

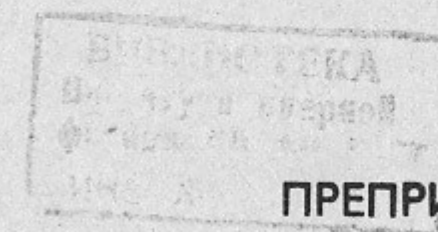
К 88

84

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

А.М.Кудрявцев, А.Ф.Сорокин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВОЙНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПОЛЯ И ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ



ПРЕПРИНТ ИЯФ 79-151

Новосибирск

"ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВОЙНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ"

А.М.Кудрявцев, А.Ф.Сорокин

Предлагаемая методика является развитием метода, используемого для измерения электрического поля E в плазме однократную перезарядку пучка быстрых ионов $/I/$.

Пучок быстрых атомов водорода с током I_0 (плотность n_b) и энергией U_0 (скорость v_0) инжектируется в плазму поперек магнитного поля H_z (рис.1). В окрестности точки 1 с координатой \vec{r}_1 (как, впрочем, и в окрестности любой другой точки вдоль траектории пучка атомов) атом пучка может превратиться в ион из-за перезарядки на ионе плазмы, ионизации электронами плазмы или обдирки на остаточном газе. В современных экспериментах с плазмой концентрация остаточного газа n_0 , по крайней мере, не превышает концентрацию плазмы n_i , т.е. $n_0 \leq n_i$. Поэтому из-за малости сечения обдирки σ_0 по сравнению с сечением перезарядки σ_{i0} и ионизации $\langle \sigma_i \cdot v_e \rangle / v_0$, обдиркой можно пренебречь. Здесь v_e - скорость электронов плазмы, $\langle \rangle$ - усреднение по электронной функции распределения. Далее образовавшийся быстрый ион проходит по криволинейной траектории до точки 2, в окрестности которой он перезаряжается на атомах или молекулах остаточного газа и самого пучка. Вновь образовавшийся при этом быстрый атом вылетает по прямой из объема, занятого плазмой, и попадает в дифференциальный анализатор, имеющий входную апертуру α и поперечный размер d . Величина потока атомов в анализатор определяется очевидной формулой:

$$\delta I_0 = N \cdot K \cdot I_0 \cdot n_i \cdot (n_0 + n_b) \cdot \left(\sigma_{i0} + \frac{\langle \sigma_i \cdot v_e \rangle}{v_0} \right) \cdot \sigma_{i0} \cdot \rho \cdot \alpha \cdot d \quad (1)$$

Здесь ρ - радиус кривизны траектории быстрого иона в окрестности точки 2, K - безразмерный коэффициент, зависящий от поперечного размера пучка и его угловой расходимости β , N - коэффициент, учитывающий возможность многократного прохождения "промежуточного" иона через окрестность точки 2 из-за циклотронного вращения: $N \sim d / (\beta \cdot v_0 \cdot T_c)$ (при $E < \frac{v_0 \cdot \beta \cdot H_z}{c}$).

Здесь T_c - циклотронный период иона.

При наличии в плазме электрического поля $\vec{E} = -\nabla U(r)$ энергия атомов, регистрируемых анализатором, будет отличаться от U_0 на величину $\Delta U = U(r_2) - U(r_1)$.

Таким образом, по величине потока δI_0 и по измеренному сдвигу энергии ΔU можно определять локальные значения $(n_0 + n_b) \cdot n_i$ и E в плазме. Особенно удобно проводить такие измерения в наиболее часто встречающемся случае азимутально-симметричного распределения $U(r)$. Если ориентировать анализатор относительно пучка на угол, близкий к прямому и выбрать $v_0 \gg c E / H_z$, то, поскольку траектория иона между точками 1 и 2 будет близка к дуге окружности, для Δr имеем $\Delta r \approx |r_1| - |r_2| \approx \rho + a - \sqrt{\rho^2 + a^2}$, где a - прицельный параметр наблюдения. При таких измерениях легко определяются координаты r_1 и r_2 и поле $E_r = \Delta U / \Delta r$.

Важным фактором, позволяющим достаточно точно определять величину $\delta I_0 / I_0$, является полнота и простота калибровки этого измерения - калибровка производится на напускаемом в объем газа известной концентрации n_k в отсутствие плазмы в той же геометрии как и сами измерения. Это позволяет по известным величинам σ_0 , σ_{10} и n_k исключить из конечных результатов как все геометрические факторы так и эффективный коэффициент преобразования анализатора $F = \Delta I / \delta I_0$, где ΔI - реально измеряемый выходной ток анализатора.

Проверка метода двойной перезарядки была проведена на установке ПСП-1М /2/ на водородной плазме, инжектируемой в течение 2 мкс вдоль магнитного поля $H_z = 5$ кЭ специальным кольцевым источником. Радиальное электрическое поле E_r создавалось системой из 10 колец, расположенных в обоих торцах установки с равномерно разнесенным по ним потенциалом $U_T = 1.5$ кВ.

Пучок атомов водорода с энергией $U_0 = 2.3$ кэВ, током $I_0 \approx 1.0$ эквив.мА и длительностью 200 мкс инжектировался радиально в центральной плоскости пробкотрона, где внешний радиус плазменной струи составлял 11 см. Дважды перезарядившиеся атомы пучка регистрировались под углом, близким к прямому, с прицельным параметром наблюдения $a = 6$ см. Анализатор

имел апертуру $\alpha \approx 10^{-2}$, диаметр канала $d = 1.5$ см, $F \sim 10^5$ и аппаратную энергетическую ширину ~ 30 эВ /3/. Калибровка системы проводилась на молекулярном водороде при $n_k \approx 10^{13}$ см $^{-3}$ и $U_T = 0$. Измеренный при этом энергетический спектр пучка представлен на рис.2 сплошной линией. Величина выходного тока в максимуме $\Delta I = 2.0$ мкА. Пунктиром на этом же рисунке изображен спектр при наличии плазмы, $U_T = 1.5$ кВ. В этом случае $\Delta I = 1$ мкА. Из этих данных, используя значения $\sigma_0 \approx 7 \cdot 10^{-17}$ см 2 , $\sigma_{10} \approx 3 \cdot 10^{-16}$ см 2 для H_2 и $\sigma_{10} \approx 1.5 \cdot 10^{-15}$ см 2 для H , $\Delta r = 1.5$ см, получаем $(n_0 + n_b) \cdot n_i \sim 2 \cdot 10^{23}$ см $^{-6}$ и $E_r \sim 100$ в/см.

Измеренная магниторазрядным манометром величина n_0 на радиусе $r \approx 20$ см, т.е. вне области, занятой плазмой, составляла $3 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$. Поскольку плазма была холодной, то выгорание газа отсутствовало и можно было оценить величину плотности плазмы: $n_i \sim 10^{12}$ см $^{-3}$.

Рассмотрим теперь возможность использования данного метода в установках с плотной и горячей водородной плазмой ($n_i \sim 10^{14}$ см $^{-3}$, $n_0 \leq 10^9$ см $^{-3}$, $T_e \geq 50$ эВ, $T_i \leq 5$ кэВ, $H_z \geq 10$ кЭ). Поскольку надо обеспечить проникновение диагностирующего пучка в плазму, естественно использовать сравнительно высокоэнергетичный инжектор атомов гелия - например, разработанный в ИЯФ СО АН СССР источник со следующими параметрами: $U_0 \sim 14$ кэВ, $I_0 \sim 0.5$ а, $n_b \sim 10^9$ см $^{-3}$ /4/. Глубина проникновения такого пучка в плазму достаточно велика: $\lambda \sim 50$ см. При выполнении условия $r_b > \rho$, где r_b - радиус пучка, превращение "промежуточного" иона в атом будет происходить, в основном, на атомах самого пучка, т.к. сечение σ_{10}^{He} резонансной перезарядки He^+ на He существенно больше сечения перезарядки на водороде σ_{10}^H : $\sigma_{10}^{He} \sim 5 \cdot 10^{-16}$ см 2 , $\sigma_{10}^H \sim 1 \cdot 10^{-16}$ см 2 /5/. В результате из измерения δI_0 определяется непосредственно n_i , поскольку величина n_b известна. Оценки показывают, что поток атомов в анализатор с $\alpha \sim 10^{-2}$ и $d \sim 1.5$ см будет составлять 10^9 ат/сек (в наших измерениях он был $5 \cdot 10^7$ ат/сек), т.е. имеется большой запас по чувствительности - не меньше двух порядков. Такой запас по чувствительности позволяет промерить зависимость $\delta I_0(n_b) \sim n_b (n_b + \frac{\sigma_{10}^H}{\sigma_{10}^{He}} \cdot n_i)$ и из нее извлечь значение n_0 .

Еще одна возможность определить n_0 появляется, если одновременно с гелиевым пучком использовать слаботочный пучок атомов водорода с $U_0 \sim 100$ кэВ (при этом $\lambda \sim 50$ см /6/), $n_0 \sim 10^7 \text{ см}^{-3} \ll n_i$. С помощью такого пучка определяется произведение $n_0 \cdot n_i$, а с помощью гелиевого - n_i .

В заключение авторы выражают благодарность Ф.А.Цельнику и В.М.Панаскику за помощь в проведении измерений и полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а :

1. В.Н.Бочаров, А.М.Кудрявцев, А.Ф.Сорокин, Ю.Н.Ульянов. *Proceedings of XIII Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases*, p.215, Berlin, 1977.
2. В.Н.Бочаров, С.Г.Константинов, А.М.Кудрявцев, О.К.Мискин, В.М.Панаскик, А.Ф.Сорокин, Ф.А.Цельник. *Физика плазмы*, 4, 488, 1978.
3. А.М.Кудрявцев, А.Ф.Сорокин, Ф.А.Цельник. Доклад на II совещании по диагностике высокотемпературной плазмы, Хпрьков, 1977. А.Ф.Сорокин. Диссертация ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1977.
4. Г.И.Димов, Г.В.Росляков. *Приборы и техника эксперимента*, № 3, 31, 1974.
5. C.F. Barnett et al. *Atomic Data for Controlled Fusion Research*, Oak-Ridge National Laboratory, ORNL-5206, 1977.
6. В.И.Пистунович. *Физика плазмы*, 2, 3, 1976.

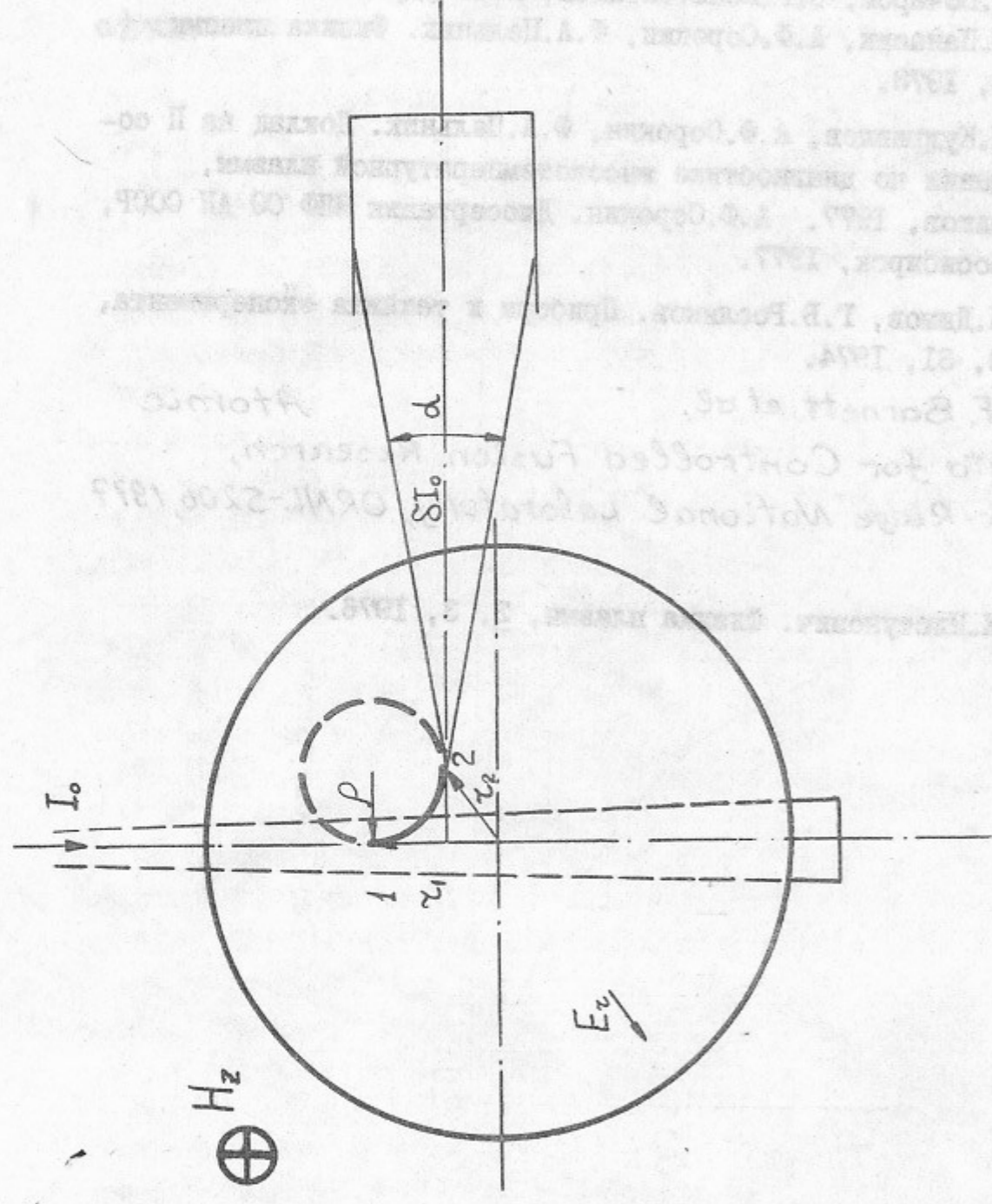


Рис.1. Схема измерения.

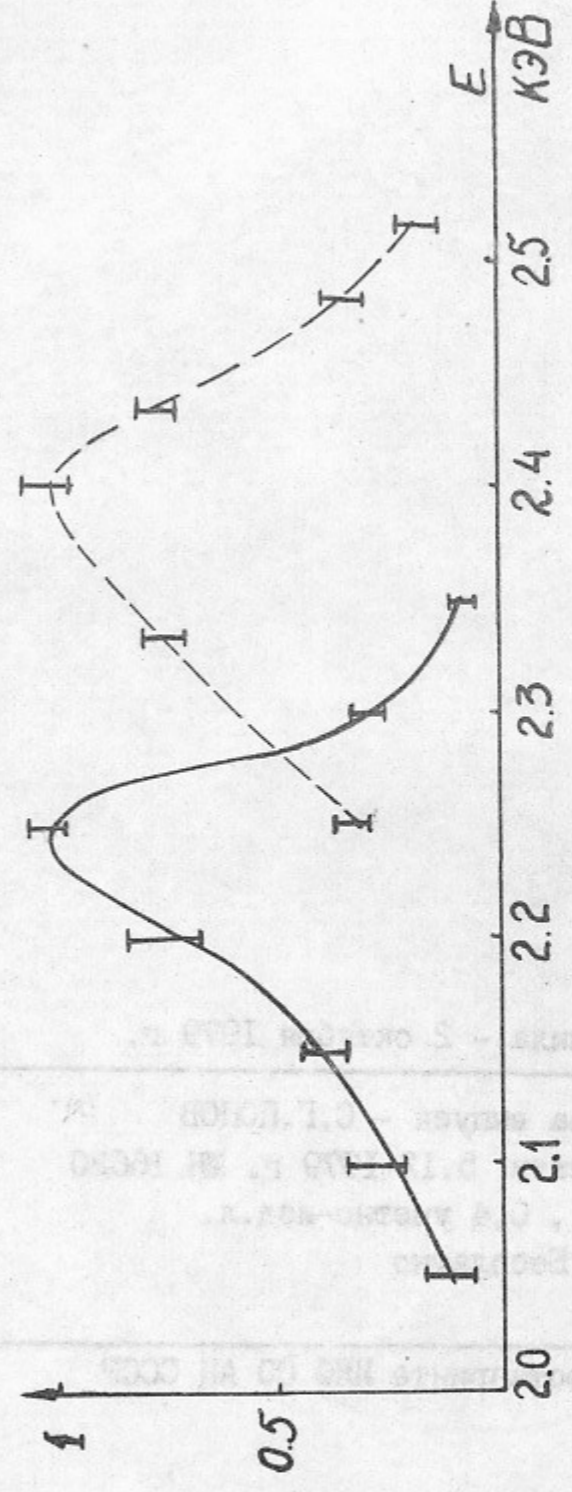
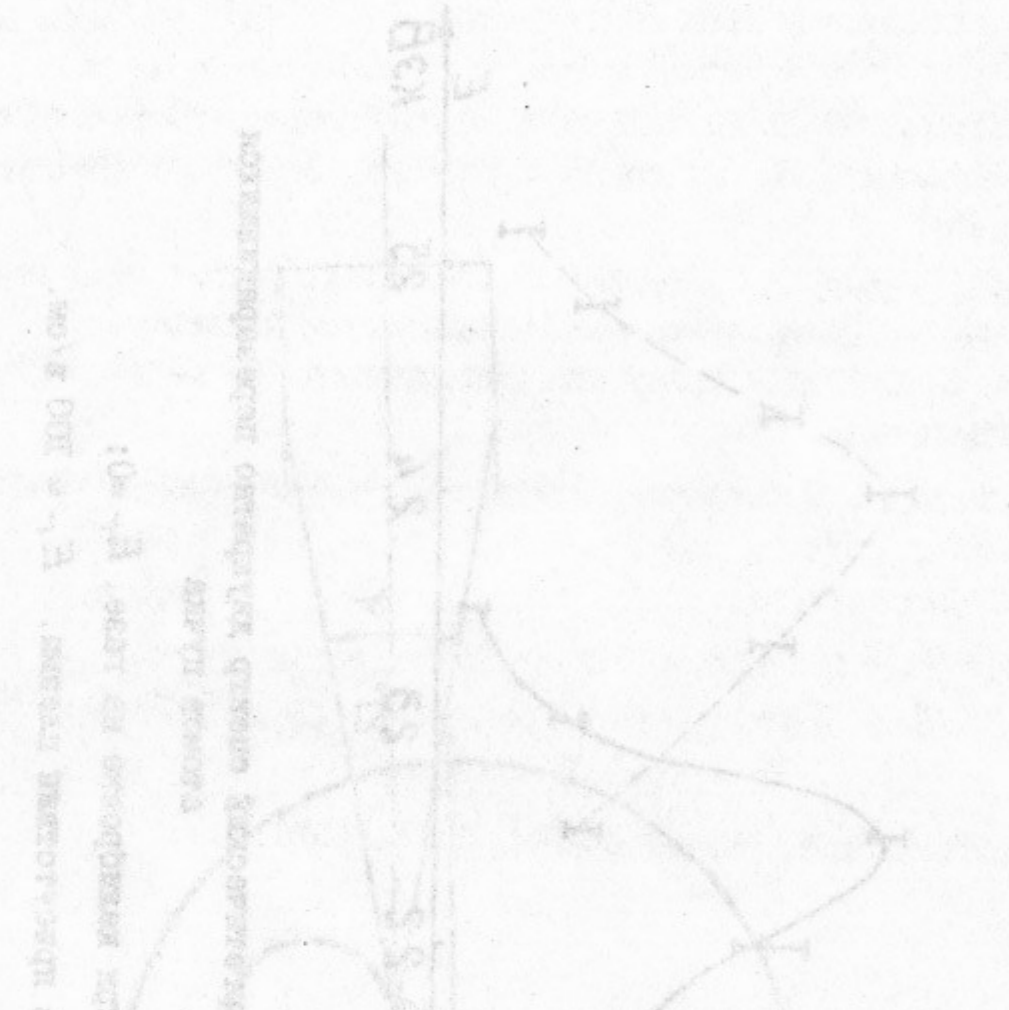


Рис.2. Энергетический спектр двукратно перезарядившихся атомов пучка

— — при калибровке на газе, $E_r = 0$;
 - - - в присутствии плазмы, $E_r = 100$ в/см.



Работа поступила - 2 октября 1979 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
 Подписано к печати 5.12-1979 г. МН 16620
 Усл. 0,5 печ.л., 0,4 учетно-изд.л.
 Тираж 200 экз. Бесплатно
 Заказ № 151.

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР

Рис. 1. Схема конструкции.