

Министерство образования Российской Федерации

Новосибирский Государственный Университет

Физический факультет

Кафедра Физики Плазмы

Квалификационная работа на соискание степени бакалавра

**МНОГОХОРДОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ
АМБАЛ-М ПУЧКАМИ БЫСТРЫХ АТОМОВ**

Парахин Илья Константинович

Научный руководитель

Беспамятнов И.О., аспирант

Новосибирск – 2003

Оглавление

Введение	3
1. Схема эксперимента.....	5
1.1. Амбал-М	5
1.2. Диагностический комплекс.....	6
1.3. ДИНА	7
1.4. Электромагнитная линза	7
1.5. Камера перезарядки.....	7
1.6. Вторично-эмиссионные датчики.....	8
1.7. Описание эксперимента	8
2. Методика эксперимента.....	10
2.1. Ослабление пучка.....	10
2.2. Обработка данных.....	11
3. Результаты экспериментов.....	13
Выводы	16
Список литературы.....	17

Введение

Активная корпускулярная диагностика является распространенным методом исследования плазмы. Диагностика основана на взаимодействии пучка нейтральных атомов с плазмой и изучении результатов этого взаимодействия. Основными достоинствами этого метода являются бесконтактность и локальность измерений. Перечислим несколько наиболее известных методик активной корпускулярной диагностики, как, например: энергетический анализ атомов перезарядки пучка, CHERS (спектроскопия излучения атомов перезарядки) и MSE (спектроскопия эффекта Штарка), многохордовое зондирование плазмы пучками быстрых атомов и измерение ионной температуры плазмы методом Резерфордского рассеяния быстрых атомов [1]. Одним из наиболее простых и доступных методов измерения параметров плазмы является метод многохордового зондирования.

В институте ядерной физики имени Будкера группой Иванов-Кабанцев-Росляков [2] была описана схема многохордового зондирования плазмы пучком быстрых атомов водорода для определения радиального профиля плотности плазмы установки АМБАЛ. По той же методике изучали радиальный профиль плазмы на установке ТМХ-У [3].

Одной из основных задач при постановке эксперимента по многохордовому зондированию плазмы является выбор определенных условий, таких, при которых ослабление пучка происходит в основном за счет одного определенного процесса. Как, например, для определения плотности плазмы инжестируются пучки атомов водорода с энергией от трех до двадцати килоэлектронвольт. В этом случае основным процессом, приводящим к ослаблению пучка, является резонансная перезарядка. Как известно, сечение резонансной перезарядки составляет более девяноста процентов от общего сечения ослабления пучка и это сечение практически не зависит от температуры плазмы. Для определения температуры электронов используются пучки атомов инертных газов. Для них основным процессом, приводящим к ослаблению пучка, является ионизация электронным ударом. Сечение ионизации электронным ударом превосходит сечение ионизации протонным ударом и сечение перезарядки более чем на порядок. Так для аргонового пучка с энергией 10 кэВ и температуры электронов 50 эВ сечение ионизации электронным ударом составляет 93 процента от общего сечения ослабления пучка [4]. В результате данные, полученные из экспериментов по ослаблению пучков водорода и аргона, позволяют получить профиль электронной температуры.

По причине локальности и бесконтактности методика активной корпускулярной диагностики получила значительное распространение для целей диагностики плазмы.

В 1955 году группой под руководством Фогеля Я.М. была измерена толщина сверхзвуковой струи пара. Была использована диагностика по ослаблению электронного пучка [5]. А в 1973 году А.И.Кисляков и М.П.Петров применили активную корпускулярную диагностику для определения плотности водородной плазмы токамака ТМ-3 [6]. В 1984 году на установке ТМХ-У методом многохордового зондирования по ослаблению пучка водорода был получен радиальный профиль плотности плазмы [2]. Данная методика активной корпускулярной диагностики также успешно применялась на установках АМБАЛ-Ю и АМБАЛ-М для определения радиального профиля плотности и электронной температуры плазмы [7].

1. Схема эксперимента

1.1. Амбал-М

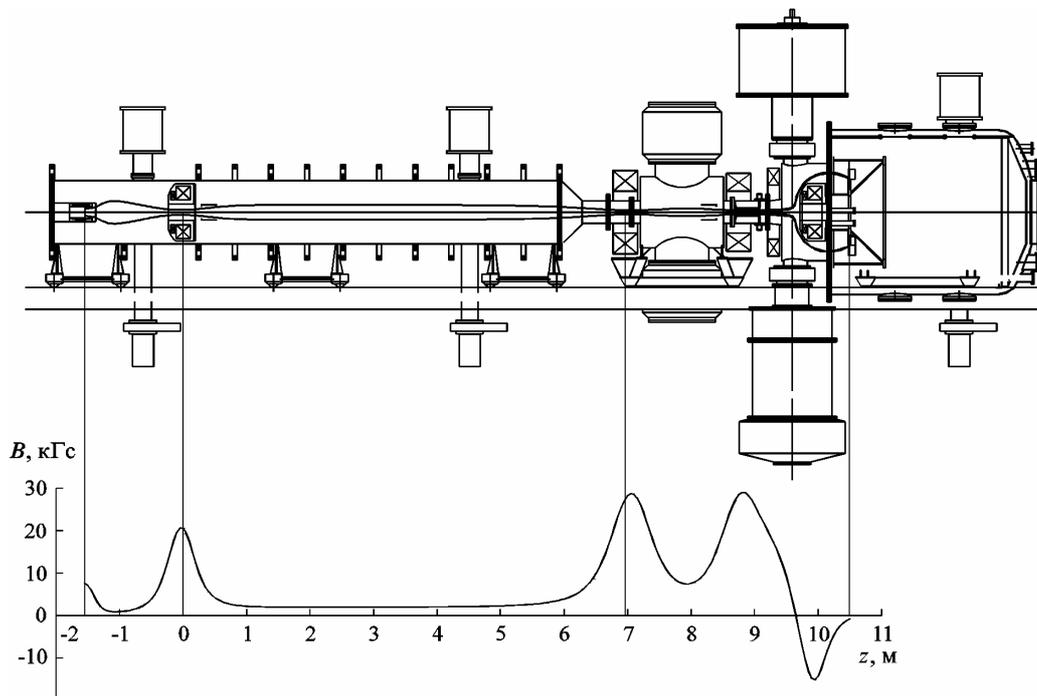


Рис. 1. Схема установки АМБАЛ-М и конфигурация магнитного поля.

Амбал-М (рис. 1)- экспериментальная установка для исследования физики удержания горячей плотной плазмы в амбиполярной ловушке открытого типа с полностью аксиально-симметричным магнитным полем. Характерные параметры плазмы, полученной на установке: температура электронов около 50 эв, температура ионов порядка 200 эв, плотность $1-2 \cdot 10^{13}$. В настоящее время на установке проводятся эксперименты по газовой накачке стартовой плазмы и увеличению параметра β . В ходе экспериментов потребовалось подтверждение данных зондовых измерений профиля электронной температуры, для чего было предложено использовать комплекс активной корпускулярной диагностики.

1.2. Диагностический комплекс

Основные части диагностического комплекса:

1. ДИНА
2. Электромагнитная линза
3. Камера перезарядки
4. Вторично эмиссионные датчики

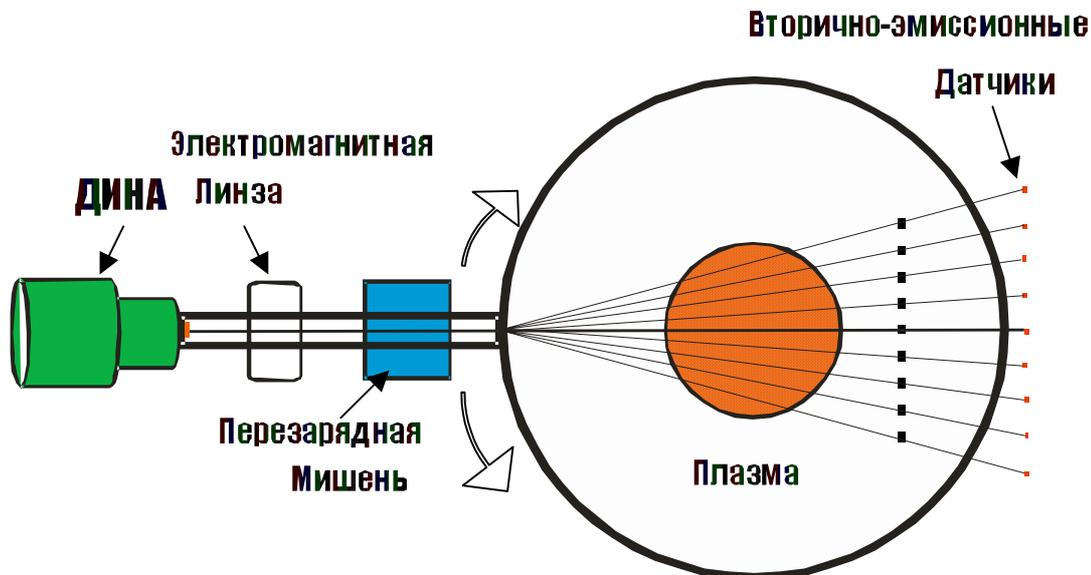


Рис. 2. Блок-схема эксперимента.

Эксперимент основан на исследовании атомарного пучка полученного с помощью диагностического инжектора нейтральных атомов (ДИНА). Инжектируемый ионный пучок, проходя через электромагнитную линзу, фокусируется, и попадает на перезарядную мишень (рис. 2). На перезарядной мишени большая часть ионов (75%) перезаряжается в атомы. Попадая в камеру установки, пучок атомов проходит через плазму и ослабляется. Ослабленный пучок регистрируется девятью вторично-эмиссионными датчиками. Поворотный механизм позволяет инжектировать пучок диагностического инжектора в направлении любого из датчиков. Серия экспериментов позволяет, на основании ослабления пучка атомов по различным хордам, получить радиальный профиль плотности и электронной температуры. Комплекс позволяет измерять электронную температуру плазмы в центральной части соленоида на расстоянии 6м от пушки.

1.3. ДИНА

Одной из основных частей комплекса является Диагностический Инжектор Нейтральных Атомов (ДИНА-4А), позволяющий получить пучки атомов водорода и аргона со следующими параметрами:

Энергия пучка - 11 кэВ

Полный ток пучка атомов водорода ~1-1.5 А

Полный ток пучка атомов аргона ~0.2-0.3 А

1.4. Электромагнитная линза

Электромагнитная линза представляет собой рамку с током, помещенную в пермалоевый экран для изоляции от внешнего магнитного поля. Ток в рамку подается по синусоидальному закону с периодом двадцать миллисекунд. Электромагнитная линза используется для фокусировки пучка и увеличения плотности тока атомов пришедших на отдельный вторично-эмиссионный датчик.

1.5. Камера перезарядки

Перезарядной камерой является труба, длиной 300мм, диаметром 40мм. С помощью импульсного клапана в трубку напускается газ, на котором происходит перезарядка ионов пучка в атомы. Существует два режима перезарядки: на собственном газе и на подаваемом газе. Для перезарядки ионов водорода в атомы в перезарядную камеру подавался водород. Для перезарядки ионов аргона - аргон. Для каждого из газов был найден соответствующий режим работы газового клапана и достигнут оптимальный выход атомов пучка. Все ионы пучка отклоняются сильным магнитным полем установки и не попадают на вторично-эмиссионные датчики.

1.6. Вторично-эмиссионные датчики

Для регистрации тока пучка используются 9 вторично-эмиссионных датчиков (ВЭД). На коллектор датчика подается отрицательное напряжение. Атомы, попадая на коллектор, выбивают вторичные электроны, которые, под действием отрицательного напряжения, уходят на земляной экран и не возвращаются на коллектор (рис. 3). В итоге на коллектор приходит положительный ток, пропорциональный количеству пришедших атомов пучка. Также к вторичной эмиссии электронов с коллектора приводят фотоны и атомы перезарядки плазмы. Вторично-эмиссионный ток, поступающий на коллектор, преобразуется в напряжение порядка нескольких вольт и обрабатывается с помощью АЦП. Полученные данные анализируются на компьютере.

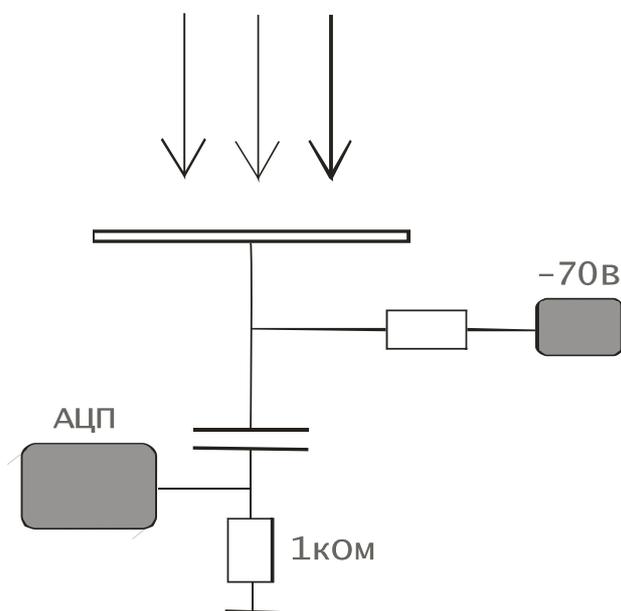


Рис. 3. Схема работы вторично-эмиссионного датчика.

1.7. Описание эксперимента

В ходе работы проводились эксперименты по инъекции атомарных пучков за 2 миллисекунды до начала работы плазменной пушки и через 1.5 миллисекунды после создания плазмы. Из отношения полученных пучков с учетом фона плазмы, описываемого сплайном и вычитаемого из ослабленного пучка, находилось соответствующее данной хорде ослабление. Для определения ослабления по различным хордам инжектор поворачивался в направлении каждого из датчиков.

Длительность импульса инжектора 200 микросекунд. При обработке результатов использовались экспериментальные данные по ослаблению, полученные из центральной области пучка.

Для отладки работы, получения стабильности и хорошей повторяемости пучка проводилась тренировка инжектора от шестиканального ГВИ. При экспериментах с работой плазменной пушки управление инжектора производилось с ЭВМ. Получение достаточной интенсивности пучка требует своевременного включения высокого напряжения, поджига дуги, электромагнитной линзы и перезарядного клапана. Так как включение магнитного поля электромагнитной линзы происходит с задержкой, и зависимость интенсивности поля от времени носит синусоидальный характер, то для получения нужной фокусировки пучка питание на электромагнитную линзу подается строго в определенный момент. Ионы пучка перезаряжаются в атомы на газе перезарядной мишени. Плотность и размеры перезарядной мишени зависят от момента срабатывания клапана, его диаметра, и подаваемого на него давления. Мишень должна быть достаточно толстой для того, чтобы большая часть ионов пучка перезаряжалась в нейтральные атомы и достаточно тонкой, чтобы пучок не сильно на ней ослаблялся. В итоге для хорошей повторяемости работы инжектора были выбраны такие настройки включения клапана, при которых на перезарядной мишени перезаряжается в нейтральные атомы порядка 75% ионов пучка.

Подробно рассмотрим работу диагностического инжектора. Для оптимальной работы были выбраны следующие времена включения отдельных элементов источника. Для удобства, временем появления пучка будем считать время запуска схемы поджига дуги в источнике. Включение тока дуги в инжекторе осуществляется за 10 микросекунд до момента запуска поджига. Высокое напряжение подается на вытягивающую сетку за 20 микросекунд до момента запуска поджига. Ток в цепь электромагнитной линзы подается за 3 миллисекунды до начала инъекции пучка. Для перезарядки аргонового пучка клапан перезарядки включается за 1200 микросекунд до начала инъекции пучка, для водородного пучка за 300 микросекунд. Газ в инжектор подается за 900 микросекунд до момента запуска поджига дуги.

2. Методика эксперимента

2.1. Ослабление пучка

Ослабление пучка, проходящего через плазму, происходит по закону

$$I = I_0 \exp\left(-\int \sigma_{eff} \cdot n \cdot dl\right)$$

где I - интенсивность начального пучка, I_0 - интенсивность пучка, прошедшего через плазму, а $\sigma_{eff} = \sigma_{ii} + \sigma_{ch} + \frac{\langle \sigma_{ie} \cdot v_e \rangle}{v_b}$ сумма сечений всех процессов, приводящих к выбыванию частиц из пучка (ионизация электронным σ_{ie} и ионным σ_{ii} ударами, резонансная перезарядка σ_{ch}). Параметры диагностического пучка выбирают так, чтобы пучок не слишком сильно и не слишком слабо ослаблялся. Кроме того, важно, чтобы пучок был виден на фоне свечения плазмы – следовательно, нужна достаточная интенсивность пучка.

Важно выбрать такие пучки, чтобы выбывание атомов было связано преимущественно с одним процессом. По данной методике для измерения электронной температуры требуется знать линейную плотность $\int n \cdot dl$ и интегральное сечение ионизации электронным ударом $\int n \cdot \sigma_{eff} \cdot dl$. Для измерения линейной плотности используется водородный пучок с энергией порядка 10 кэВ. Для водорода основной составляющей эффективного сечения является сечение резонансной перезарядки (рис. 4), которое зависит только от плотности плазмы и практически не зависит от других ее параметров.

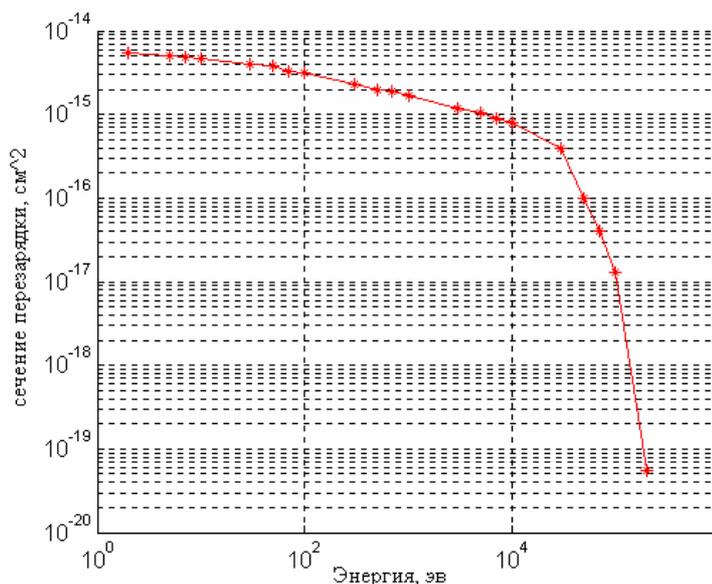


Рис. 4. Зависимость сечения резонансной перезарядки от энергии пучка.

Сечение резонансной перезарядки можно вынести из-под знака интеграла, и мы получаем линейную плотность $\int n \cdot dl = -\frac{1}{\sigma_{eff}} \cdot \ln(J/J_0)$.

Так как скорость атомов пучка инертного газа значительно меньше скорости электронов плазмы, то сечение ионизации электронным ударом преобразуется к виду

$$\frac{\langle \sigma_{ie} \cdot v_e \rangle}{v_b}, \quad \text{где} \quad \langle \sigma_{ie} \cdot v_e \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f_e(v_e) \cdot |v_e - v_b| \cdot \sigma_{ie}(v_e - v_b) \cdot dv_e.$$

Соответственно для

нахождения сечения ионизации электронным ударом используют инертные газы. Из всех инертных газов был выбран аргон, для имеющихся параметров плазмы (T_e около 50 эВ), он подходит лучше всего, так как он ослабляется достаточно сильно, для того чтобы легко регистрировать ослабление. По причине высокой интенсивности ослабленный пучок атомов аргона хорошо выделяется на плазменном фоне. Для диагностики плазмы с более высокими параметрами (газовая накачка или ЭЦР нагрев электронов) целесообразно проводить эксперименты, используя гелиевый пучок.

Для измерения профиля электронной температуры проводятся два отдельных эксперимента по нахождению линейной плотности по ослаблению пучка атомов водорода и интегрального сечения $\langle \sigma \rangle = \int n \cdot \sigma_{eff} \cdot dl$ по ослаблению аргонового пучка вдоль нескольких хорд. В ходе экспериментов, мы получаем зависимость интегрального сечения от прицельного параметра, а, используя информацию о характере плазмы и о зависимости сечения от T_e , можно восстановить радиальный профиль электронной температуры. В эксперименте используется 9 вторично-эмиссионных датчиков, позволяющих проводить измерять ослабление вдоль 9 различных хорд.

2.2. Обработка данных

Для восстановления профиля электронной температуры необходимо знать эффективное сечение как непрерывную функцию от радиуса. Поэтому для дискретного набора хорд требуется проводить интерполяцию данных. Если плазма обладает аксиальной симметрией, то достаточно провести эксперименты с одного ракурса, и далее, сделав абелево преобразование, можно получить радиальный профиль. Однако абелизация относится к так называемым некорректным обратным задачам, что означает, при восстановлении профиля происходит усиление ошибок. Как было показано в [1] пятипроцентная ошибка в исходных данных приводит к пятнадцатипроцентным ошибкам в конечном результате. Для уменьшения влияния

ошибок измерений проводят так называемую процедуру регуляризации, которая использует априорную информацию о профиле. К примеру, профиль плотности может быть аппроксимирован гладкой экспоненциальной $n(r) = n_0 \cdot \exp(-\frac{r^2}{a^2})$ зависимостью. Тогда по результатам хордовых измерений восстанавливаются значения n_0 и a . В предположении, что плотность плазмы ($n(r) = n_0 \cdot \exp(-\frac{r^2}{a^2})$) и эффективное сечение ($\sigma_{eff}(r) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{r^2}{b^2}}$) радиально распределены по гауссу, для интегрального сечения получаем выражение

$$\int n(r) \cdot \sigma_{eff}(r) \cdot dl = \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\frac{a^2 \cdot b^2}{a^2 + b^2}} \cdot n_0 \cdot \sigma_0 \cdot e^{-\frac{x^2}{a^2 + b^2}}$$

Соответственно, вычислив по ослаблению водородного и аргонового пучков по различным хордам параметры n_0 , σ_0 , a , b , можно построить радиальный профиль эффективного сечения $\sigma_{eff}(r)$. А далее, воспользовавшись графиком зависимости сечения ионизации от электронной температуры (рис. 5), получаем радиальное распределение температуры электронов.

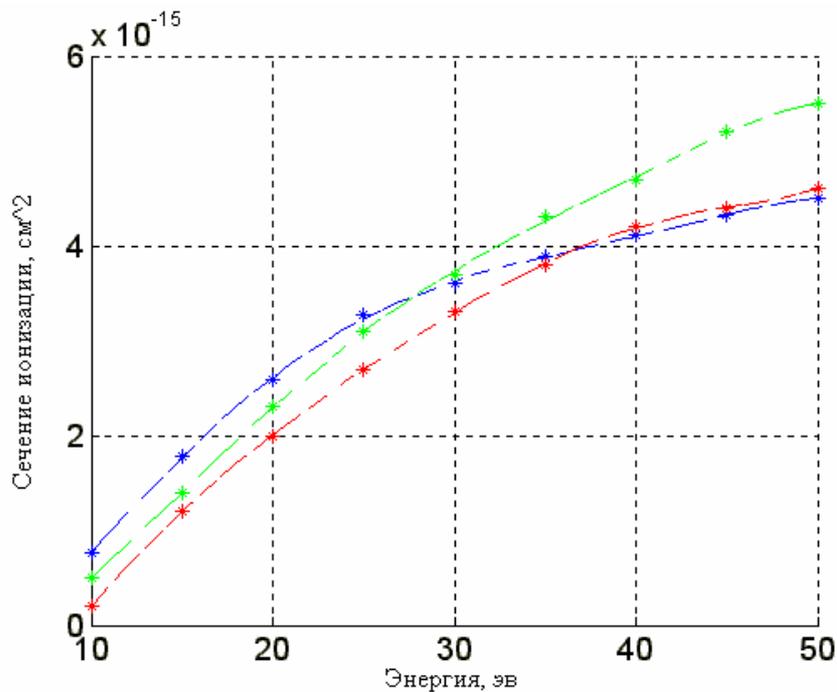


Рис. 5. Зависимость сечения ионизации электронным ударом от температуры электронов плазмы.

3. Результаты экспериментов

В экспериментах использовались атомарные пучки водорода и аргона. Как показал анализ, проведенный с использованием априорной информации о плазме, аргон является наиболее подходящим на данный момент газом. Амплитуда сигнала, поступающего на вторично-эмиссионный датчик от аргонового пучка, в пять раз меньше, чем амплитуда сигнала, поступающего от водородного пучка. Соответственно для АЦП выбран режим работы: для аргона 2 милливольт на точку, для водорода 10 милливольт на точку.

На рисунках представлены осциллограммы сигналов с вторично-эмиссионных датчиков при проведении экспериментов по ослаблению пучков водорода (рис. 6) и аргона (рис. 7). Цифрой I обозначен сигнал пучка, инжектируемого за 2 миллисекунды до создания плазмы, цифрой II – сигнал пучка, инжектируемого во время создания плазмы. На осциллограмме заметен сигнал от вторичной эмиссии за счет атомов перезарядки и фотонов плазмы (III).

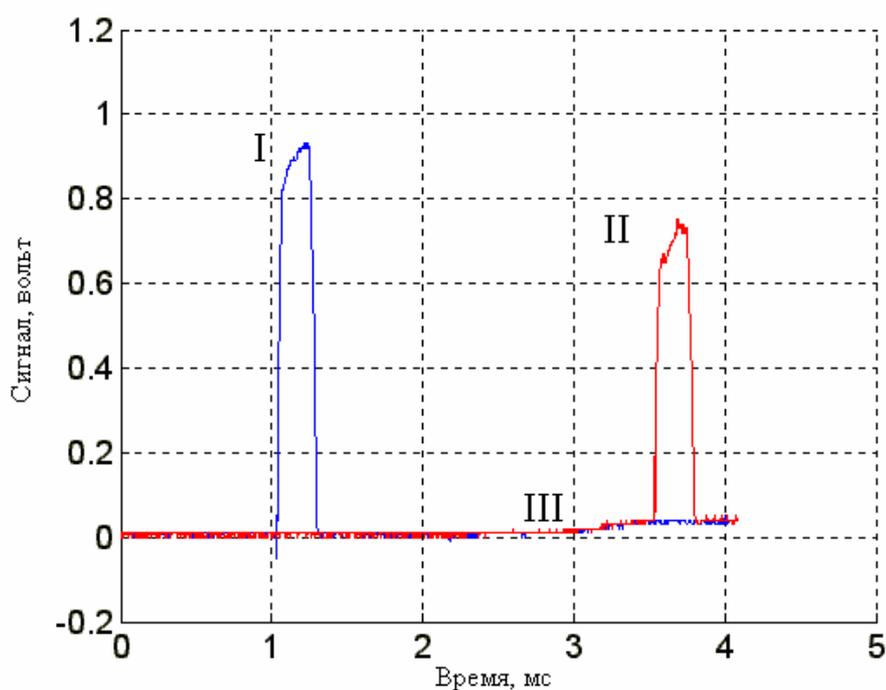


Рис. 6. Сигналы, полученные со вторично-эмиссионных датчиков при инжекции пучков атомов водорода за 2 миллисекунды до создания плазмы (I) и во время создания плазмы (II). III - свечение плазмы.

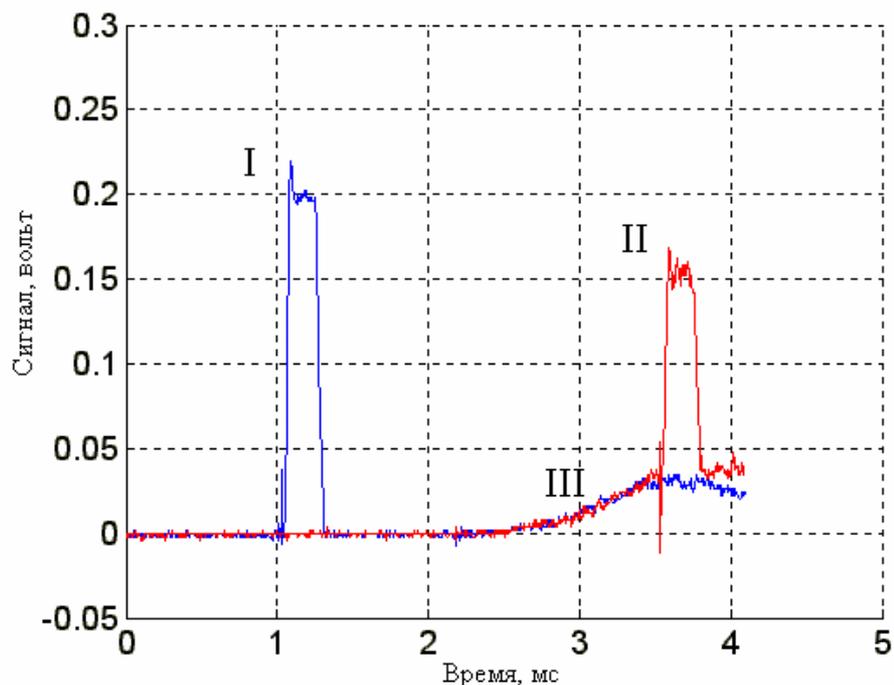


Рис. 7. Сигналы, полученные со вторично-эмиссионных датчиков при инжекции пучков атомов аргона за 2 миллисекунды до создания плазмы (I) и во время создания плазмы (II). III - свечение плазмы.

Ослабление измерялось по отношению интенсивности пучка, инжектируемого до создания плазмы, к пучку, ослабленному на плазме. Для нахождения ослабления сравнивалась центральная 100 микросекундная часть осциллограмм пучков. При сравнении учитывалось свечение плазмы.

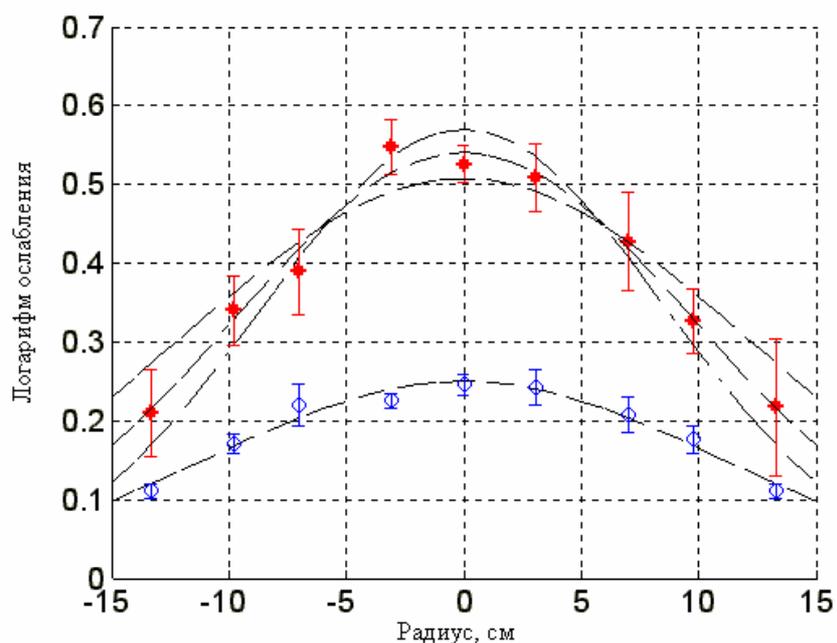


Рис. 8. Логарифм ослабления аргонового (*) и водородного (o) пучков.

На рисунке 8 представлены логарифмы ослабления пучков аргона и водорода. Далее значения ослабления аппроксимировались распределением гаусса с учетом свечения плазмы и статистического веса. Зависимость полученного интегрального сечения ослабления $\frac{\int n \cdot \sigma_{eff} \cdot dl}{\int n \cdot dl}$ от расстояния до центра представлена на рисунке 9.

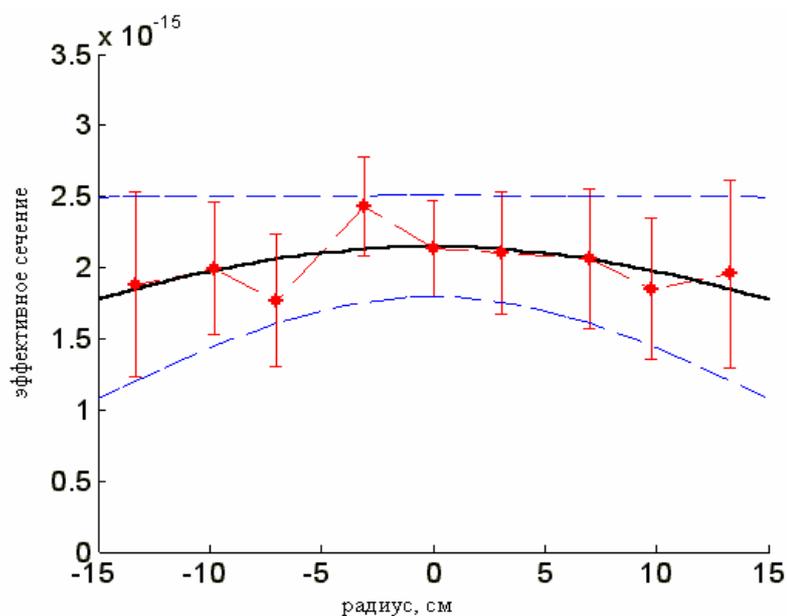


Рис. 9. Интегральное сечение ослабления

Воспользовавшись зависимостью сечения ионизации от температуры (рис. 5) получаем радиальное распределение электронной температуры. На графике также приведены результаты зондовых измерений (рис.10).

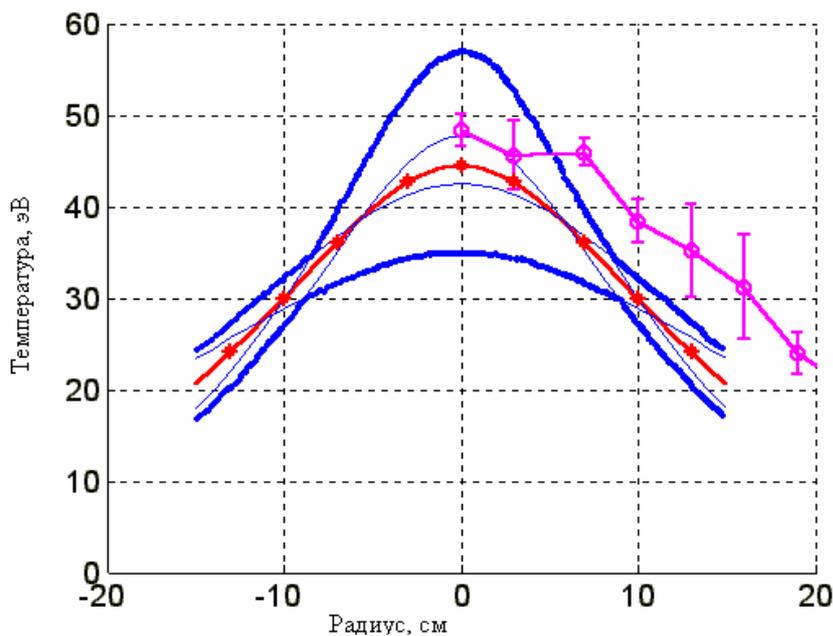


Рис. 10. Зависимость электронной температуры от радиуса. (*)-результат многохордового зондирования, (o) – результат зондовых измерений. Жирная линия очерчивает контур зоны наиболее вероятного расположения профиля электронной температуры.

Выводы

1. Были проведены эксперименты по ослаблению водородного и аргонового пучков на плазме соленоида установки АМБАЛ-М.
2. Предложенная схема многохордового зондирования была успешно опробована для измерения профиля электронной температуры.
3. Полученное значение электронной температуры на оси плазменного шнура находится на уровне 45 ± 9 эВ, что находится в хорошем соответствии с результатами зондовых измерений (около 48 эВ).
4. Результаты эксперимента свидетельствуют о пикировании электронной температуры в центре плазменного шнура, что находится в согласии с зондовыми измерениями.
5. Представленные результаты являются предварительными. Они свидетельствуют о том, что диагностика работает корректно. Планируется дальнейшее применение комплекса активной корпускулярной диагностики для измерения электронной температуры плазмы на установке АМБАЛ-М.

Список литературы

1. В.И.Давыденко, А.А.Иванов, Г.Вайсен. Экспериментальные методы диагностики плазмы. Часть 1. Новосибирск 1999
2. А.А.Иванов, А.А.Кабанцев, Г.В.Росляков. Многохордовое зондирование плазмы пучком быстрых атомов водорода. Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-15 Новосибирск 1983
3. Summary of TMX-U Results: 1984, volume 2. T.C.Simonen, editor. Lawrence Livermore National Laboratory, December 14, 1984
4. T.Kirchner et al. Electronic Exchange Effects in p+Ne and p+Ar collisions. Physical Review Letters, Volume 79, Number 9, p 1658-1661
5. Фогель.Я.М. и др. ЖТФ, т 25,с 1944, 1955
6. Диагностика плазмы под ред. С.Ю.Лукьянова. 1973 г. вып.3. с 275
7. А.А.Иванов, А.А. Кабанцев, Г.В.Росляков, С.Ю.Таскаев. Препринт 86-77, Новосибирск, ИЯФ СО АН СССР, 1986