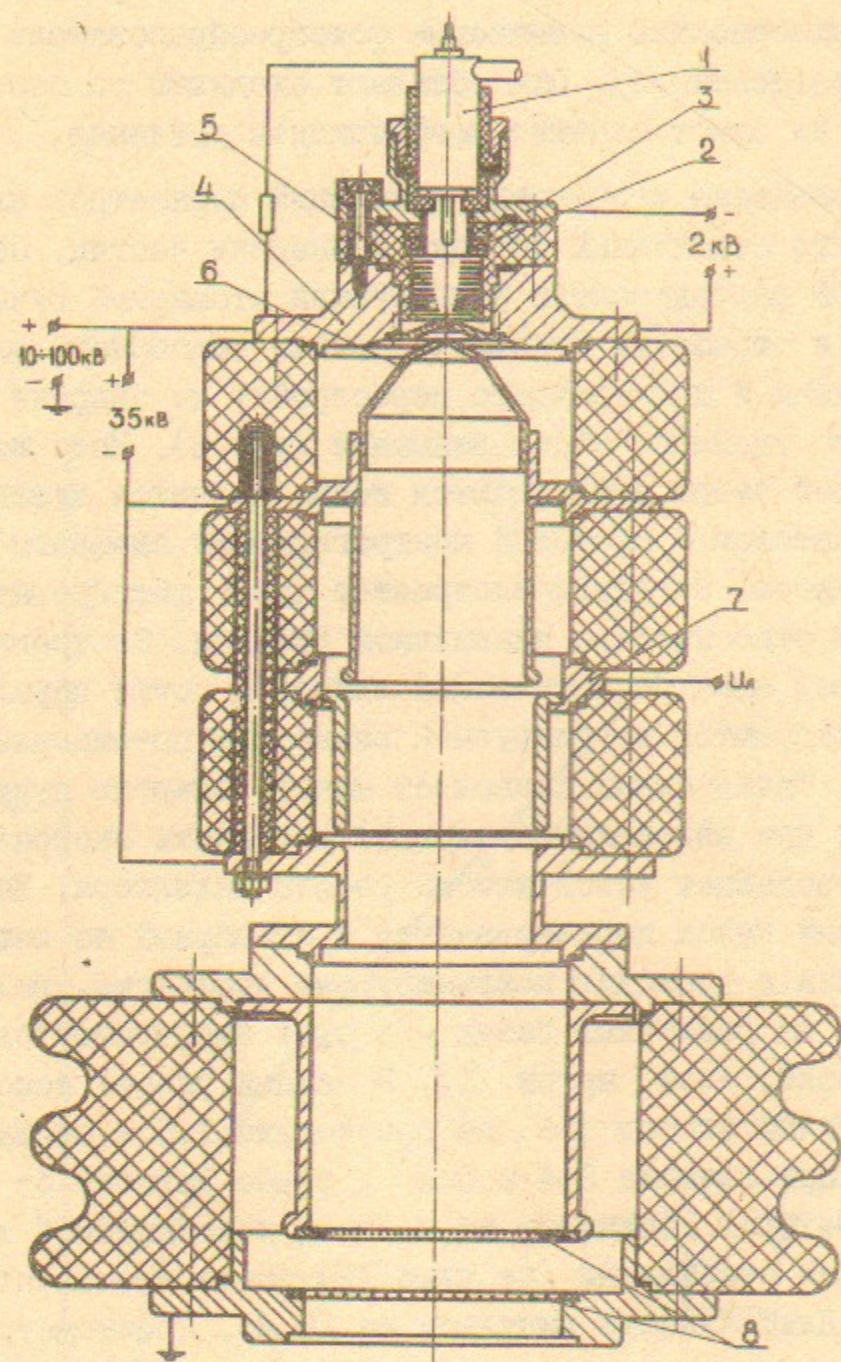


Рис.2. Инжектор диагностирующего пучка

1 - газовый клапан (конструктивно является анодом ячейки магнетронного поджига); 2 - намагниченные кольца из  $SrCO_5$ ; 3 - катод; 4 - анод; 5 - контрагирующие диафрагмы; 6 - экстрактор; 7 - центральный электрод линзы; 8 - сетки.

ших измерениях регистрировались те частицы зондирующего пучка, которые в результате взаимодействия с плазмой меняют свое зарядовое состояние, а, следовательно, и траекторию в магнитном поле ловушки (поле аксиально-симметричное). Схема измерений представлена на рис.3. Пучок атомов гелия инжектируется по радиусу в экваториальной плоскости ловушки сверху; пучок ориентирован большим размером параллельно оси установки. Ионы  $He^+$ , образовавшиеся, в основном, в результате перезарядки атомов He на ионах плазмы ( $H^+$ ), заворачиваются магнитным полем установки, проходят после выхода из плазмы через систему коллиматоров и регистрируются пороговыми полупроводниковыми детекторами. В нижней полу-плоскости экваториального сечения выбрано пять зон наблюдения с координатами  $r_k$ , равными 5, 7, 9, 11 и 13 см и характерными размерами  $\Delta r \approx \pm 0,4$  см (азимутальные размеры зон задаются меньшим размером ленточного пучка). Каждой зоне соответствует своя система коллиматор-детектор. Геометрия каждого коллиматора такова, что он пропускает на детектор ионы, образовавшиеся только в соответствующей зоне  $r_k \pm \Delta r$  и только при условии, что на выходе из плазмы эти ионы имеют определенную энергию  $\epsilon_0$ . В стандартных режимах работы  $\epsilon_0 = 50$  кэВ при величине магнитного поля  $B = 6$  кГс.

Для плазмы установки СВИШ характерно наличие в ней большого отрицательного потенциала  $\psi$  (до 20 кВ на оси). Поэтому, из-за торможения ионов  $He^+$  электрическим полем плазмы, для измерения плотности в зоне  $r_k$  необходимо подстроить энергию  $\epsilon_A$  атомов пучка так, чтобы выполнялось условие  $\epsilon_A + e\psi(r_k) = \epsilon_0$ . Таким образом, автоматически, вместе с измерением значений плотности  $n(r_k)$ , пропорциональных току соответствующего детектора, измеряются значения  $\psi(r_k)$ .

Возможность пользоваться неподвижной системой коллиматор-детектор даже при величинах потенциала, соизмеримых с  $\epsilon_0$ , достигалась за счет нескольких факторов. Атомарный пучок узкий, инжектируется по радиусу, и зоны наблюдения выбираются по возможности ближе к точкам выхода ионов  $He^+$  из плазмы. Тогда влияние потенциала сводится к тому, что траектория иона  $\theta(r)$  вне плазмы поворачивается как целое на малый угол  $\Delta\theta$  ( $\Delta\theta \approx 0$  при  $\psi(r) = 0$ ). Детектор и примыкающая к нему выходная часть коллиматора размещались в области, где  $d\theta/dr \rightarrow \infty$ . Нетрудно

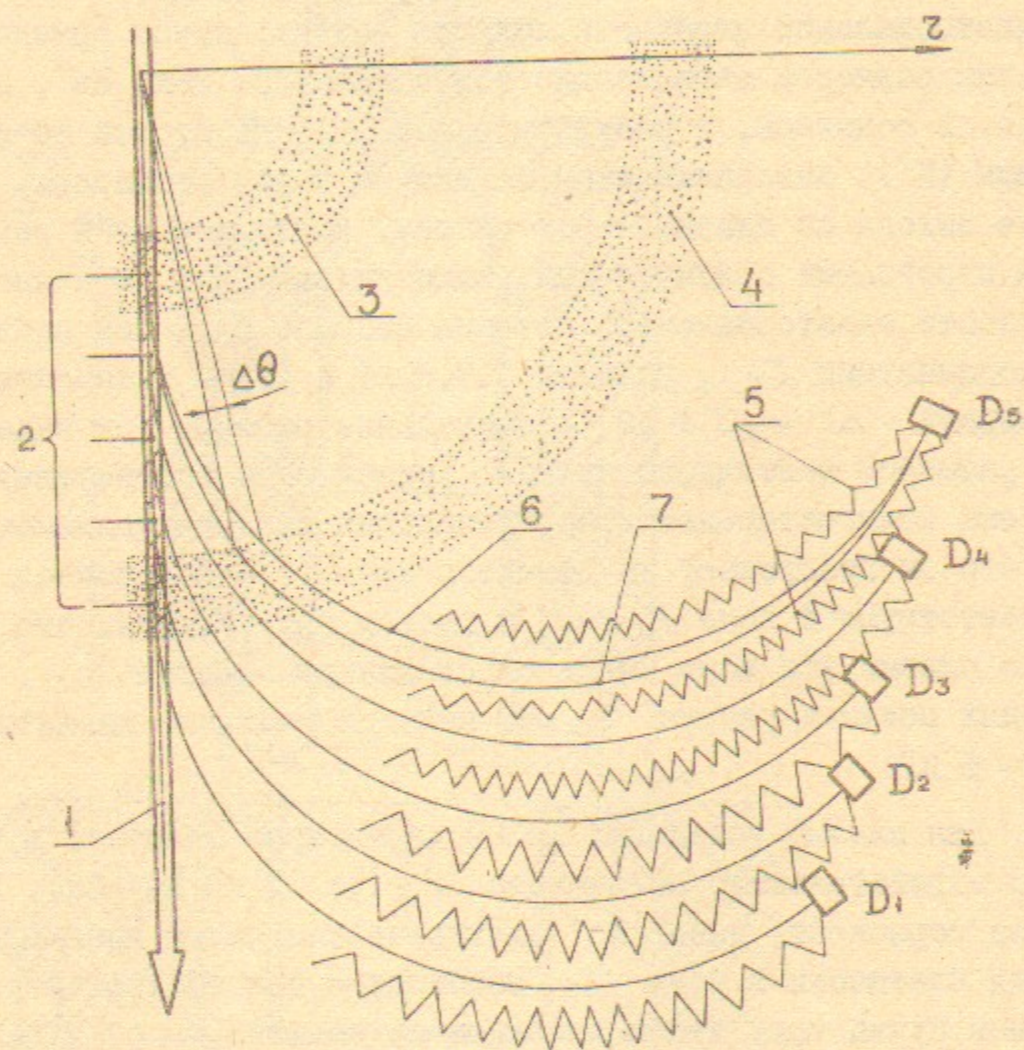


Рис.3. Схема измерений

1 — пучок атомов He; 2 — зоны наблюдения;  
 3 — внутренняя струя; 4 — защитная плазменная оболочка; 5 — коллиматоры; 6 — траектория иона  $\text{He}^+$  при  $\psi = 0$ ; 7 — траектория при  $\psi = -35$  кВ;  
 $D_1 + D_5$  — пороговые детекторы.

видеть, что в этой области размер и форма коллиматора слабо чувствительны к вышеупомянутым поворотам траекторий. Ширина входной части коллиматора, фактически, определяется только выбранным размером зоны наблюдения  $\Delta r$ . В итоге оказывается возможным сделать коллиматор, в который вписываются все траектории иона, соответствующие любым значениям  $\psi$  от 0 до -20 кВ и любым разумным профилям  $\psi(r)$ , сохранив достаточно высокое энергетическое разрешение  $\Delta \epsilon / \epsilon = 6\%$ .

Это позволяет пользоваться результатами абсолютной калибровки детекторов, проводящейся на газе при  $\psi(r) = 0$ . Калибровка проводится непосредственно на установке в той же геометрии и при том же значении  $V$  и  $\epsilon_0$ , что и измерения, по обдирке атомов He на молекулярном водороде ( $\sigma \approx 6 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ ), известное количество которого напускается в объем.

В результате значение плотности плазмы  $n(r_k)$  определяется по току соответствующего детектора и сечениям процессов образования ионов  $\text{He}^+$  в окрестности  $r_k$ . В используемом диапазоне энергий диагностирующего пучка  $\epsilon_A = 50+70$  кэВ сечение перезарядки He на  $\text{H}^+$  составляет  $\sigma_{01} \approx (1,5+2) \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  и не зависит от температуры ионов плазмы, так как скорость атомов гелия  $v_A \gg v_{Te}$ . Сравнимый вклад в образование ионов  $\text{He}^+$  может дать и ионизация электронами: при температуре  $T_e \sim 100$  эВ, когда скорость ионизации максимальна,  $\langle \sigma v_e \rangle / v_A \approx 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ . Таким образом, если  $T_e$  неизвестна, абсолютные измерения  $n(r_k)$  проводятся с точностью до 2. При зондировании высокотемпературной плазмы необходима также оценка концентрации многозарядных ионов примесей, т.к. при больших  $Z$  ( $Z \geq 4$ ) сечение перезарядки на этих ионах на порядок превышает сечение перезарядки на протонах /1/.

На рис.4 в качестве иллюстрации показан результат измерения плотности в режиме малого потенциала плазмы (-6 кВ) на оси. Отчетливо виден немонотонный характер профиля плотности. По оценкам температура  $T_e$  в этом режиме не превышает 30 эВ, так что наличие многозарядных ( $Z \geq 4$ ) ионов примесей маловероятно. Кроме того, доминирующая по результатам спектроскопических измерений примесь — ионы углерода  $\text{C}^+$ ,  $\text{C}^{2+}$  — имеет anomalно малое сечение перезарядки на гелии /9/. Таким образом, основным процессом образования ионов  $\text{He}^+$  в этом режиме является перезарядка на прото-

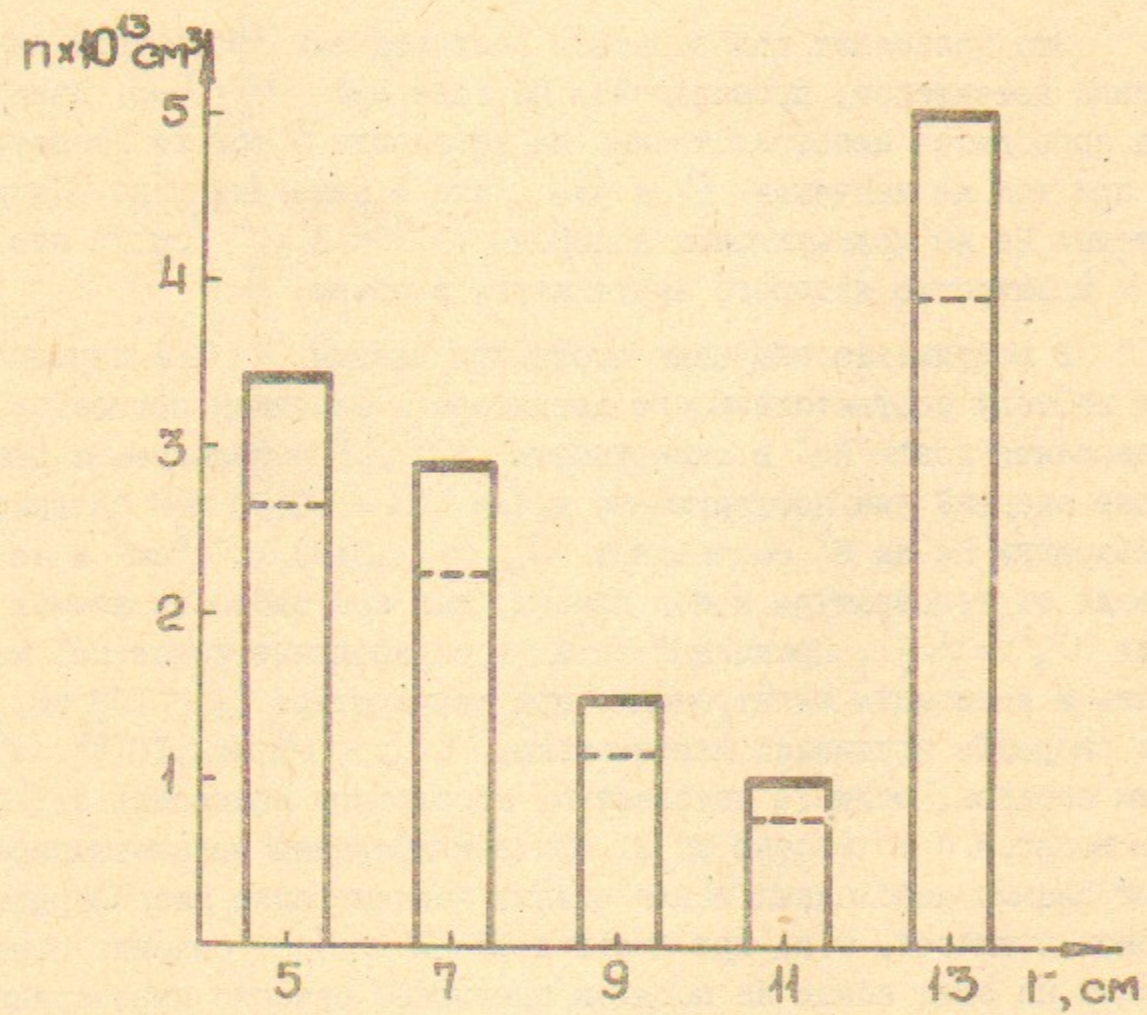


Рис.4. Радиальное распределение плотности плазмы (штриховые линии соответствуют учету возможной ионизации электронами)

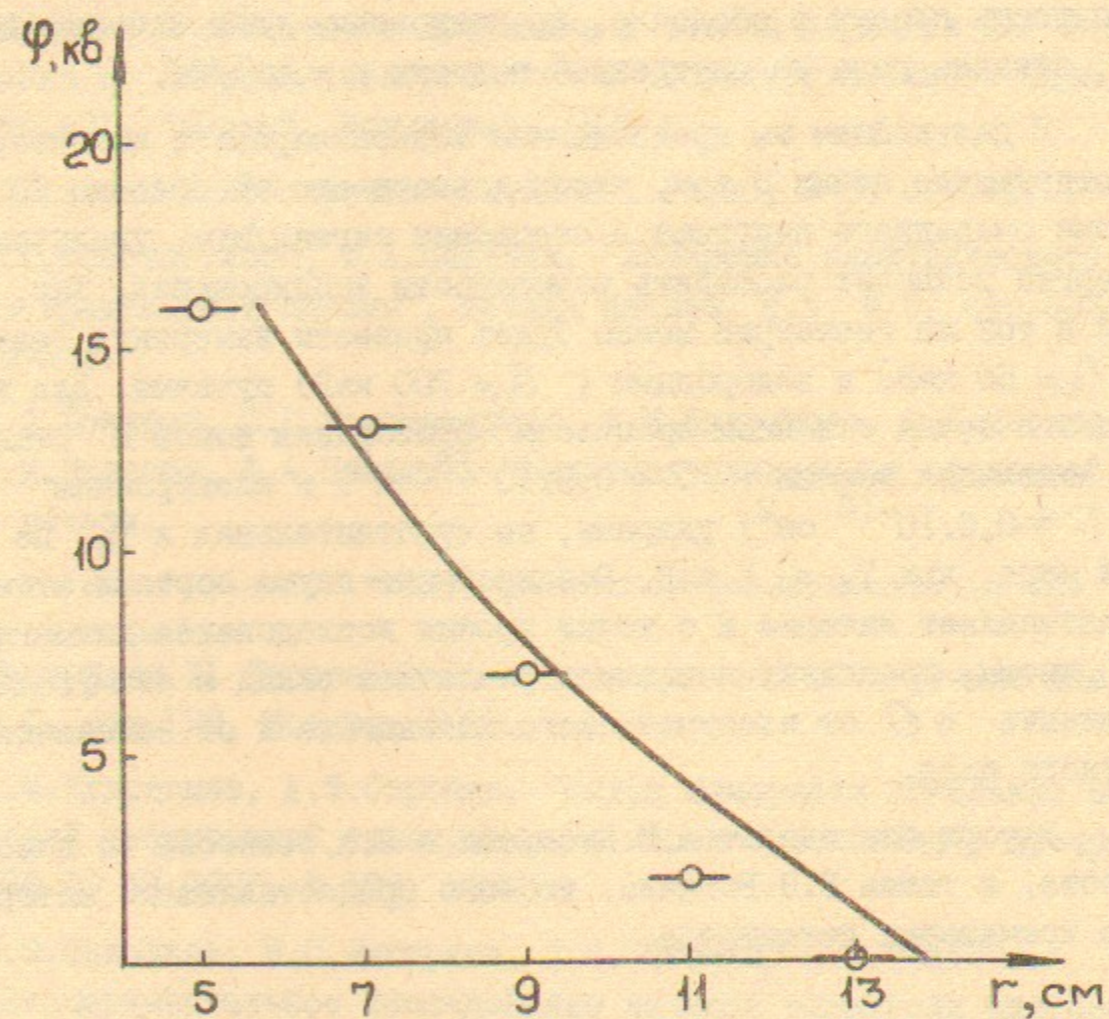


Рис.5. Радиальное распределение потенциала в плазме малой плотности  
 0 — измеренные значения; линия — расчетное вакуумное распределение

нах, и с учетом только этого процесса получен приведенный результат. Неопределенность в абсолютном значении плотности, связанная с невозможностью корректно учесть вклад от ионизации атомов He электронами, при этом не более 30%. На рис.5 показано распределение потенциала  $\varphi(r)$ , измеренное при исследовании свойств внутренней струи, играющей в установке СВИПП роль центрального электрода (защитная плазменная оболочка отсутствует). Отличие профиля потенциала от вакуумного объясняется наличием фоновой плазмы в полости между внутренней струей и металлическим лайнером. Эта методика использовалась нами также и для исследования свойств защитной плазменной оболочки: определялась плотность плазмы в оболочке, проникновение газа сквозь оболочку, откачка газа из внутренней полости и т.д. /6/.

В дальнейшем мы предполагаем модернизировать инжектор диагностирующего пучка с тем, чтобы довести его энергию до 200 кэВ. Кроме очевидного выигрыша в отношении сигнал/шум, увеличение энергии позволит расширить возможности зондирования. Так, в одной и той же геометрии можно будет провести измерения гелиевым ( $\mathcal{E}_0 = 50$  кэВ) и водородным ( $\mathcal{E}_0 = 200$  кэВ) пучками. Для водородного пучка основным процессом образования ионов  $H^+$  становится ионизация ионным ( $\sigma \approx 0,8 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ ) и электронным ( $\sigma \approx 0,6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ ) ударами, не чувствительная к  $T_e$ , по крайней мере, при  $T_e \leq 1$  кэВ. Зондирование двумя сортами атомов представляет интерес и с точки зрения исследования диамагнетизма плазмы, поскольку позволяет различить вклад в азимутальное смещение  $\Delta \theta$  от электрического потенциала и от изменения магнитного поля.

Авторы благодарят А.В.Киселева и В.Е.Фетисова за помощь в работе, а также В.Н.Ротаева, любезно предоставившего авторам набор кремниевых детекторов.

## Л и т е р а т у р а

1. А.И.Кисляков, Л.И.Крупник. "Активная корпускулярная диагностика горячей плазмы". Физика плазмы, т.7, вып.4, стр.866, 1981 г.
2. В.Н.Бочаров, С.Г.Константинов, А.М.Кудрявцев, О.К.Мыскин, В.М.Панасюк, Ф.А.Цельник. "СВИПП - установка для исследования устойчивости и удержания вращающейся плазмы", в печати.
3. Д.К.Весновский, В.А.Кабанник, Э.Д.Литвинова, С.Г.Попов, "Полупроводниковый спектрометр для регистрации вторичных частиц в накопителе". Программа и тезисы докладов XXV Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, стр.421, "Наука", Ленинград, 1975 г.
4. Н.Пульманов. "Солнечные батареи", Радио, № 5, стр.42, 1974.
5. С.Г.Константинов, Ф.А.Цельник. "Измерение электрического поля вращающейся плазмы", Физика плазмы, т.1, № 5, стр.803, 1975 г.
6. В.Н.Бочаров, С.Г.Константинов, А.М.Кудрявцев, О.К.Мыскин, В.М.Панасюк, Ф.А.Цельник. "Защитная плазменная оболочка", в печати.
7. F.Jobes, J.Nosea, "Space potential measurements in the ST-Tokamak", Материалы VI Европейской конференции по УТС и физике плазмы, т.1, стр.199, Москва, 1973.
8. А.М.Кудрявцев, А.Ф.Сорокин. "Метод измерения локальных значений электронной температуры и плотности плазмы", препринт ИИФ СО АН СССР, № 179, 1980 г.
9. В.С.Николаев, И.С.Дмитриев, Л.Н.Фатеева, Я.А.Теплова. "Экспериментальное исследование захвата электрона многозарядными ионами", ЖЭТФ, т.40, вып.4, стр.989, 1961 г.