

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

физический факультет

**Квалификационная работа на соискание
степени магистра**

Кафедра физики плазмы

Трунев Юрий Александрович

**Пассивная корпускулярная диагностика на многопробочной
ловушке ГОЛ-3**

**Научный руководитель: д.ф.-м.н.,
Бурдаков Александр Владимирович
м.н.с ИЯФ СО РАН,
Шошин Андрей Алексеевич**

Новосибирск – 2005 год

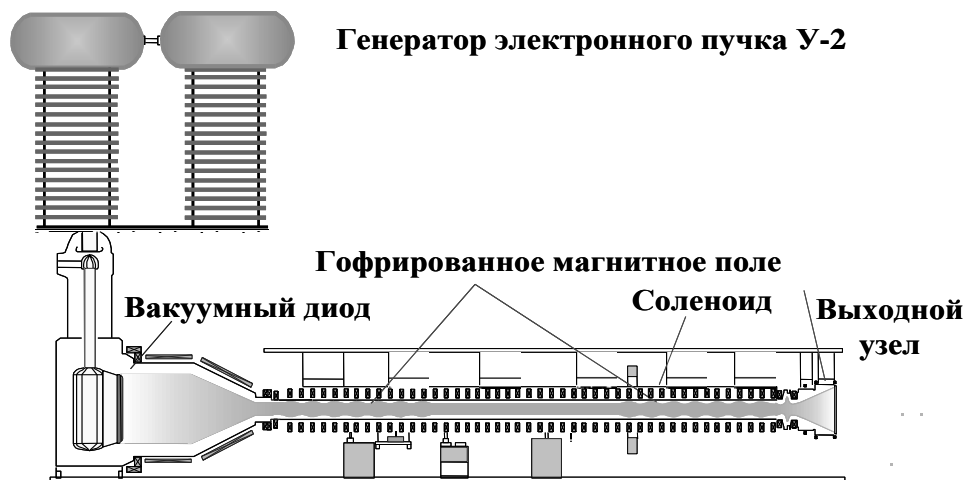
Содержание

Введение.....	3
1. Первые эксперименты по регистрации перезарядных атомов на многопробочной ловушке ГОЛ-3. Постановка задачи.....	7
2. Модернизация пятиканального анализатора нейтральных атомов перезарядки.	11
3. Оценка потока нейтралов из плазмы ГОЛ-3.....	14
Выводы и заключение.....	18
Благодарности	19
Литература	20

Введение

С целью исследования перспектив открытых ловушек как термоядерных реакторов на установке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН) проводятся эксперименты по нагреву и удержанию плотной ($n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) горячей плазмы. Установка ГОЛ-3 – гофрированная открытая ловушка, предназначенная для удержания плотной горячей плазмы. Установка состоит (см.рис.1) из генератора электронного пучка У-2, 12 метрового соленоида и выходного узла, который включает в себя систему создания предплазмы и приемник пучка. Генератор У-2 позволяет получать мощный релятивистский электронный пучок (РЭП) с энергией электронов $\sim 1 \text{ МэВ}$, энергосодержанием до 300 КДж и током $\sim 30 \text{ кА}$. Питание соленоида осуществляется с помощью 15 МДж емкостного накопителя, что позволяет создавать квазистационарное магнитное поле на оси установки: до 5 Тл в однородной части и до 10 Тл в пробках, пробочное отношение одной ячейки (длинной 22 см) в многопробочной конфигурации $R \sim 4,8/3,2T \sim 1,5$. Начальное распределение рабочего газа (водорода или дейтерия) вдоль оси установки создается с помощью импульсных клапанов.

Сценарий экспериментов на ГОЛ-3 следующий: в зависимости от конфигурации эксперимента в вакуумную камеру ГОЛ-3 напускается водород или дейтерий (за 500 мс до начала инжекции РЭП), начальная плотность $n_a \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ с заданным распределением по длине. После этого создается магнитное поле. В максимуме магнитного поля специальным прямым замагниченным разрядом создается предплазма с температурой $T \sim 1-2 \text{ эВ}$. Затем в плазму инжектируется РЭП.



Как показано в экспериментах [1], разряд в установке ГОЛ-3 можно разделить на две стадии: нагрев плазмы РЭП длительностью около 10 мкс и удержание плазмы – квазистационарная фаза длящаяся около 1 мс. На стадии нагрева плазмы РЭП возникает эффект быстрого нагрева ионов. Для объяснения явления быстрого нагрева ионов плазмы существует модель, предложенная в [2]. На стадии релаксации пучка в плазме происходит неоднородный нагрев электронной компоненты и как следствие возникают градиенты давления в каждой ячейке многопробочной ловушки. Это связано с сильной зависимостью эффективности передачи энергии от электронов пучка к электронам плазмы, от отношения плотности пучка к плотности плазмы (ясно что в пробках плотность пучка будет выше, чем между ними). Неоднородность давления приводит к встречному движению потоков плазмы из пробок к центру каждой ячейки, в результате столкновения и взаимопроникновения плазменных потоков происходит их перемешивание. Ионная компонента плазмы при этом становится горячей, ее температура достигает 1-2 кэВ. Характерное время данного процесса не превышает времени классических ион-ионных столкновений. Квазистационарная фаза наступает сразу после сильно турбулентной фазы нагрева электронами пучка. Измерения показывают, что на этой стадии разряда давление определяется ионной компонентой плазмы. Температура электронной компоненты быстро спадает до 100-300 эВ за счет продольной теплопроводности. Давление и плотность плазмы остаются практически постоянными, хотя в плазме и наблюдается некоторая МГД-активность. МГД-колебания связывают прежде всего с наличием токов в плазме [3].

Важным параметром, характеризующим эффективность нагрева и длительность удержания, является ионная температура T_i . На всех стадиях разряда в плазме ГОЛ-3 наблюдаются сложные коллективные процессы, а это означает, что ионы плазмы могут иметь неравновесное распределение по энергиям (не максвелловское), в этом случае величина T_i становится некорректной. Поэтому, как и на других термоядерных установках [3,4] важно иметь сразу несколько независимых методов измерения ионной температуры. На установке ГОЛ-3 используется сразу несколько диагностик:

1. Нейтронные детекторы.
2. Спектральные измерения, доплеровского уширения линий.
3. Анализатор нейтральных атомов перезарядки.

Каждая из этих диагностик обладает своими техническими и методическими трудностями [6]. Измерение T_i по доплеровскому уширению линий H_α , D_α осложняется в основном из-за наличия сильной турбулентности на начальной стадии разряда (большие колебания плотности приводят к сильному Штарк-эффекту) и отсутствием достаточного количества излучающих атомов на поздней стадии разряда [7]. Измерение T_i нейтронными диагностиками [8] также обладает рядом сложностей, которые в основном перечислены в [6]. Определение T_i методом пассивной корпускулярной диагностики основано на измерении энергетического распределения быстрых атомов, образующихся в основном за счет перезарядки ионов на нейтралах плазмы. Температура ионов плазмы определяется из энергетического распределения нейтралов путем сложной процедуры решения некорректной обратной задачи. Процедура получения T_i из эксперимента допускает в ряде случаев существенное упрощение. Такая возможность зависит в основном от наличия дополнительной экспериментальной информации, требующейся при обработке экспериментальных данных. Важную роль играет выбор модели, адекватно описывающей процесс поведения нейтральных атомов в плазме. Первые экспериментальные данные, полученные многоканальным анализатором атомов перезарядки на многопробочной ловушке ГОЛ-3, представлены в [9].

Пассивная корпускулярная диагностика является одним из стандартных методов диагностики горячей плазмы, начиная с конца 50-х годов, когда она была впервые применена на установке "Альфа" [10]. Общее описание этой методики можно найти во многих источниках [6,11,12,13]. Описание методики, наиболее близкой к современным экспериментам, рассматривается в работе М. Брузати [15] и обзоре М.П. Петрова [14]. С конструкцией и принципом работы уже разработанных анализаторов нейтральных атомов перезарядки можно познакомиться например в [16,17,18]. В работе [19] представлены экспериментальные результаты по применению пассивной корпускулярной диагностики на установке Alcator. В этих экспериментах впервые была показана возможность измерения ионной температуры в плазме с большой плотностью ($n \sim 5 \cdot 10^{14}$). Теоретическое рассмотрение баланса нейтральных атомов перезарядки впервые рассмотрено в статье [20], естественным продолжением которой является модель, предложенная Ю.Н. Днестровским и др. в [21] для описания баланса нейтральных атомов в квазистационарных установках типа

токамак. Методика восстановления ионной температуры по спектру нейтральных атомов перезарядки подробно рассмотрена в [22].

Настоящая работа состоит из следующих частей: в первой главе рассмотрены результаты ранее проводимых экспериментов, исходя из которых делается постановка задачи, во второй главе описано экспериментально-техническое решение поставленной задачи. В третьей главе представлена модель баланса нейтральных атомов в плазме ГОЛ-3, по которой делается ряд заключений о возможности применения данной диагностики в широком диапазоне параметров плазмы в многопробочной ловушке.

1. Первые эксперименты по регистрации перезарядных атомов на многопробочной ловушке ГОЛ-3. Постановка задачи

Предварительные результаты по регистрации быстрых нейтралов представлены в статье [9]. Для регистрации нейтралов использовался 5-канальный анализатор нейтралов. Анализатор атомных частиц представляет собой энергоспектрометр, для одновременного анализа (в каждом из пяти каналов) потоков атомов перезарядки дейтерия, покидающих плазму. Принцип работы прибора основан на обдирке поступающих в него нейтральных частиц с последующим анализом по энергии вторичных ионов, поступающих под углом 45° в однородное тормозящее электрическое поле [16]. Схема эксперимента с пятиканальным анализатором быстрых нейтралов перезарядки представлена на рис.2. Анализатор состоит из следующих узлов: транспортный канал с диафрагмами, камера обдирки, 45° электростатический анализатор, пять каналов регистрации на основе вторичных электронных умножителей и АЦП.

Анализатор расположен на расстоянии 3,1 м от входной катушки ГОЛ-3 (28-29 катушка). Методика измерений следующая: горячие ионы перезаряжаются на нейтралах плазмы, вылетают из плазменного столба, проходят по транспортному каналу в камеру обдирки, где конвертируются в ионы, которые разделяются по энергиям в поле 45° -го электростатического анализатора и попадают на ВЭУ, сигнал с ВЭУ усиливается и записывается на АЦП333.

Для преобразования быстрых атомов в ионы используется камера обдирки. В качестве обдирочного газа используется воздух, который напускается через игольчатый натекатель. Напуск воздуха стационарный. Давление в камере обдирки измеряется ионизационным вакуумметром. Рабочее давление воздуха в камере обдирки $5,6 \cdot 10^{-2}$ Па. Данные по эффективности обдирки были взяты из работы [16].

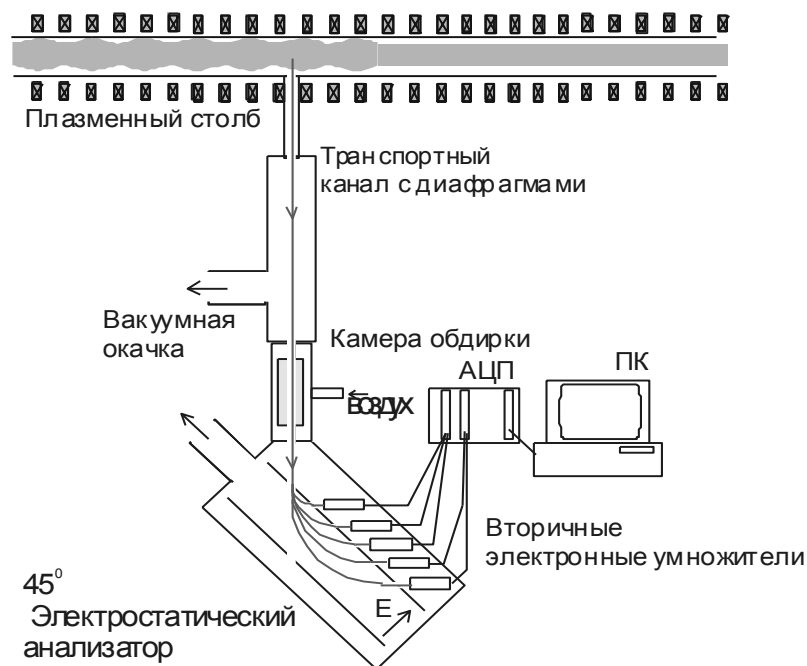


Рис.2. Схема эксперимента по регистрации горячих нейтралов перезарядки на установке ГОЛ-3

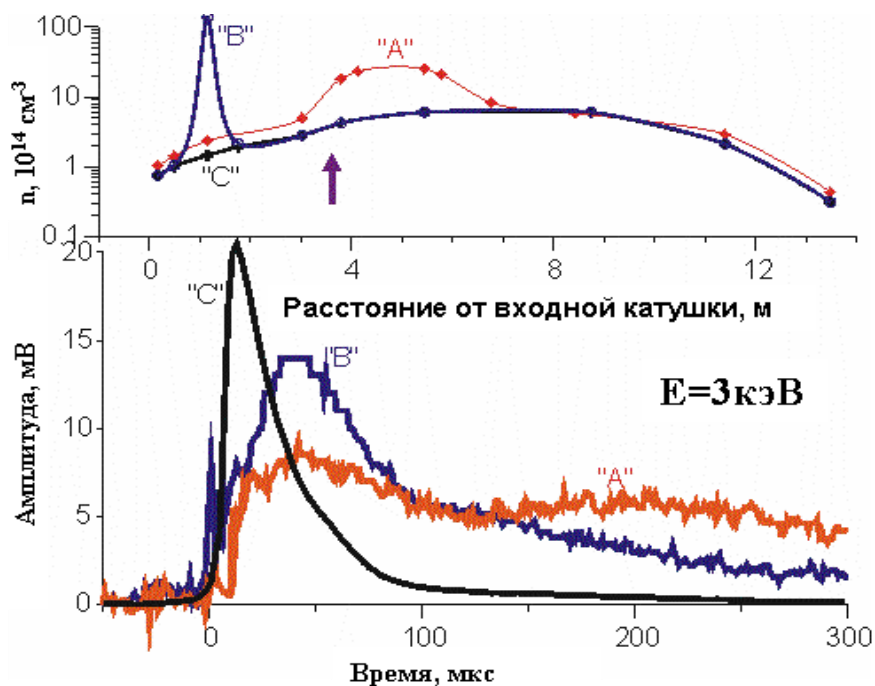


Рис.3. Начальное распределение плотности дейтерия вдоль установки (вверху). Сигналы ВЭУ(внизу), соответствующие нейтралам с энергией 3 кэВ (сигнал С уменьшен в 100 раз).

А – газовый импульс дополнительным клапаном в центре, В - газовый импульс дополнительным клапаном на входе, С – без дополнительных клапанов.

В экспериментах было показано, что успешная регистрация потоков быстрых нейтралов сильно зависит от начальной плотности дейтерия в области

расположения анализатора, которая показана стрелкой на верхнем графике. В режиме с плотностью $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ сигнал достигает величины $\sim 1 \text{ В}$ (сигнал С на рис.3. В режиме с большой плотностью $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (сигнал А на рис.) амплитуда сигнала уменьшается примерно в 100 раз. Это обусловлено сразу несколькими причинами. Во-первых, в режиме с большой плотностью температура плазмы уменьшается. Во-вторых, поток нейтралов из горячей области ослабляется за счет сокращения длины пробега в плазме. В-третьих, увеличивается поток газа и плазмы из камеры в транспортный канал анализатора, тем самым образуя там «паразитную» обдирочную ячейку.

Из анализа полученных экспериментальных данных стало ясно, что для работы с анализатором в режимах с большой плотностью плазмы $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ необходимо повысить чувствительность прибора более чем на порядок и одновременно снизить уровень помех. Близкие выводы были сделаны группой А.И. Кислякова (на токамаке Alcator) в работе [19], где так же были приняты меры по увеличению эффективности регистрации потоков нейтральных атомов в режимах с большой плотностью. Исходя из этих обстоятельств, была поставлена задача произвести модернизацию прибора с целью повышения его чувствительности. Для модернизации было предложено провести следующие шаги:

1. Улучшить систему вакуумной откачки, транспортного канала и камеры анализатора. Низкий вакуум $\sim 10^{-4}$ торр как в транспортном канале, так и в камере анализатора, приводил к нежелательному ослаблению анализируемого потока нейтралов. Величина потерь в транспортном канале достигала в некоторых случаях до 30%-50% от полного потока.

2. Изменить систему регистрации сигналов с ВЭУ. Схема регистрации была подвержена сильным наводкам через токовые петли.

3. Перейти на импульсную газовую мишень в камере обдирки. Опыт работы других исследовательских групп [17] показывает, что применение импульсного газонапуска азота или гелия позволяет увеличить коэффициент обдирки на порядок. Применение стационарного газонапуска вызывает ухудшение вакуума в камере анализатора и транспортном канале. Это приводит к ослаблению потока вторичных ионов в анализаторе и ухудшению рабочих характеристик ВЭУ и тем самым сильно ограничивает толщину обдирочной мишени.

4. Повысить однородность анализирующего поля в 45° энергоспектрометре. В используемом корпусе 45° электростатического анализатора боковые стенки и «земляная» пластина находятся под одним потенциалом. При моделировании электрического поля в анализаторе (В.Т. Астрелиным) было обнаружено, что такая конфигурация приводит к неоднородности анализирующего электрического поля (оно возрастает примерно на 20% по направлению к потенциальной пластине). Это приводит к дефокусировке анализируемых частиц в направлении, перпендикулярном плоскости их траектории, и усиленному торможению частиц высоких энергий (поток частиц на каналы, дальние относительно входного окна, уменьшается).

5. Предотвратить проникновение плазмы через входной узел в транспортный канал и анализатор. Проникновение плазмы приводит к дополнительной потере исследуемого потока нейтралов. В экспериментах появление плазмы было обнаружено путем снятия напряжения с анализирующей пластины. При этом все каналы анализатора выдавали сигналы, подобные изображенному на рис. 4. На сигнале видно сначала появление наводки от срабатывания генератора пучка, затем возникает ступенька, вызванная УФ-излучением, после чего в 50 мкс на ВЭУ приходит плазма.

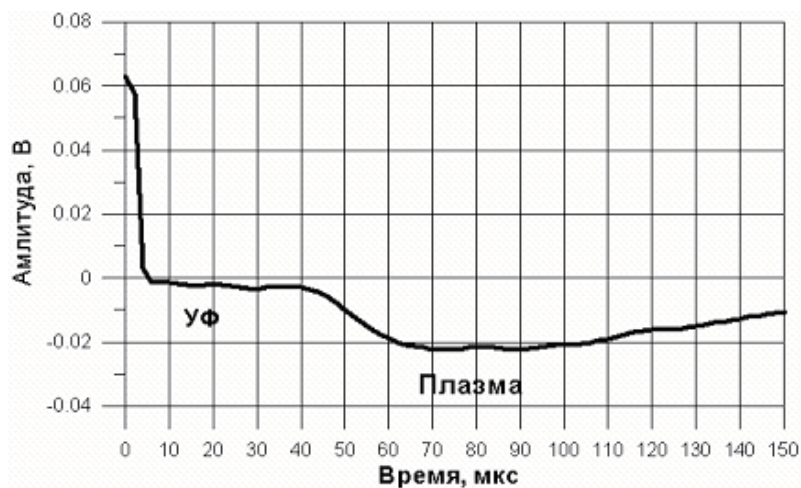


Рис.4. Сигнал ВЭУ при отсутствии напряжения на потенциальной пластине.

При обработке экспериментальных данных некоторые сложности вызвала процедура определения ионной температуры из полученных энергетических спектров быстрых нейтралов. Разработка алгоритма определения T_i , является отдельной комплексной задачей. Для решения этой задачи необходимо привлекать как эмпирические данные, так и теорию. В данной работе делается анализ этой задачи применительно к установке ГОЛ-3.

2. Модернизация пятиканального анализатора нейтральных атомов перезарядки

Общая схема анализатора после модернизации показана на рис.5. Откачка транспортного канала и предварительная откачка вакуумной камеры анализатора осуществляется турбомолекулярным насосом типа ТМН-400. Вакуумная камера анализатора откачивается магниторазрядным насосом типа НМД-0,16-1. Предельный вакуум, получаемый в камере анализатора и транспортном канале $\sim 10^{-6}$ - 10^{-7} торр.

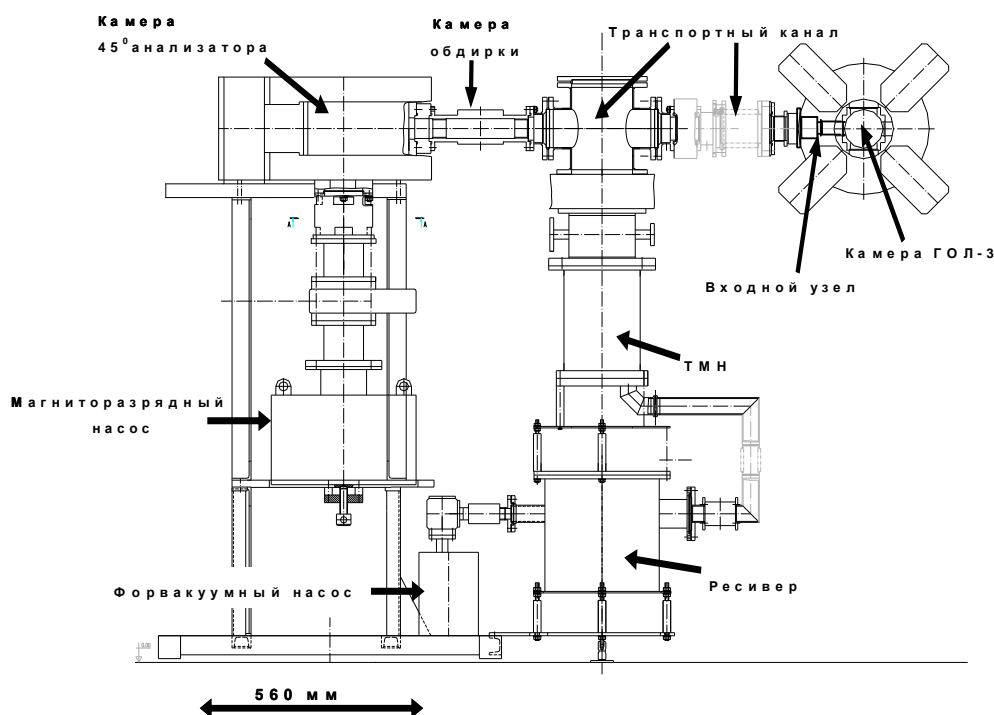


Рис.5. Общая схема анализатора после модернизации.

Модернизация входного узла (см рис.5) была произведена для двух целей. Первое - это снижение газовой нагрузки на ТМН во время импульсного газонапуска в камеру ГОЛ-3. Второе - предотвращение проникновения плазмы в транспортный канал.

Для снижения импульсной газовой нагрузки на ТМН проводимость (по газу) входной диафрагмы должна быть уменьшена. Но тогда (учитывая, что проводимость отверстия пропорциональна его площади S_{in}) будет уменьшен поток нейтралов J_0 из плазмы $J_0 \sim S_{in}$. Плотность паразитной обдирочной мишени в транспортном канале n , образующейся в результате поступления газа из камеры ГОЛ-3, естественно прямо пропорциональна площади входной диафрагмы $n \sim S_{in}$. При этом поток атомов J_0 будет ослабляться в транспортном

канале как $\exp(-n(S_{in})\sigma L)$, где σ эффективное сечение обдирки в дейтерии, а L - длина транспортного канала, т.е. результирующий поток J после прохождения транспортного канала будет $J \sim J_0 \cdot \exp(-n(S_{in})\sigma L) \sim S_{in} \exp(-n(S_{in})\sigma L) = f(S_{in})$. Для расчета площади входной диафрагмы был взят оптимум по функции $f(S_{in})$, что дало значение для S_{in} равное $0,5 \text{ см}^2$.

Плазма во входном узле транспортного канала может возникать по двум причинам. Это проникновение плазмы из камеры ГОЛ-3 и наработка плазмы непосредственно в транспортном канале за счет взаимодействия остаточного газа с излучением из плазмы. Поток плазмы во входной узел неизвестен, сложно также провести оценку количества плазмы, нарабатываемой за счет взаимодействия излучения плазмы с остаточным газом. Здесь можно лишь указать, что в случае свободного (без магнитного поля) течения плазмы из установки во входной узел $J_{plasma} \sim (n v e)/4$, где n - плотность плазмы на периферии, v - характерная тепловая скорость, e - элементарный заряд. Из этой оценки получаем $J_{plasma} \sim 10 \text{ А}$. Оригинальное решение проблемы удаления плазмы было высказано Г.Е. Деревянкиным, предложившим секционировать входное окно на отверстия малого диаметра. При этом магнитное поле установки направлено вдоль плоскости входных отверстий, и поток плазмы, двигаясь поперек магнитного поля, будет поглощаться материалом входной диафрагмы. Входная диафрагма выполнена в виде молибденовой вставки с 7 отверстиями диаметром 3мм. Для удаления плазмы внутри входного узла были установлены три пары плоских потенциальных электродов размером $20 \times 25 \text{ мм}$, которые формируют электрическое поле, параллельное магнитному полю. Это способствует ускоренному распаду плазмы.

Для улучшения однородности анализирующего поля между потенциальной и земляной пластинами были размещены 4 металлические рамки толщиной 0,3мм, скрепленные через высоковольтные конденсаторы типа К15У1 и соединенные через высокоомные сопротивления 10 МОм.

Для снижения токо-петлевых наводок были предприняты следующие шаги. Все устройства вакуумной системы, для которых необходимо питание (шиберы, клапаны, насосы), стыкуются с корпусом анализатора через изоляторы. Сигнальные кабели объединены в единый кабель с общей оплеткой и присоединены к анализатору разъемом типа РМГ, общая оплетка заземлена на корпус бокса регистрации. В блоках питания (потенциальной пластины, ВЭУ)

сделана гальваническая развязка с землей. Таким образом, все системы, присоединяемые к корпусу анализатора заземлены в одной точке на корпусе бокса. Регистрируемые токи составляют величину порядка микроампера, поэтому непосредственно на ВЭУ (внутри корпуса анализатора) смонтированы предусилители. Характеристики предусилителей: эквивалентное входное сопротивление $\sim 1\text{Мом}$, постоянная времени нарастания фронта - несколько сот наносекунд.

Обдирочная мишень (см. рис.5) сделана импульсной. Для импульсного напуска газа в камеру обдирки используется электромагнитный затвор [23]. Для измерения импульса давления в камере обдирки используется датчик ПМИ-10-2. На рис.6 представлен импульс давления в обдирочной ячейке, полученный в одном из калибровочных экспериментов, клапан открывался при атмосферном давлении.

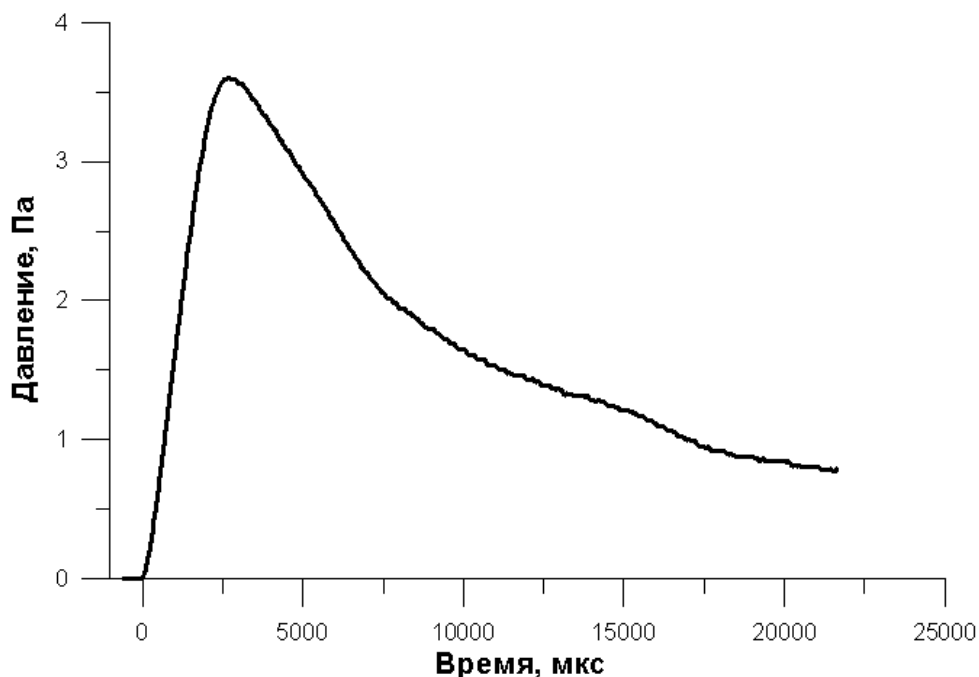


Рис.6. Импульс давления в обдирочной ячейке, рабочий газ - воздух при атмосферном давлении.

3. Оценка потока нейтралов из плазмы ГОЛ-3.

Рассмотрим задачу об определении потока нейтральных атомов из плазмы ГОЛ-3. Будем использовать модель развитую, Днестровским [21]. Эта модель основана на решении кинетического уравнения для нейтральных атомов:

$$\bar{v} \frac{\partial f_0}{\partial \bar{x}} = -sf_0 + (s_{cx}N + s_r n)\varphi_i \quad (1)$$

где $s_{cx} = \langle \sigma_{cx} v_i \rangle n$, $s_{ei} = \langle \sigma_{ei} v_e \rangle n$, $s_r = \langle \sigma_r v_e \rangle n$ $s = s_{cx} + s_{ei}$ - скорости элементарных процессов: перезарядки на ионах, ионизации электронами и рекомбинации (угловые скобки означают усреднение по функции распределения). При этом для их вычисления были использованы сечения элементарных процессов из [24,25]. N и n - плотности нейтральных атомов и плазмы, f_0 -функция распределения нейтральных атомов, φ_i - функция распределения ионов плазмы. Для решения уравнения (1) необходимо определить плотность нейтральных атомов. Сделаем следующие предположения:

1. для плазмы ГОЛ-3 верна модель для плоского слоя. Физически это означает, что в обмене нейтралами между разными слоями основную роль играют нейтральные атомы, движущиеся по кратчайшему пути – по радиусу. Это условие выполняется, когда $n\sigma_{cx}a \gg 1$. Радиус шнура ГОЛ-3 $a=5$ см, плотность плазмы $n \sim 10^{15}$ см⁻³, а $\sigma_{cx} \sim 3 \cdot 10^{-15}$ см², т.е. $n\sigma_{cx}a \sim 10$.

2. время пролета нейтральных атомов вдоль плазменного шнура много меньше характерного времени изменения параметров плазмы в основной стадии. Характерное время перезарядки иона на нейтрале также мало. Поэтому можно применить стационарное кинетическое уравнение, т.е. функция распределения нейтральных атомов отвечает мгновенному состоянию плазмы.

3. основным источником нейтралов в плазме ГОЛ-3 является пристеночная область. Процесс рекомбинации существенен не для всех режимов работы ГОЛ-3. Это подтверждается наблюдаемой динамикой свечения линий D_α и H_α , которые показали, что плотность нейтралов в приосевой области $\sim 10^8 - 10^{11}$ см⁻³. Такая плотность атомов может соответствовать атомам рекомбинационного происхождения $n_r \sim 10^8$ см⁻³ при температуре электронов 0,1-1 кэВ либо определяются только диффузией из пристеночной области.

4. функции распределения электронов и ионов локально максвелловские. Этого нельзя утверждать точно, но многие эксперименты

подтверждают это. Например линии D_α и H_α обладают доплеровским уширением, электроны также максвелловские, их времена релаксации к равновесию малы.

Так как параметр $n\sigma_{cx}a \gg 1$, можно вообще не искать точного решения уравнения (1), а воспользоваться его асимптотическим решением, учитывая, что плотность атомов в пристеночной области известна $N(a) \sim 10^{12}-10^{13} \text{ см}^{-3}$. Скорость атомов в пристеночной области соответствует энергиям $\sim 1\text{эВ}$.

$$N(x) = N(a) \text{Exp} \left[\int_a^x \frac{\sqrt{s(\xi) \cdot s_{ei}(\xi)}}{v_i(\xi)} d\xi \right] \quad (2)$$

где $v_i(\xi) = \sqrt{\frac{2T_i(\xi)}{M_i}}$ - тепловая скорость ионов плазмы.

Плотность нейтралов в центре будет определяться рекомбинацией, если она мала по диффузионному переносу. Адекватность такого описания плотности нейтралов была проверена при сравнении с данными спектроскопии плазмы.

Теперь когда нам стала известна плотность нейтральных атомов вдоль плазменного шнура, можно записать решение для потока нейтральных атомов $\Gamma(E)$ вдоль радиуса (на единицу поверхности плазмы, в единицу телесного угла с энергией E):

$$\Gamma(E) = \int_{-a}^a dx \cdot s_{cx} N(x) \cdot \varphi_i(x, E) \text{Exp} \left[\int_a^x s(\xi) d\xi \right] dx \quad (3)$$

При исследовании (3), удобно ввести функцию источника нейтралов, которая дает пространственное распределение плотности потока нейтралов с данной энергией E .

$$\varepsilon(x, E) = \frac{d\Gamma(x, E)}{dx} \quad (4)$$

Вычисление (2), (3) производилось при следующих плазменных параметрах:

плотность дейтериевой плазмы (в 20-100 мкс после начала инжекции пучка в плазму), аппроксимировалась по точкам, полученным в экспериментах по томсоновскому рассеянию [26] в виде:

$$n(x)[\text{cm}^{-3}] = 10^{15} \cdot 0,26 \cdot \text{Exp}[0,094 \cdot x^2];$$

температура электронов и ионов задавалась ступенчатыми функциями, изображенными на рис.7.

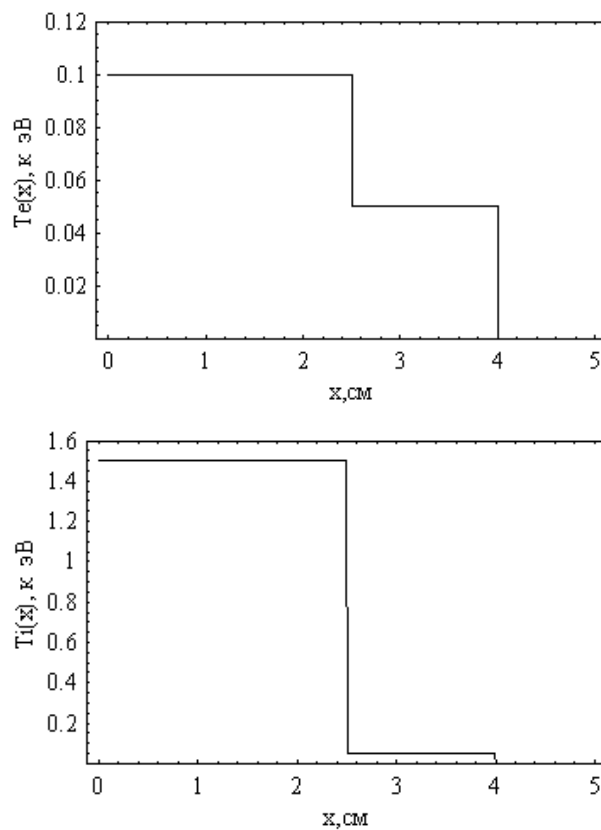


Рис.7. Профили температуры электронов (вверху), ионов (внизу).

На рис.8 представлена зависимость функции источника от радиуса и соответствующая энергиям нейтралов 1кэВ, 3кэВ и 10кэВ. Из рисунка видно, что если область нагрева РЭП однородная, то источник высокоэнергитичных нейтралов $\varepsilon(x, E)$ сильно пикирован на ее границе. При спектроскопических измерениях доплеровского уширения наблюдается аналогичная картина. Высокотемпературное уширение наблюдается именно на границе центральной горячей области и периферии.

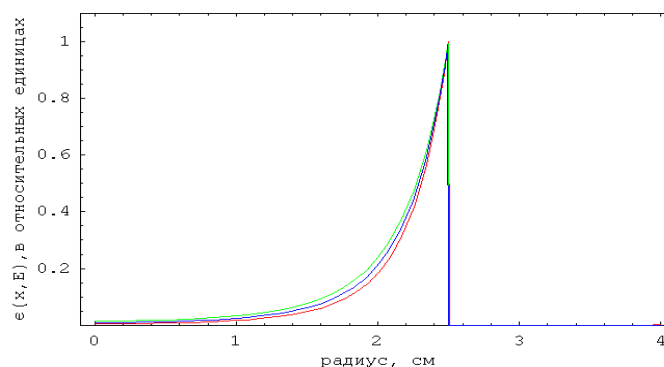


Рис.8. Функция источника высокоэнергетичных нейтралов $\varepsilon(x, E)$ в зависимости от радиуса плазмы. Для нейтралов с энергией: 1кэВ, 3кэВ и 10 кэВ.

Произведя вычисления $\Gamma(E)$, можно оценить величину сигнала, получаемого с ВЭУ, т.е. оценить измеряемый ток перезарядных атомов с данной энергией E . Ток в канале анализатора, соответствующий энергии E , очевидно будет равен $I_{cx}(E) = \Gamma(E) \cdot \Delta\Omega \cdot S \Delta E \beta(E)$, где $\Delta\Omega \cdot S$ - апертура анализатора, $\beta(E)$ - эффективность регистрации с учетом усиления ВЭУ и эффективности обдирки, ΔE - энергетическое разрешение. Для вышеуказанных профилей плотности и температуры плазмы ток с канала анализатора, соответствующий энергии 2,5 кэВ будет $I_{cx}(E) \sim 1 \text{ мкА}$. Используя обсуждаемую выше модель, были определены основные параметры потоков нейтралов при более «гладких» профилях температуры, сильно пикированных в центре и плавно спадающих на периферии. В этом случае функция источника нейтралов становится сильно неоднородной. Максимумы $\varepsilon(x, E)$ для высоких энергий смещаются к центру, а средние энергии - к периферии. Эти рассуждения можно кратко резюмировать следующим образом: измеряя функцию распределения нейтралов, мы получаем интегральную температуру ионов плазмы вдоль линии наблюдения анализатора. «Хвосты» функции распределения нейтральных атомов действительно отражают температуру горячей области плазмы. Определить положение источника горячих нейтралов (положение горячей области) без привлечения дополнительных экспериментальных данных или адекватной модели переноса нейтралов в плазме невозможно. Диапазон энергий для экспериментов снизу ограничивается эффективностью регистрации $\beta(E)$ и влиянием более холодной периферии плазмы, сверху - «паразитным» излучением (УФ, и др.), так как потоки нейтралов с энергией $\sim 10 \text{ Т}_i$ на несколько порядков ниже, чем при $E \sim 1-6 \text{ Т}_i$.

Выводы и заключение.

Проведена модернизация многоканального анализатора:

1. Улучшены вакуумные условия в анализаторе за счет использования новой вакуумной системы.
2. Произведен переход на импульсную газовую ячейку.
3. Принципиально изменен входной узел анализатора, что снижает поток плазмы в транспортный канал анализатора.
4. Улучшена схема регистрации, смонтирована система предусиления.

Ожидается, что эффективность регистрации возрастет в 10-100 раз. Прибор готовится к использованию для пассивной корпускулярной диагностики плазмы в режимах с большой плотностью ($n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) (см. рис.9).

Начата разработка модели поведения нейтралов в плазме ГОЛ-3. Диффузионная модель переноса нейтралов дает удовлетворительное согласие с данными спектроскопических диагностик.

Планируется начать разработку диагностического пучка с целью абсолютной калибровки анализатора.

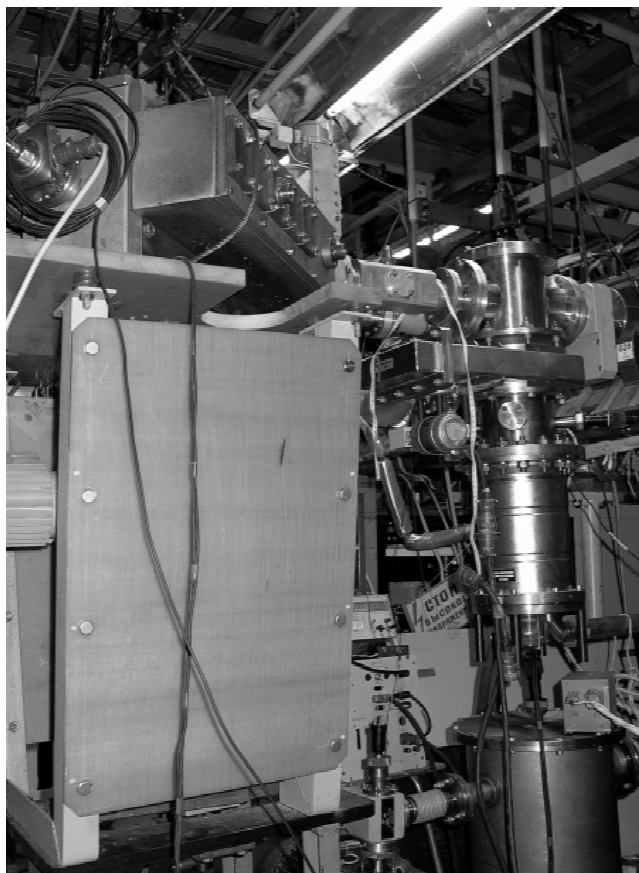


Рис.9. Модернизированный анализатор быстрых нейтральных атомов на установке ГОЛ-3.

Благодарности

В заключении хотелось бы выразить признательность всему коллективу установки ГОЛ-3. В особенности Г.Е. Дервянкину за неоценимо плодотворное сотрудничество в работе, А.В. Бурдакову за поддержку работы. Отдельная благодарность С.В. Полосаткину и И.А. Иванову за полезные обсуждения, В.А. Расторопову за помощь в изготовлении отдельных узлов анализатора.

Литература

1. V.S. Koidan, A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, G.E. Derevyankin, V.G. Ivanenko, I.A. Ivanov, M.V. Ivantsivsky, V.V. Konyukhov, S.A. Kuznetsov, A.G. Makarov, K.I. Mekler, V.S. Nikolaev, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, A.A. Shoshin, S.L. Sinitsky, Yu.S. Sulyaev and Eh.R. Zubairov. Progress in multimirror trap GOL-3. // Transactions of fusion science and technology, Vol.47, No.1T, 2005, p.35-42.
2. V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, and N.G. Karlykhanov. Modelling of plasma dynamics and ion heating in multimirror trap. // Transactions of fusion science and technology, Vol.47, No.1T, 2005, p.246-248.
3. V.V. Postupaev, A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, A.M. Averkov, A.D. Beklemishev, A.V. Burdakov, I.A. Ivanov, V.S. Koidan, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, A.F. Rovenskikh, A.A. Shoshin, S.L. Sinitsky, and Eh.R. Zubairov. Role of q-profile for plasma confinement in the multimirror trap GOL-3. // Transactions of fusion science and technology, Vol.47, No.1T, 2005, p.84-91.
4. В.С. Заверяев, А.Б. Извозчиков, С.Е. Лысенко, М.П. Петров. Нагрев ионов в установке Токамак-10// Физика плазмы , т.4, в.6, 1978
5. S.S. Medley, R.E. Bell, M.P. Petrov, A.L. Roquemore, and E.V. Suvorkin. Initial neutral particle analyzer measurements of ion temperature in the National Spherical Torus Experiments// Review of scientific instruments, Vol.74, No.3, 2003, pp.1896-1899.
6. Кузнецов Э.И., Щеглов Д.А. Методы диагностики высокотемпературной плазмы. М.:Атомиздат, 1974.
7. I.A. Ivanov, A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, V.S. Koidan, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, and S.L. Sinitsky. Spectroscopy measurements of hot plasma temperature on the multimirror trap GOL-3. // Transactions of fusion science and technology, Vol.47, No.1T, 2005, p.171-174.
8. A.V. Burdakov, A. England, C.S. Kim, V.S.Koidan, M. Kwon, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, and Yu.S. Sulyaev. Detection of fusion neutrons on the multimirror trap GOL-3. // Transactions of fusion science and technology, Vol.47, No.1T, 2005, p.333-335.
9. A.V. Burdakov, G.E. Derevyankin, V.S. Koidan, A.A. Shoshin, and Yu.A. Trunev. Study of charge-exchange neutral emission from hot plasma at the

- multimirror trap GOL-3. // Transactions of fusion science and technology, Vol.47, No.1T, 2005, p.324-326
10. *В.В. Афросимов, И.П. Гладковский, Ю.С. Гордеев, И.Ф. Калинин, М.П. Петров и Н.В. Федоренко.* Исследование потока нейтральных атомных частиц, испускаемых плазмой, на установке «АЛЬФА»// ЖТФ, т. 30, в. 12, 1960.
 11. *Давыденко В. И., Иванов А. А., Вайсен Г.* Экспериментальные методы диагностики плазмы. Часть 1. НГУ. Новосибирск, 1999.
 12. *Диагностика термоядерной плазмы.* / Под ред. С.Ю. Лукьянова. М.: Энергоатомиздат, 1985.
 13. *Барнет К., Харрисон М.* Прикладная физика атомных столкновений. М.: Энергоатомиздат, 1987.
 14. *М.П. Петров,* Корпускулярная диагностика квазистационарной термоядерной плазмы// Физика плазмы, 1976, т.2, с371-389.
 15. *М. Brusati.* Charge exchange measurements// Diagnostics for fusion experiments; Proceedings of the Course, Varenna, Italy, September 4-16, 1978. (A80-16716 04-75) Oxford, Pergamon Press, Ltd., 1979, p. 35-46.
 16. *В.С. Койдан,* Многоканальный анализатор ионов и быстрых атомов перезарядки. Препринт 19-70, Новосибирск, ИЯФ, 1970.
 17. *А.И. Rogozin,* Многоканальный анализатор для корпускулярной диагностики на быстрых импульсных плазменных установках. Препринт 84-36, Новосибирск, ИЯФ, 1984.
 18. *В.В Афросимов, Е.Л. Березовский, И.П. Гладковский, А.И. Кисляков, М.П. Петров, и В.А. Садовников.* Многоканальный анализатор энергетического и массового спектров атомных частиц// ЖТФ, т. 45, в. 1, 1975.
 19. *М.Р.Ж. Gaudreau, А.И. Kislyakov, Yu.А. Sokolov.* Investigation of fast atom fluxes in the high-density plasma in Alcator// Nuclear Fusion, Vol. 18, No.12, 1978.
 20. *О.В. Константинов, В.И. Перель.* Об энергетическом распределении быстрых нейтральных атомов, выходящих из плазмы// ЖТФ, т. 30, в. 12, 1960.
 21. *Yu.N. Dnestrovkij, S.E. Lysenko, A.I. Kislyakov.* Recombination-induced neutral-particle flux in tokamaks// Nuclear Fusion, Vol. 19, No.3, 1979.

22. A. Khutoretsky, H.-U. Fahbrach, O. Kardaun, J. Stober, Yu.N. Dnestrovskij and W. Herrmann. Recovery of ion temperature profiles from the analysis of energy-resolved neutral flux measurements. IPP 5/99, Max-Planck-Institut fur Plasmaphysik, 2002.
23. Деревянкин Г., Дудников В., Журавлев П. Электромагнитный затвор для импульсного напуска газа// ПТЭ, №5, 1983.
24. C. F. Barnett et al. Physics division atomic data for controlled fusion research. Oak Ridge National Laboratory. 1977.
25. "Cross sections for Collision processes of Hydrogen Atoms with Electrons, Protons and Multiply Charged Ions", Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion, a Supplement to the journal Nuclear Fusion, Vol. 4, 1993.
26. S.V. Polosatkin, A.V. Burdakov, M.V. Ivantsivsky, V.S. Koidan, A.F. Rovenskikh, and V.V. Semionov. Application of Thomson scattering system at 1.06 micron for study of plasma density dynamics at multimirror trap GOL-3. // Transactions of fusion science and technology, Vol.47, No.1T, 2005, p.179-182.