

К.88

21

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

А.М.Кудрявцев, А.Ф.Сорокин

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

ПРЕПРИНТ 80-179



Новосибирск

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

А.М.Кудрявцев, А.Ф.Сорокин
(ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск)

Бесконтактные измерения пространственного профиля плотности плазмы $n(r)$ и электронной температуры $T_e(r)$ в настоящее время являются, практически, необходимыми во всех экспериментах, ведущихся на крупных установках.

Наиболее разработаны сейчас интегральные способы измерения $n(r)$: хордовая интерферометрия /1/, многоканальное хордовое зондирование атомными пучками /2/. Профили $T_e(r)$ измеряются методом Томсоновского рассеяния. Однако развитие техники сильноточных источников быстрых атомов и методов регистрации малых потоков быстрых частиц позволяет в настоящее время переходить от интегрального хордового зондирования атомарными пучками к локальному. Кинематическая схема такого измерения показана на рис.1. Пучок быстрых атомов A^0 вводится в плазму поперек магнитного поля. В объеме, занятом плазмой, часть этих атомов превращается в ионы A^+ из-за перезарядки на ионах плазмы или из-за ионизации электронами. Ионы A^+ , заворачиваясь магнитным полем, попадают на коллекторы мишени - детектора, расположенные вне плазмы. При известных значениях энергии атома A^0 и величины магнитного поля H координата точки изменения заряда определяется однозначно. Ток ионов A^+ , попавших на коллектор номер K , определяется формулой:

$$I^K = j_A \cdot S \cdot \Delta l \cdot n(r_K) \cdot \left\{ \langle \sigma_n (\vec{V}_A - \vec{v}_i) \cdot \frac{|\vec{V}_A - \vec{v}_i|}{V_A} \rangle + \langle \sigma_i (\vec{V}_A - \vec{v}_e) \cdot \frac{|\vec{V}_A - \vec{v}_e|}{V_A} \rangle \right\} \quad (I)$$

В случае $v_e \gg v_A \gg v_i$

$$I^K \approx j_A \cdot S \cdot \Delta l \cdot n(r_K) \cdot \left\{ \sigma_n(v_A) + \frac{\langle \sigma_i \cdot v_e \rangle}{v_A} \right\} \quad (I^a)$$

Здесь j_A - плотность тока пучка атомов, S - площадь сечения пучка, попадающего на K -й коллектор, Δl - длина отрезка траектории, с которого ионы попадают на K -й коллектор, V_A - скорость атомов пучка, V_e , V_i - скорости электронов и ионов плазмы, σ_n - сечение перезарядки, σ_e - сечение ионизации атомов A электронами.

Если подобрать сорт атомов и их скорость так, чтобы выполнялось неравенство $\sigma_n \gg \langle \sigma_i \cdot V_e \rangle / V_A$, то из (1^а) можно определить $n(r)$. С другой стороны, зная $n(r)$ и выбрав атомы и их скорость так, чтобы $\sigma_n \ll \langle \sigma_i \cdot V_e \rangle / V_A$, можно определить пространственный профиль величины $\langle \sigma_i \cdot V_e \rangle$, т.е. профиль средней энергии электронов. Хорошо известной парой для измерений такого типа в водородной плазме являются быстрые пучки атомов Ho и Ar . Мы провели расчеты для выявления других возможных пар, результаты этих расчетов сведены в таблицу.

Таблица I

Атомные пучки		Энергия пучков (кэВ)		Область измерения (э-в)	
1	2	1	2	$T_{e \min}$	$T_{e \max}$
Ar	H^0	10	10	4	100
He	H^0	8	10	6	140
Ne	H^0	10	10	6	120
Xe	H^0	13	10	6	50
Ar	Xe	20	25	10	40

Следует обратить внимание на последнюю строку таблицы - пару $Ar-Xe$ можно применять в случае больших магнитных полей и поперечных размеров плазмы для локальной диагностики.

На рис. 2 и 3 приведены расчетные зависимости $\langle \sigma_i \cdot V_e \rangle$ от T_e для плазмы с максвелловским распределением электронов и $(\sigma_n \cdot V_i)$ от E_i , E_i - энергия ионов водорода. Значения сечений $\sigma_i(V_e)$ и $\sigma_n(V_i)$ брались из работ /3-6/ (значения $\sigma_n(V_i)$ используются при работе с пучками тяжелых атомов, имеющих $V_A < V_i$).

Предлагаемая методика использовалась нами для измерения профиля плотности $n(r)$ водородной импульсной плазменной струи (длительность импульса 2 мсек), инжектируемой вдоль магнитного поля $H = 2$ кЭ. Схема эксперимента показана на рис. I.

Пучок быстрых атомов водорода создается с помощью диагностирующего источника типа "ДИНА" /7/, энергия атомов 12 кэВ, плотность тока $10 \frac{\text{эквив.мА}}{\text{см}^2}$, длительность импульса 200 мксек. Образовавшиеся в результате перезарядки 12-кэВные ионы регистрировались 9-коллекторным анализатором, защищенным от фоновых потоков из плазмы экранами и сетками. Размер отдельного коллектора $0,5 \times 2 \text{ см}^2$ выбран так, чтобы, с одной стороны, обеспечить пространственное разрешение 1 см, а с другой стороны, обеспечить при $n \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $H = 2$ кЭ ток ионов I^k на уровне нескольких микроампер (см. формулу 1^в). Схема регистрации сигналов с коллекторов состоит из конденсаторов, "запоминающих" заряд, пришедший на данный коллектор в течение импульса, ключей, открывающих "память" на время импульса, электронного коммутатора, последовательно опрашивающего конденсаторы памяти после импульса, и осциллографа, на экране которого фиксируется результирующая гистограмма, пропорциональная $n(r_k) / |8|$.

Методом ослабления пучка нейтральных атомов одновременно измерялась и величина $\Delta I \propto \int n(r) dr$. Величина ΔI измерялась следующим образом: в отсутствие плазмы сигнал с реперной сетки выравнивался с сигналом с мишени 1 ($I^k \cdot R_1 = I_0 \cdot R_0$, R_1, R_0 - измерительные сопротивления в цепях реперной сетки и мишени 1 соответственно). Схемное вычитание этих сигналов обеспечивало сравнительно точное измерение ΔI : $(\Delta I / I_0)_{\min} \approx 2\%$. Для уменьшения влияния на точность измерений сигнала, связанного с потоками частиц и фотонов из плазмы $I_{\text{фона}}$, $I_{\text{фона}} / I_0 \approx 2\%$, сигнал с дополнительной мишени 2 вычитался из сигнала с мишени 1. В результате величину $(I_{1\phi} - I_{2\phi}) / I_0$ можно было довести до $\sim 0,2\%$.

Калибровка измерительной системы производилась по обдирке атомов пучка на молекулярном водороде, напускаемом в объем в отсутствие плазмы. Поскольку σ_0 - сечение обдирки Ho на H_2 - хорошо известно ($\sigma_0 \approx 0,7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$), а n_{H_2} - концентрация H_2 - легко измеряется, после калибровки можно проводить не только относительные измерения $n(r)$, но и абсолютные:

$$n(r_k) = n_{H_2} \cdot \frac{U^k}{U_{H_2}} \cdot \frac{\sigma_0(V_A)}{\sigma_n(V_A)} \quad (2)$$

где U^k , U_{H_2} - амплитуды сигналов с k -го коллектора при перезарядке пучка на плазме и при калибровке, соответственно. Разумеется, U^k и U_{H_2} измеряются при одинаковой величине магнитного поля, энергии пучка атомов и его плотности.

Определение координаты точки перезарядки или обдирки производится с помощью расчетных траекторий ионов, попадающих на коллектор K . Погрешность в определении r_k связана с конечной шириной пучка и коллектора, угловым и энергетическим разбросом пучка, и равна в нашем случае ~ 1 см.

Результат измерения $n(r)$ представлен на рис.4. Концентрация остаточного газа в момент измерения мала $n_{H_2} \sim 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ - поэтому фоновый сигнал, связанный с обдиркой атомов диагностирующего пучка на остаточном газе, отсутствует.

К сожалению, электронная температура в струе оказалась очень низкой - $T_e < 2 \text{ э-в}$ -, что не позволило нам провести измерения $\langle \sigma_i \cdot v_e \rangle$.

Л и т е р а т у р а :

- 1 - В.Е.Голант, "Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы", М., 1968 г.
Н.И.Малых, Е.П.Горбунов, Е.С.Ямпольский, доклад на II совещании по диагностике высокотемпературной плазмы, Харьков, 1977 г.
- 2 - В.В.Афросимов, Е.А.Березовский, А.И.Кисляков, доклад на II совещании по диагностике высокотемпературной плазмы, Харьков, 1977 г.
- 3 - L.J. Kleffner, G.H. Dunn, "Rev. Mod. Phys.", v. 38, N1, 1, 1966.
- 4 - D.W. Koopman, "Phys. Rev.", v. 154, N1, 83, 1967.
- 5 - W.L. Fite et al, "Phys. Rev.", v. 119, N2, 663, 1960.
- 6 - F.C. Joves, I.C. Hosea, Материалы VI конференции по УТС, т.1, Москва, 1973.
- 7 - Г.И.Димов, Г.В.Росляков, В.Я.Савкин, ПТЭ, № 4, 29, 1977.
- 8 - Л.Л.Данилов, П.М.Иванов, Э.А.Купер, А.В.Леденев и др. "Труды I Всесоюзного совещания по автоматизации научных исследований в ядерной физике" Киев, стр.219, 1976 г.

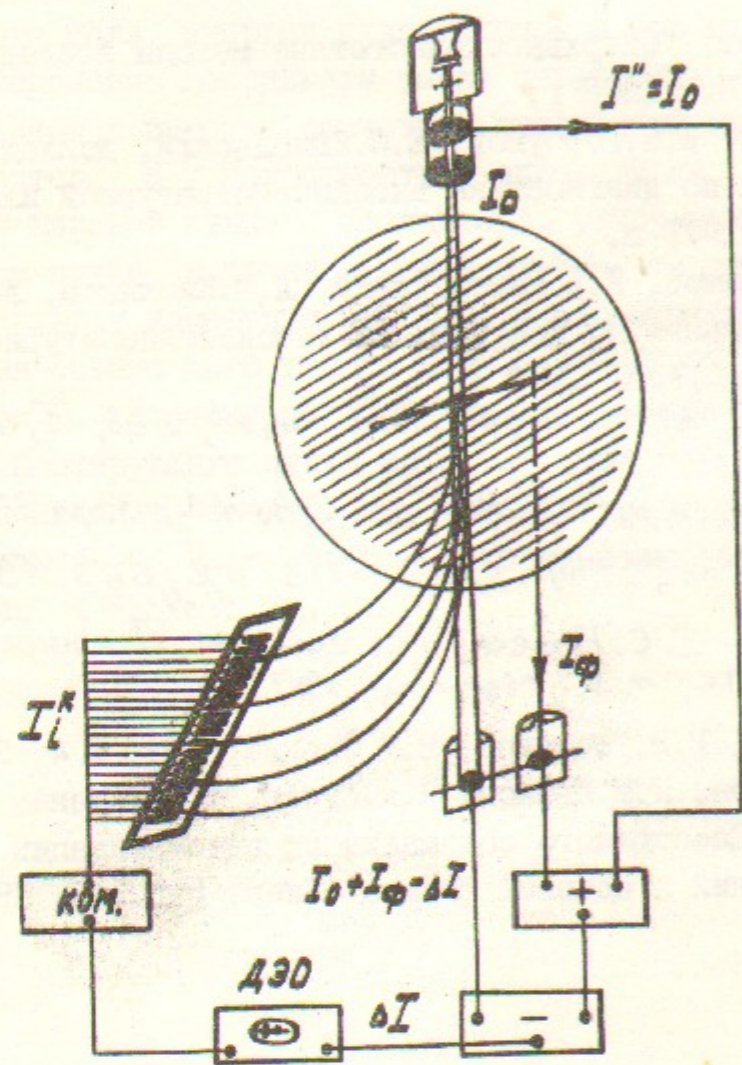


Рис.1 Кинематическая схема измерений.

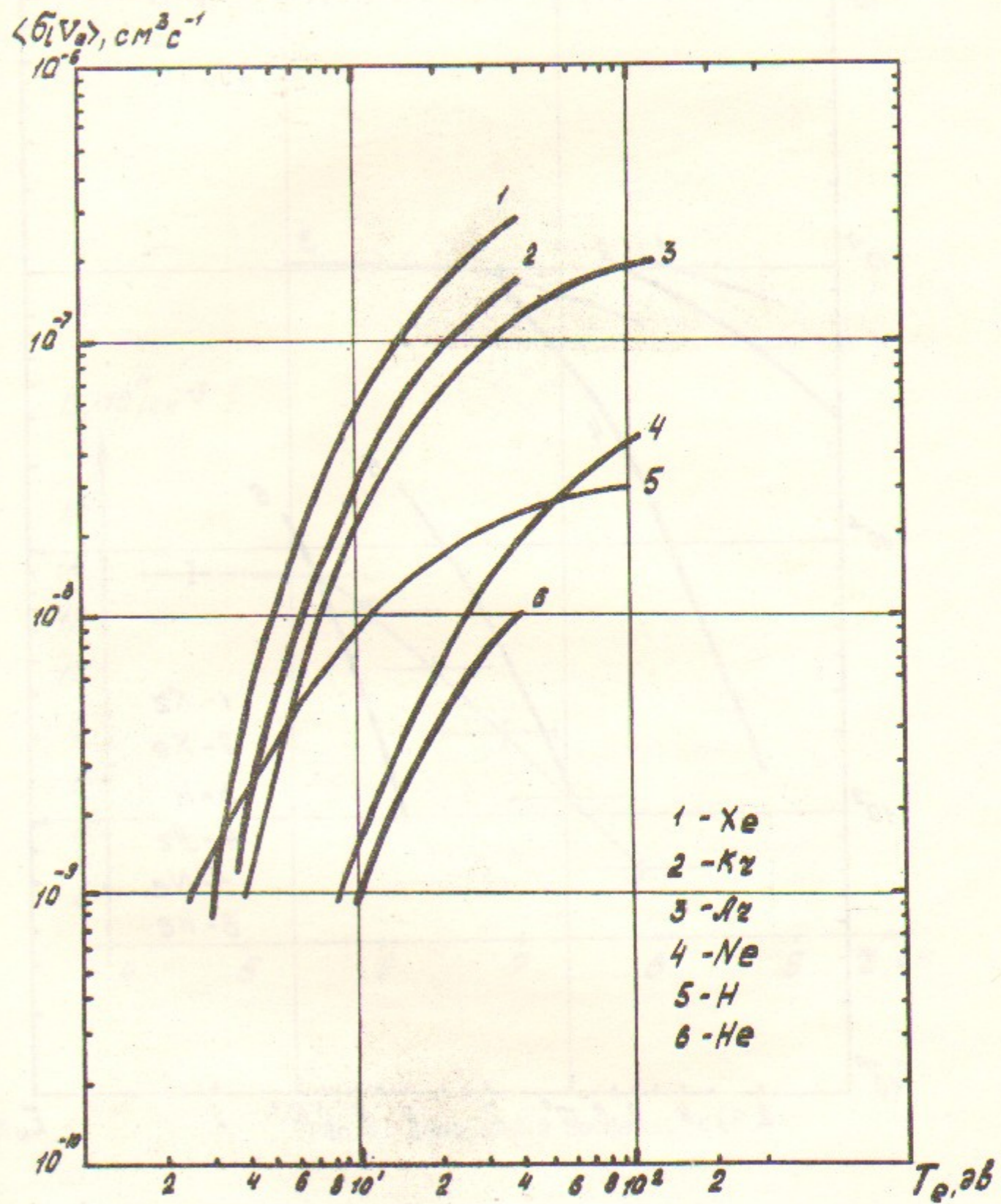


Рис.2 $\langle \bar{v}_e \rangle$ от T_e для разных атомов.

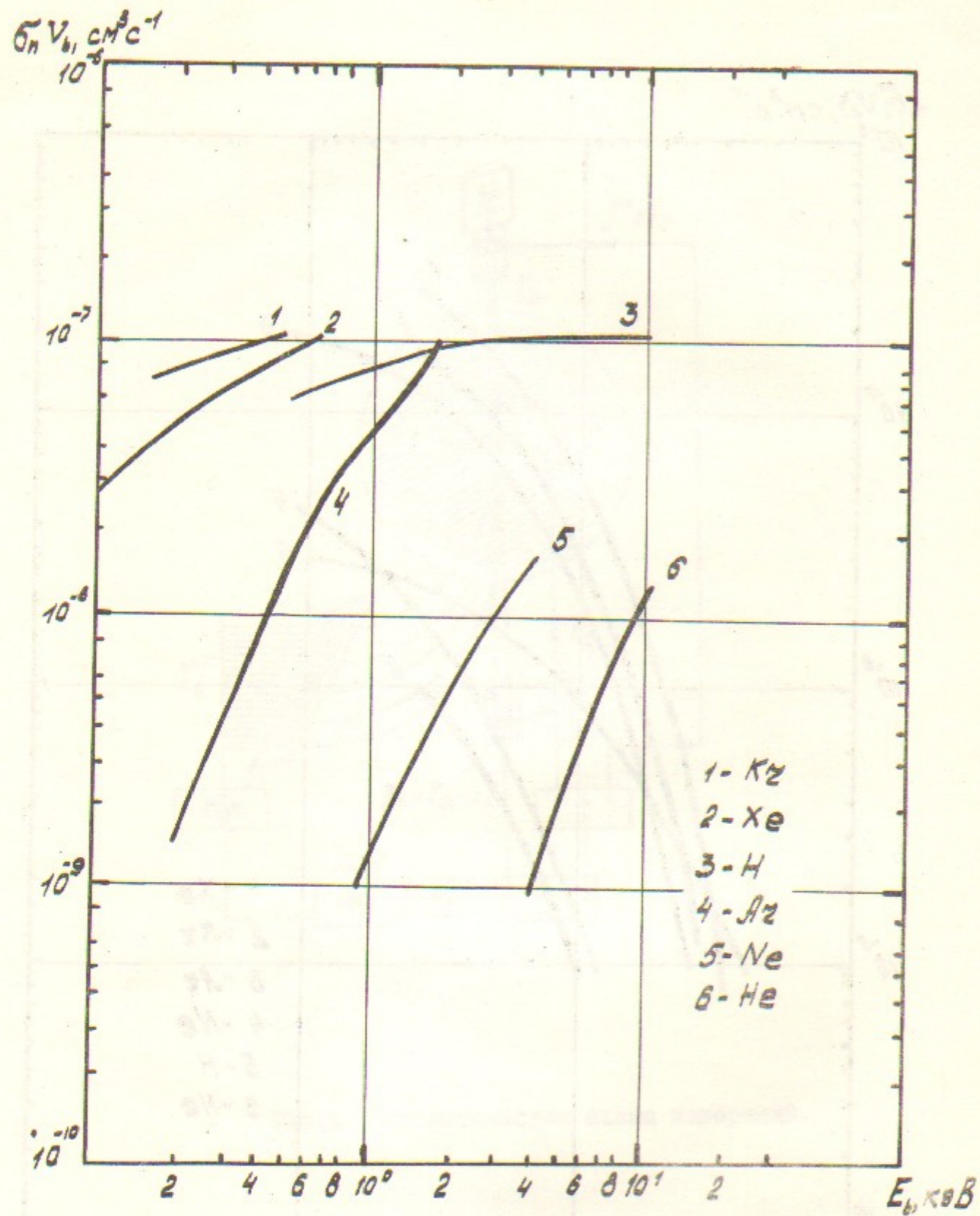


Рис.3 $(\sigma_n \cdot V_i)$ от E_i

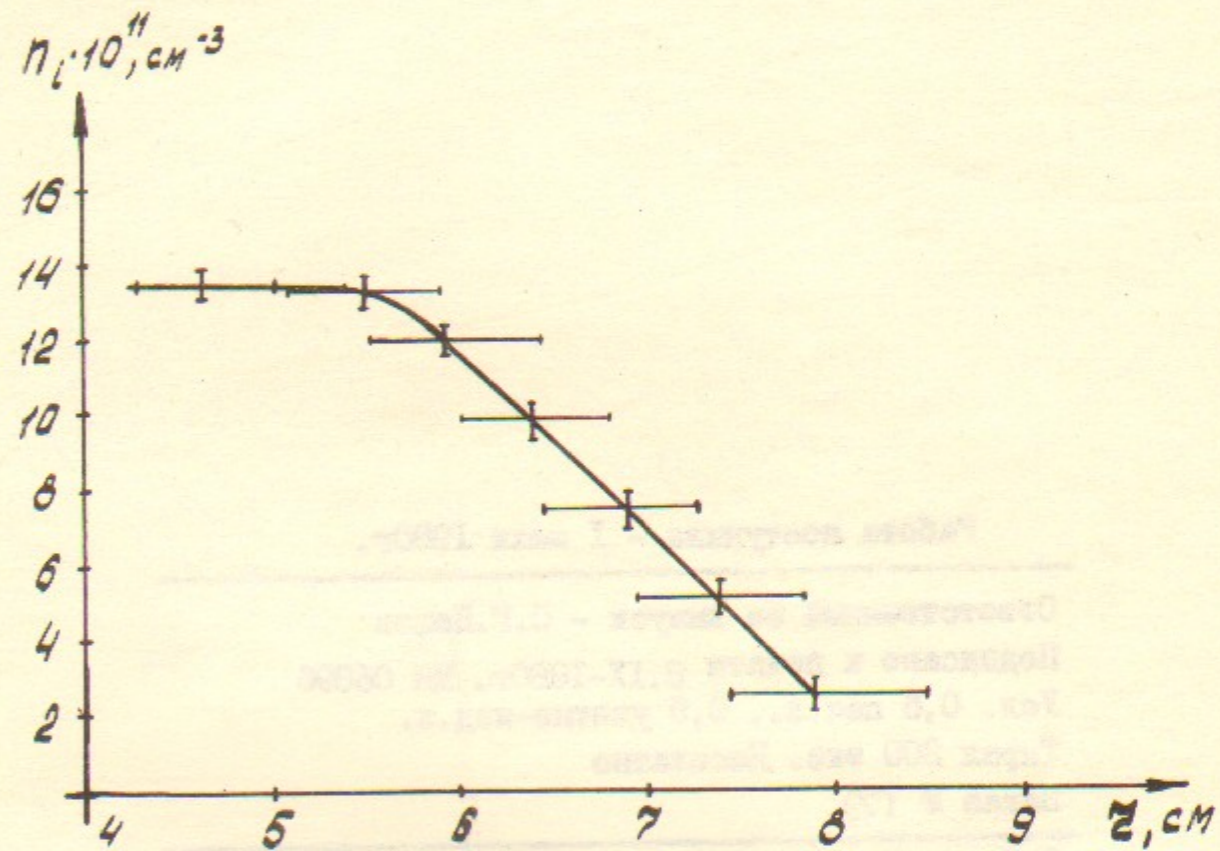


Рис.4 Измеренный профиль $n(r)$