

ЛОВУШКА С МАГНИТНЫМИ ПРОБКАМИ, РАССЧИТАННАЯ НА ДЛИТЕЛЬНОЕ УДЕРЖАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ

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

Описана ловушка с магнитными пробками с простой системой внешней инжекции от электронной пушки и вакуумом $\sim 8 \cdot 10^{-10}$ мм Нг и временем удержания электронов до 40 сек. Захват электронов в ловушку осуществляется путем быстрого изменения электрического поля. Установка предназначена для детального изучения длительного движения отдельных электронов в магнитной ловушке, а также для исследования поведения редкой плазмы.

В работах Родионова [1] и Гибсона и др. [2-4] исследовалось длительное удержание заряженных частиц в магнитной ловушке. Как известно [5], удержание частиц основано на сохранении магнитного момента частицы μ , который является адиабатическим инвариантом движения и, следовательно, сохраняется, вообще говоря, лишь приближенно. В упомянутых выше работах наблюдалась неадиабатичность (выход частиц из ловушки вследствие медленного изменения μ) 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 упомянутых работах [1-4] было использование так называемой внутренней инжекции в ловушку. Это значит, что источником заряженных частиц являлся 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 Нг 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 ЛН изображена на рис. 1. Геометрические размеры выбраны из тех соображений, чтобы установка оставалась еще сравнительно небольшой и удобной в работе. Внутренний диаметр вакуумной

камеры равен 240 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 шпим 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, равным 2,5 (см. ниже рис. 2).

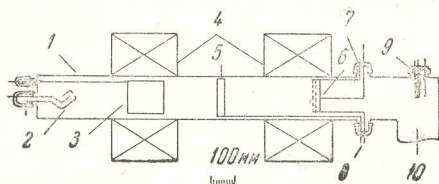


Рис. 1. Схематический разрез магнитной ловушки (в масштабе): 1 — вакуумная камера; 2 — электронная пушка; 3 — кольцо; 4 — соленоиды; 5 — электростатический зонд; 6 — коллектор; 7, 8 — сетки коллектора; 9 — манометр; 10 — к насосу

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 Самойловым [6]. Максимальная энергия электронов — 60 кэв, максимальный ток — 1 а. Около 70% тока пушки сфокусировано в угле 3°. Подача напряжения на пушку, а также на кольцо (см. рис. 1 и раздел 2) осуществлялась путем разрядки линий через тиратроны ТГИ1—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 1 мм длины уплотнения. После предварительной откачки системы до давления $\sim 10^{-6}$ мм Hg вакуумная камера и ловушка прогревались при температуре 350° С в течение 12 час 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 осуществлялся путем быстрого изменения электрического поля, создаваемого специаль-

но от выпрямителей, собранных на германиевых диодах по трехфазной двухполупериодной схеме. Ток каждого соленоида регулируется отдельно от нуля до 140 а, что соответствует магнитному полю в центре соленоида до 2500 э. Для дополнительного сглаживания пульсаций магнитного поля каркасы соленоидов изготовлены из латуни толщиной 10 мм. Максимальные пульсации в центре ловушки не превышают $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ от значения

Питание магнитов осуществляется от выпрямителей, собранных на германиевых диодах по трехфазной двухполупериодной схеме. Ток каждого соленоида регулируется отдельно от нуля до 140 а, что соответствует магнитному полю в центре соленоида до 2500 э. Для дополнительного сглаживания пульсаций магнитного поля каркасы соленоидов изготовлены из латуни толщиной 10 мм. Максимальные пульсации в центре ловушки не превышают $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ от значения

ным электродом в форме полого цилиндра диаметром 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 ⁴⁾.

В отсутствие электрического поля эффективный потенциал аксиального движения заряженной частицы [7] $U = \mu H_z$ пропорционален магнитному полю и имеет вид, изображенный на рис. 2. 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. 2). Если при опущенной магнитной пробке электроны свободно входят внутрь ловушки, то при достаточно быстром подъеме пробки часть электронов оказывается захваченной.

Пушка инжестировала электроны под углом 30° к магнитной силовой линии и устанавливалась на таком расстоянии от магнитной пробки, чтобы основная часть

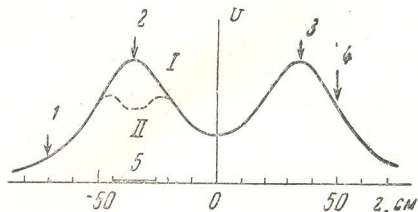


Рис. 2

Рис. 2. Эффе́ктивный потенциал магнитной ловушки на оси: $U = \mu H_z + e\varphi$; I — без электрического поля ($\varphi = 0$), II — с электрическим полем кольца; 1 — место расположения пушки, 2 — первая магнитная пробка, 3 — вторая магнитная пробка, 4 — место расположения коллектора, 5 — расположение кольца

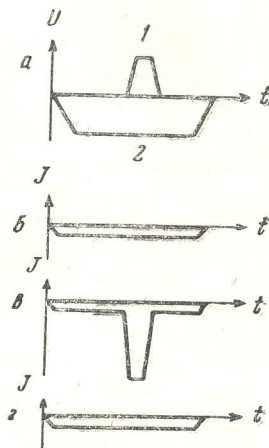


Рис. 3

Рис. 3. Схематический вид осциллограмм тока J и напряжения U : а — напряжение на пушке 2 и кольце I; 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. раздел 2)

электронного пучка отражалась пробкой. Около 10% тока пушки при этом проходило через пробку за счет углового разброса. В процессе настройки системы вторая пробка опускалась 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. 3, б. Длительность тока соответствовала импульсу отрицательного напряжения, подаваемого на катод пушки (анод заземлен), и составляла около 20 мксек (рис. 3, а). 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

⁴⁾ Аналогичная система захвата была использована независимо в [8].

(рис. 3, в). В этих экспериментах ток пушки равнялся 0,1 а. После настройки системы по осциллограммам рис. 3, а, б, в вторая пробка поднималась до такой высоты, чтобы ток, пропущенный кольцом, не проходил через вторую пробку (рис. 3, г). 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 $5 \cdot 10^{-6}$ сек уменьшается всего в два раза. Это связано с тем, что в течение всего времени захвата число электронов в ловушке остается приблизительно постоянным и не зависящим от скорости подъема первой пробки, так как количество выходящих из ловушки электронов компенсируется таким же количеством входящих из пушки. Если бы на электроны не действовали никакие возмущения, то захват происходил бы совершенно одинаково при любой скорости подъема 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. 2), т. е. произвольно изменять начальные условия захваченных электронов.

3. Методика наблюдения

Наблюдение захваченных электронов производилось, в основном, по току на коллектор, который представлял собой сплошную пластинку диаметром 160 мм (рис. 1, 2). Перед коллектором помещены две сетки, на которые подаются различные напряжения для запираания второй 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 поларизованного реле РП-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 см², расположенный на расстоянии 3 мм от стенки вакуумной камеры (рис. 1).

4. Предварительные результаты

На установке ЛН производилось измерение времени удержания $\tau_{уд}$ быстрых электронов с энергией в несколько десятков *кэв* (уменьшение количества захваченных частиц в e раз). Желательно обеспечить максимально возможное время удержания электронов в ловушке и, тем самым, иметь возможность изучать наиболее тонкие эффекты движения их в магнитном поле.

Захваченные в магнитную ловушку быстрые электроны ионизуют остаточный газ, в результате чего происходит компенсация их объемного заряда. Плотность медленных электронов, образовавшихся в результате ионизации, пренебрежимо мала из-за малого времени удержания их в ловушке.

Максимальное время удержания, наблюдавшееся в экспериментах, составляет 15 *сек* при энергии электронов 20 *кэв* и вакууме 10^{-9} *мм* *Нг*.

Экспериментальные результаты в интервале энергии от 5 до 34 *кэв* и в интервале давлений от 10^{-7} до 10^{-9} *мм* *Нг* приведены на графике рис. 4, где по оси абсцисс отложено время в логарифмическом масштабе, а по оси ординат комбинация, составленная из экспериментально измеренных величин: времени удержания ($\tau_{уд}$), энергии электронов (W), давления остаточного газа и среднеквадратичного угла θ^2 , на который должна рассеяться частица, чтобы попасть в запретный конус:

$$A = \frac{\tau_{сек} \cdot P_{тор} \ln(W_{кэв}/3,53)}{\theta^2 W^{3/2}_{кэв}} \cdot 10^9$$

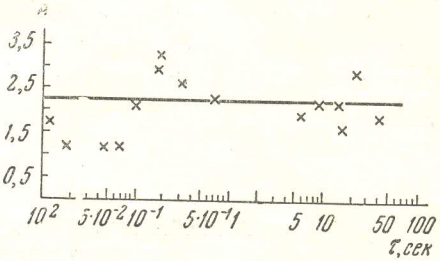


Рис. 4. Экспериментальные результаты в интервале энергий от 5 до 34 *кэв* и в интервале давлений от 10^{-7} до 10^{-9} *мм* *Нг*

Эта комбинация должна оставаться постоянной в различных экспериментах. Ее значение — $2,2 \cdot 10^{-9}$, отмеченное на графике прямой линией, было вычислено согласно [3]. Среднеквадратичный угол θ^2 вычислялся согласно геометрии магнитного поля и условиям инжекции. Так как время удержания $\tau_{уд}$ достигло 15 *сек*, то можно было в течение первых полутора — двух секунд увеличить магнитное поле в два — три раза, что приводило к возрастанию времени удержания вследствие адиабатического нагрева захваченных частиц.

При энергии электронов 20 *кэв*, вакууме 10^{-9} *мм* *Нг* и увеличении магнитного поля в два раза $\tau_{уд}$ достигло 40 *сек*. В последнем случае число колебаний электрона в ловушке достигало $5 \cdot 10^9$, а число ларморовских оборотов 10^{11} . Приведенное время удержания соответствует по порядку величины времени рассеяния электронов на остаточном газе.

Большой разброс экспериментальных точек, приведенных на графике, вызван тем, что измерение вакуума не могло быть произведено с точностью, лучшей чем 50 %.

Величина магнитного поля в центре пробки изменялась от 500 до 1200 э. Для приведенного выше интервала энергий электронов (рис. 4) параметр адиабатичности ($\rho \nabla H / H$, ρ — ларморовский радиус) не превышал 0,04. При увеличении энергии электронов наблюдалось значительное сокращение времени удержания. По предварительным данным граница неадиабатичности соответствует значению $\rho \nabla H / H \sim 0,1$, что согласуется по порядку величины с результатами [3].

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 налаживании установки.

Институт ядерной физики
Сибирского отделения Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16 января 1965 г.

Литература

- [1] С. Н. Родионов. Атомная энергия, **6**, 623, 1959.
- [2] G. Gibson, W. C. Jordan, E. J. Lauer. Phys. Rev. Lett., **5**, 141, 1960.
- [3] G. Gibson, W. C. Jordan, E. J. Lauer. Phys. Fluids, **6**, 116, 1963.
- [4] G. Gibson, W. C. Jordan, E. J. Lauer. Phys. Fluids, **6**, 133, 1963.
- [5] Г. И. Будкер. Сб. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, Изд. АН СССР, т. III, 1958, стр. 3.
- [6] И. М. Самойлов. ПТЭ, **1**, 24, 1959.
- [7] Л. А. Арцимович. Управляемые термоядерные реакции, Физматгиз, 1961.
- [8] M. Barbier. Etude des oscillations non lineaires a l'aide d'un modele analogique à cage d'électrons appliquée au mouvement des particules dans les accélérateurs, CERN, 61—23, Aug. 24, 1961.
- [9] В. И. Волосок, Б. В. Чириков. ЖТФ, **27**, 2624, 1957.

A MAGNETIC MIRROR TRAP FOR PROLONGED CONFINEMENT OF ELECTRONS

A. N. Dubinina, L. Ya. Trainin, B. V. Chirikov

A magnetic mirror trap with a simple system for external injection by an electron gun with a vacuum $\sim 8 \cdot 10^{-10}$ mm Hg and electron confinement time up to 40 sec is described. Electron capture by the trap is based on fast variation of the electric field. The arrangement will be used for a detailed study of prolonged motion of electrons in a magnetic trap and also for a study of the behavior of a rarefied plasma.