

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

препринт

А.Н.Дубинина, Л.Я.Трайнин, Б.В.Чириков

**ловушка с магнитными пробками,
рассчитанная на длительное удержание
электронов**

Новосибирск 1964

ABSTRACT

Design, arrangement and preliminary experiments with electron mirror machine are described. A mean containment time up to 40 sec has been observed for electron energy about 100 keV, magnetic induction in the mirror about 2.5 kG and mirror ratio 2.5. Dimensions of the cylindrical vacuum chamber are 1600 x 210 mm; the pressure was $(1.3) \cdot 10^{-10}$ mm Hg. Under these conditions the number of electron oscillations between mirrors achieves $5 \cdot 10^9$ and the number of Larmor revolutions - 10^{11} . Significant decreasing of the containment time has been observed for $\rho/R \geq 0.1$ where ρ is electron orbit radius and R is magnetic line curvature radius. This result demonstrates a non-adiabaticity of electron motion in magnetic mirror geometry.

A simple method of electron injection from outer electron gun is described. The capture is the result of fast switching of the special form electric field at the magnetic mirror.

В работах /1-4/ исследовалось длительное удержание заряженных частиц в магнитной ловушке. Как известно /5/, удержание частиц основано на сохранении магнитного момента частицы M , который является адиабатическим инвариантом движения и, следовательно, сохраняется, вообще говоря, лишь приближенно. В упомянутых выше работах /1-4/ наблюдалась неадиабатичность (выход частиц из ловушки вследствие медленного изменения M) и были выяснены условия, при которых можно практически пренебречь этой неадиабатичностью, во всяком случае при использовании ловушки как термоядерного реактора. Представляет интерес дальнейшее более детальное изучение длительного движения частиц в магнитной ловушке. Помимо термоядерных приложений результаты таких исследований могут иметь значение для физики ускорителей (особенно нелинейных) радиационных поясов Земли и др.

С методической точки зрения общим в работах /1-4/ было использование так называемой внутренней инжекции в ловушку. Это значит, что источником заряженных частиц служил радиоактивный газ малой плотности. Преимуществом такого метода является автоматический захват частиц в ловушку без каких-либо дополнительных приспособлений. Однако работа с радиоактивным газом резко усложняет эксперимент, приводит к неконтролируемым условиям захвата и не позволяет получить предельный вакуум, необходимый для увеличения времени жизни частиц в ловушке.

В настоящей работе описана ловушка с магнитными пробками с простой системой внешней инжекции от электронной пушки, рассчитанная на работу с вакуумом $\sim 8 \cdot 10^{-10}$ мм Hg и на время удержания электронов до 40 сек (установка ЛН). Это время определяется рассеянием электронов на остаточном газе и увеличивается с энергией электронов. Максимальная энергия электронов в ЛН достигает 100 Кэв. Дальнейшее значительное увеличение энергии особого смысла не имеет, так как возрастающее излучение электронов в магнитном поле уменьшает время удержания.

§ 1. Описание установки.

Схема установки изображена на рис.1. Фотография общего вида установки — на рис.2. Геометрические размеры выбраны из тех соображений, чтобы установка оставалась еще сравнительно небольшой и удобной в работе. Внутренний диаметр вакуумной камеры равен 210 мм, длина рабочей части вакуумной камеры около 1600 мм. Магнитное поле создавалось при помощи двух соленоидов, обмотка которых сделана из медной трубки, охлаждаемой проточной водой. Конфигурация магнитного поля может изменяться путем перемещения обоих соленоидов вдоль оси ловушки, а также наложением дополнительных витков и железных пимм в различных участках камеры. Типичная конфигурация магнитного поля характеризуется расстоянием между центрами катушек 70 см и отношением максимального (приблизительно в центре катушки) и минимального (посередине между катушками) полей, равного 2,5 (рис.4).

Питание магнитов осуществляется от выпрямителей, собранных на германиевых диодах по трехфазной двухполупериодной схеме. Ток каждого соленоида регулируется отдельно от нуля до 140 ампер, что соответствует магнитному полю в центре соленоида до 2500 эр. Для дополнительного сглаживания пульсаций магнитного поля кардасы соленоидов изготовлены из латуни толщиной 10 мм. Максимальные пульсации в центре ловушки не превышают $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ от значения магнитного поля в этом месте. При конструировании и изготовлении соленоидов было обращено специальное внимание на достижение максимальной азимутальной симметрии магнитного поля. Измеренная азимутальная асимметрия не превышала 0,5% в рабочей области.

Инжектором в ловушку служила электронная пушка с ленточным катодом прямого накала типа, описанного в /6/. Максимальная энергия электронов - 60 Кэв, максимальный ток - 1 ампер. Около 70% тока пушки сфокусировано в угле 3° . Фотография пушки приведена на рис.3. Подача напряжения на пушку, а также на кольцо (см. рис.1 и § 2) осуществлялась путем разрядки линий через тиратроны ТГИ-325/16 с последующим повышением напряжения импульсными трансформаторами.

Все электрические выводы из ловушки сделаны с помощью спаев ковар-стекло.

Вакуумная откачка камеры производилась диффузионным насосом Н5С1М с улучшенным фракционированием масла и включенным последовательно бустерным насосом ЦВЛ-100. Между Н5С1М и камерой помещена двухступенчатая ловушка специальной конструкции, охлаждаемая жидким азотом, со скоростью откачки около 150 л/сек. Все вакуумные уплотнения канавочно-клинового типа с прокладками из отожженной меди М1 толщиной 0,6 - 0,7 мм, протравленные в азотной кислоте. Необходимое давление составляло около 25 кг на миллиметр длины уплотнения. После предварительной откачки системы до давления $\sim 10^{-6}$ мм Hg вакуумная камера и ловушка прогревались при температуре $350^\circ C$ в течение 12 часов для обезгаживания внутренних поверхностей. Измерение вакуума производилось усовершенствованным манометром типа Байярда-Альперта. Предельный достигнутый вакуум составлял $3 \cdot 10^{-10}$ мм Hg при выключенном накале пушки и около $8 \cdot 10^{-10}$ мм Hg в рабочем режиме.

§ 2. Метод захвата электронов в ловушку.

Инжекция электронов в ловушку осуществлялась вдоль магнитного поля, через одну из пробок. Захват электронов в ловушку обеспечивался путем быстрого изменения электрического поля, создаваемого специальным электродом в форме полого цилиндра $\varnothing$ 160 мм (кольцо, см.рис.1).

При относительно небольшой энергии частиц (до ~ 100 Кэв) управление пучком с помощью электрического поля является более простым и удобным, чем с помощью магнитного поля.^{x)}

В отсутствие электрического поля эффективный потенциал аксиального движения заряженной частицы /7/ $U = \mu H_z$ пропорционален магнитному полю и имеет вид, изображенный на рис.4. При включении напряжения на кольцо потенциал принимает вид $U = \mu H_z + e\varphi$ (φ - электрический потенциал на оси) и магнитная пробка может как опускаться, так и подниматься (рис.4). Если при опущенной магнитной пробке электроны свободно входят внутрь ловушки, то при достаточно быстром подъеме пробки часть электронов оказывается захваченной.

Пушка инжектировала электроны под углом 30° к оси ловушки и устанавливалась на таком расстоянии от магнитной пробки, чтобы основная часть электронного пучка отражалась пробкой. Около 10% тока пушки при этом проходило через пробку за счет углового разброса. В процессе настройки системы вторая пробка опускалась

x) Аналогичная система захвата была использована независимо в работе /8/.

ниже первой, так что весь ток, прошедший через первую пробку, обязательно проходил и через вторую и регистрировался на коллекторе, как это показано схематически на рис.5б. Длительность тока соответствовала импульсу отрицательного напряжения, подаваемого на катод пушки (анод заземлен) и составляла около 20 мксек (рис.5а). Приблизительно через 10 мксек после включения пушки на кольцо подавался положительный импульс длительностью около 2 мксек с напряжением порядка напряжения на пушке. При этом практически весь ток пушки проходил через кольцо внутрь ловушки (рис.5в). После настройки системы по осциллограммам рис.5 а,б,в вторая пробка поднималась до такой высоты, чтобы ток, пропущенный кольцом, не проходил через вторую пробку (рис.5г). Тогда при спаде напряжения на кольце (на заднем фронте импульса) происходит захват электронов в ловушку.

С первого взгляда может показаться, что для эффективного захвата задний фронт импульса кольца должен быть очень коротким, порядка времени пролета электрона через ловушку, т.е. $\sim 10^{-8}$ сек. Однако оказывается, что это не так. Измерения показали, что при увеличении длительности заднего фронта с $3 \cdot 10^{-8}$ сек до $5 \cdot 10^{-7}$ сек количество захваченных электронов сколько-нибудь заметно не изменяется, а при увеличении длительности до $5 \cdot 10^{-5}$ сек уменьшается всего в 2 раза. Это связано с тем, что в течение всего времени захвата число электронов в ловушке остается приблизительно постоянным и не зависящим от скорости подема первой пробки, так как количество выходящих из ловушки электронов компенсируется таким же количеством входящих от пушки. Если бы на электроны не действовали никакие возмущения, то захват происходил бы совершенно одинаково при любой скорости подема пробки. Однако в силу неизбежных возмущений в реальной системе эффективность захвата несколько падает, как это было отмечено выше, за счет выхода части электронов сразу же после захвата в результате действия этих возмущений. Мы выбрали длительность заднего фронта импульса кольца $5 \cdot 10^{-7}$ сек, что резко упростило схему питания кольца без снижения эффективности захвата.

Отметим в заключение, что изменяя расположение пушки и напряжение на кольце можно изменять "глубину" захвата электронов в потенциальную яму (рис.4), т.е. произвольно изменять начальные условия захваченных электронов.

§ 3. Методика наблюдения.

Наблюдение захваченных электронов производилось, в основном, по току на коллектор, который представлял из себя круглую сплошную пластинку $\varnothing 160$ мм (рис.1, 4). Перед коллектором помещены две сетки, на которые подаются различные напряжения для запираания вторичной электронной эмиссии с коллектора и для выделения нужной составляющей тока частиц из ловушки. Основной составляющей является ток медленных электронов и ионов, образующихся в ловушке в результате ионизации остаточного газа захваченными быстрыми электронами. Выделение электронного или ионного тока производится путем подачи соответствующего постоянного напряжения либо на одну из сеток коллектора, либо на кольцо. Кроме того, на коллектор идет ток быстрых электронов, выходящих через вторую пробку вследствие рассеяния на остаточном газе или по другим причинам. В типичном режиме ток быстрых электронов составлял несколько процентов от общего тока на коллектор. Регистрация тока коллектора производилась либо непосредственно осциллографом, чувствительность которого достигает 2 мВ/см при входном сопротивлении 1 мом, либо через электрометрический усилитель.

Для защиты измерительных цепей от прямого тока пушки в момент захвата коллектор замыкался на землю на время около 200 мксек с помощью псляризованного реле РР-5 (сопротивление изоляции контактов $> 10^{12}$ ом).

Для непосредственного измерения плотности захваченных электронов, а также для наблюдения за процессом компенсации, использовался электростатический зонд /9/ цилиндрической формы площадью в 200 см^2 , расположенный на расстоянии 3 мм от стенки вакуумной камеры (рис. 1).

В типичном режиме работы установки время удержания электронов в ловушке T_e (уменьшение количества электронов в e раз) составляет около 15 сек. ~~Возможно увеличение этого времени до 40 сек~~ ^{до 40 сек} путем поднятия магнитного поля в 2-3 раза после захвата. При этом увеличивается глубина захвата в потенциальную яму (рис. 4) и энергия электронов за счет бетатронного ускорения в нарастающем магнитном поле. В последнем случае среднее число колебаний электрона в ловушке оказывается около $5 \cdot 10^9$, а число ларморовских оборотов — около 10^{11} . Приведенное время удержания электронов в ловушке соответствует по порядку величины времени рассеяния на остаточном газе /3/. При увеличении энергии и уменьшении магнитного поля наблюдается резкое сокращение времени удержания за счет неадиабатичности.

Пользуемся случаем выразить глубокую благодарность Г.А.Блинову за многочисленные советы при получении сверхвысокого вакуума и В.Г.Пономаренко за постоянную помощь в сооружении и наладке установки.

Литература

1. С.Н.Родионов. Атомная энергия, 1959, 6, № 6, 623.
2. G. Gibson, W.C. Jordan, E.J. Lauer, Phys. Rev. Lett., 1960, 5, 141.
3. G. Gibson, W.C. Jordan, E.J. Lauer, Phys. Fluids, 1963, 6, 116.
4. G. Gibson, W.C. Jordan, E.J. Lauer, Phys. Fluids, 1963, 6, 133.
5. Г.И.Будкер, Сб. "Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, т. III, 3, АН СССР, 1958.
6. И.М.Самойлов. ПТЭ, 1959, № 1, 24.
7. Л.А.Арцимович. Управляемые термоядерные реакции, Физматгиз, 1961.
8. M. Barbier, Etude des oscillations non linéaires à l'aide d'un modèle analogique à cage d'électrons appliquée au mouvement des particules dans les accélérateurs, CERN 61-23, Aug. 24, 1961.

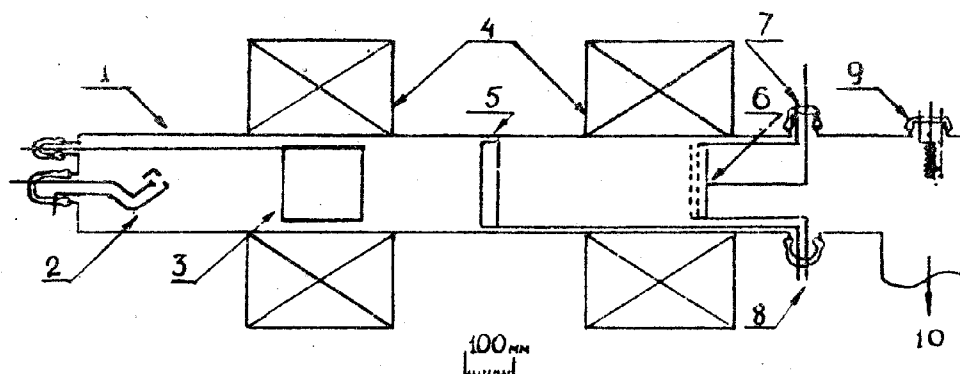


Рис. 1. Схематический разрез магнитной ловушки (в масштабе):
 1 - вакуумная камера; 2 - электронная пушка; 3 - кольцо;
 4 - соленоиды; 5 - электростатический зонд; 6 - коллектор;
 7,8 - сетки коллектора; 9 - манометр; 10 - к насосу.

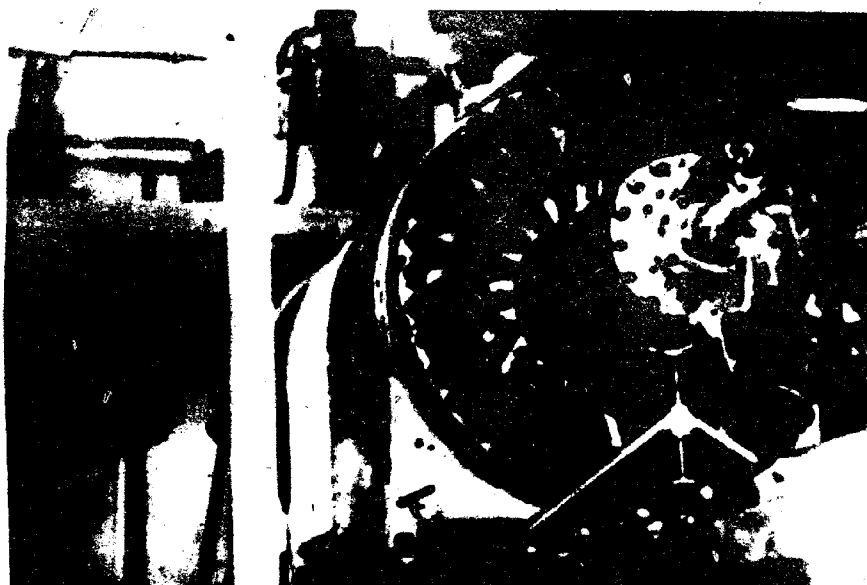


Рис. 2. Общий вид установки ДН.



Рис. 3. Электронная пушка.

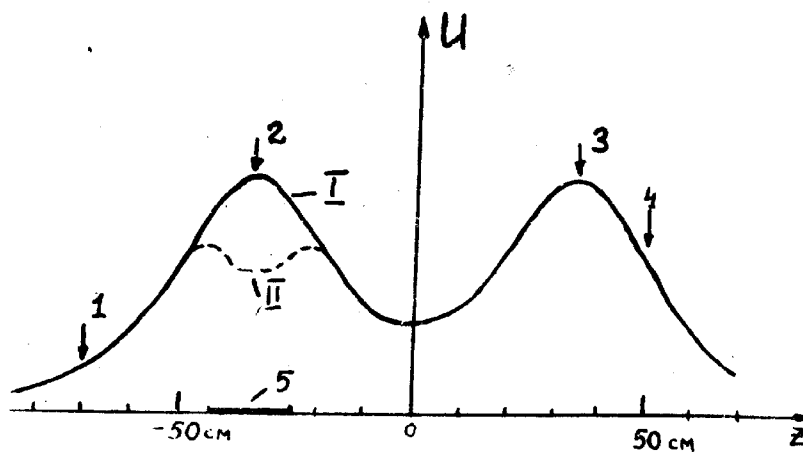


Рис. 4. Эффективный потенциал магнитной ловушки на оси:

$U = \mu H_z + e\varphi$; I - без электрического поля ($\varphi = 0$);
 II - с электрическим полем кольца; I - место расположения пушки;
 2 - первая магнитная пробка; 3 - вторая магнитная пробка;
 4 - место расположения коллектора; 5 - расположение кольца.

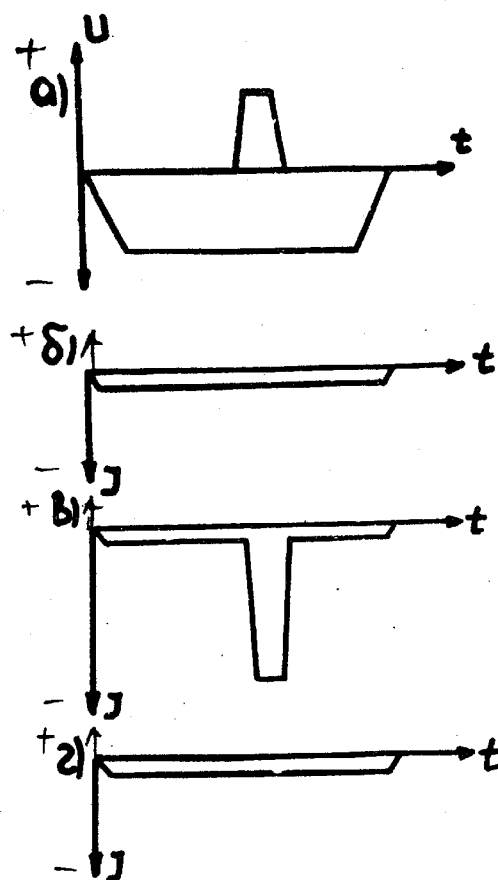


Рис.5. Схематический вид осциллограмм тока (J) и напряжения (U):
 а) напряжение на пушке (1) и кольце (2);
 б) ток на коллектор при отсутствии напряжения на кольце;
 вторая пробка ниже первой; в) ток на коллектор при подаче
 напряжения на кольцо; вторая пробка ниже первой; г) то же, что
 в), но вторая пробка поднята (см. § 2).