

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УДЕРЖАНИЮ ЩЕЛОЧНОЙ ПЛАЗМЫ В ГОФРИРОВАННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Г. И. Будар, В. В. Данилов, Э. П. Кругляков,
Д. Д. Рютов, Е. В. Шунько

Как было показано в работах [1, 2], продольное удержание плотной плазмы (т. е. плазмы с $\lambda < L$, где λ – кулоновская длина свободного пробега, а L – длина установки) может быть существенно улучшено путем перехода от однородного магнитного поля к гофрированному (многопробочному). Ниже сообщается о результатах экспериментов, поставленных с целью проверки эффективности удержания плазмы в такой конфигурации магнитного поля.

В качестве объекта исследования была выбрана низкотемпературная щелочная плазма, поскольку в ней, благодаря большому кулоновскому сечению, легко удовлетворяется условие $\lambda < L$, а возможность получения такой плазмы при поверхностной ионизации позволяет легко регулировать ее параметры.

Вакуумная камера установки представляла собой трубу из нержавеющей стали длиной 249 см и внутренним диаметром 6 см. Камера откачивалась двумя магниторазрядными насосами до $p \sim 2 \cdot 10^{-7}$ тор.

Магнитная система состояла из 27 охлаждаемых катушек двух различных типов. При включении четырнадцати катушек одного типа в камере создавалась многопробочная конфигурация ($H_{\max} = 5400$ э пробочное отношение $k = 1,83$, длина отдельного пробочтрона $\ell = 16$ см). При подключении тринадцати дополнительных катушек удавалось за время $\sim 0,1$ сек перейти к однородному полю ($H = 6400$ э).

В качестве ионизатора паров щелочного металла (цезия, калия) использовался вольфрамовый диск толщиной 1,5 мм, нагреваемый электронной бомбардировкой. В типичных условиях температура в центре диска составляла 2400°К, а перепад температуры от центра к краю не превышал 7% при включенном магнитном поле. Поток атомов цезия¹⁾ на ионизатор можно было регулировать путем изменения температуры стенок металлического контейнера с цезием. Контейнер имел затворное устройство, которое позволяло, в частности, за время порядка 250 мксек прекращать подачу паров цезия.

Концентрация плазмы n определялась с помощью расположенных в различных гофрах шести ленгмюровских зондов, каждый из которых мог перемещаться по радиусу камеры. Зонды были изготовлены из вольфрамовой проволоки со средним диаметром 4 мк, протетой сквозь два параллельных кварцевых капилляра (длина ~ 6 см, диаметр – 80 – 100 мк). Плоскость, проходящая через нить зонда и капилляры, перпендикулярна оси установки. Использование различных комбинаций зондов показало, что зонды не оказывают влияния на параметры плазмы.

¹⁾ Ниже мы для краткости говорим только о цезии, поскольку эксперименты с калием дали аналогичные результаты.

Описываемые ниже эксперименты относятся к двум зондам (именуемым далее первым и вторым), расстояние между которыми равнялось 9 периодам гофрировки. При этом второй зонд располагался на расстоянии одного гофра от конца установки. Длина открытой части первого зонда составляла 5,2 мм, а второго — 3,8 мм. Непосредственно перед каждым измерением зонды прокаливались. Измерения осуществлялись в режиме насыщения ионного тока при смещении, существенно (примерно в 10 раз) превышавшем температуру ионов. В этих условиях ток на зонд пропорционален n и не зависит от температуры плазмы.

Влияние гофрировки на продольное удержание плазмы можно проверить двумя способами: во-первых, с помощью непосредственного измерения времени распада плазмы после импульсного прекращения подачи цезия; во-вторых, с помощью определения продольного перепада плотности плазмы в стационарном режиме.

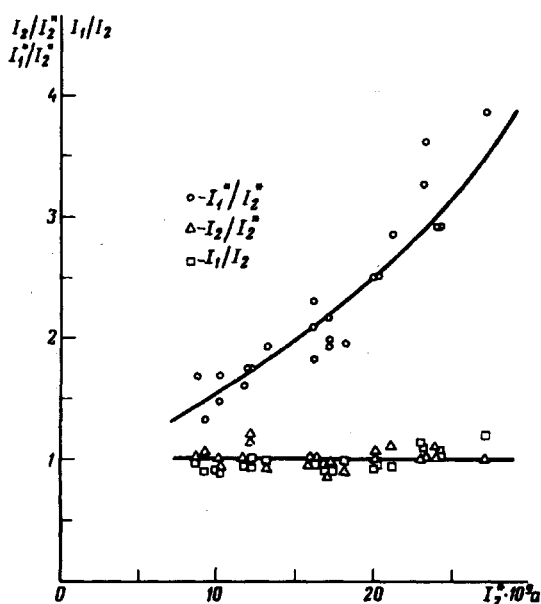


Рис. 1. Влияние гофрировки магнитного поля на продольный перепад плотности. Величины, отмеченные звездочками, относятся к гофрированному полю. Ток 10^{-8} а соответствует концентрации $\sim 10^9$ см⁻³. В отношении I_1^*/I_2^* введена поправка на разные длины зондов

При стационарных измерениях медленно меняющийся за счет нагревания (охлаждения) контейнера поток цезия непрерывно направлялся на ионизатор. Через определенные промежутки времени включалось магнитное поле, причем в каждом включении последовательно реализовались две конфигурации: многопробочная и однородная. Токи с зондов, установленных на оси системы, регистрировались на быстродействующем пятиканальном самописце. Результаты одной из экспериментальных серий показаны на рис. 1. Возможно быстрого перехода к однородному полю позволяла контролировать прохождение плазмы вдоль всей системы. Как видно из рис. 1, $I_1/I_2 \approx 1$, что свидетельствует о 100% прохождении плазмы в однородном магнитном поле. С другой стороны, обнаруженная в области $I_2^* < 2,8 \cdot 10^{-8}$ а близость к единице величины I_2^*/I_2^* означает отсутствие потерь плазмы и в случае гофрировки поля.

Действительно, из-за большой длины свободного пробега ($\lambda > \ell$) плотность плазмы в последнем пробкотроне определяется только проходящим потоком плазмы, который в отсутствие потерь не зависит от номера пробкотрона и равен начальному потоку с ионизатора. Иными словами, в отсутствие потерь плотность плазмы на выходе из установки не должна зависеть от конфигурации поля, что и наблюдалось экспериментально.

В соответствии с теорией [см. 3, 4], отношение I_1^*/I_2^* должно экспоненциально нарастать ($I_1^*/I_2^* = \exp\{AI_2^*\}$) с увеличением I_2^* (т. е. плотности), а в дальнейшем падать с ростом I_2^* . Наши эксперименты подтверждают наличие экспоненциальной зависимости в области не слишком больших плотностей. По найденному из эксперимента значению коэффициента A можно оценить температуру ионов [см. 3, 4], которая оказывается равной $0,5 \text{ эв}$, что представляется вполне разумным, если учесть наличие дебаевского слоя вблизи ионизатора, где ионы набирают направленную энергию, переходящую в тепло в первых нескольких пробкотронах.

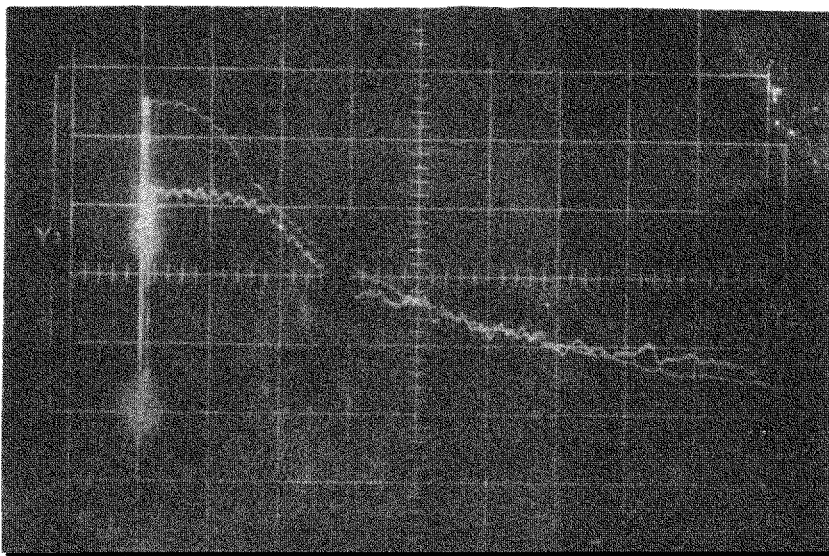


Рис. 2. Осциллограммы зондовых токов в режиме импульсного выключения потока цезия. Чувствительность на нижнем луче (второй зонд) в 2,2 раза выше, чем на верхнем. Развертка 2 мсек на деление

В области $I_2^* > 3 \cdot 10^{-8} \text{ а}$ отношение I_1^*/I_2^* , согласно предсказаниям теории, должно убывать. Такой эффект действительно качественно проявлялся в наших экспериментах, однако, поскольку в области больших плотностей ($I_2^* \gtrsim 3 \cdot 10^{-8} \text{ а}$) не удавалось обеспечить полного прохождения плазмы, соответствующие результаты не допускают однозначной трактовки и в настоящей статье не приводятся.

В качестве примера, иллюстрирующего результаты импульсных измерений, приведен рис. 2. В гофрированном магнитном поле время уменьшения плотности плазмы в два раза равно примерно 4 мсек . Время свободного разлета плазмы в однородном магнитном поле в услови-

ях, соответствующих рис. 2, оказалось порядка 1,5 мсек. Данные импульсных измерений качественно соответствуют предсказаниям теории [см. 3, 4].

Соответствие эксперимента с теорией свидетельствует о перспективности метода продольного удержания плазмы с помощью многих пробкотронов, поскольку та же теория предсказывает, что в интересной для проблемы управляемого термоядерного синтеза задаче о расширении сгустка плазмы со свободными границами использование многопробочной системы увеличивает время жизни плазмы, грубо говоря, в L/l раз по сравнению со случаем однородного поля.

Примечание. Уже после того, как статья была подготовлена к печати, нам стала известна работа Логана, Брауна, Либермана и Лихтенберга (*Phys. Rev. Lett.*, 29, 1435, 20 ноября 1972 г.), в которой было получено качественное подтверждение теории, однако из-за малого числа пробкотронов (5) и больших поперечных потерь количественная трактовка приведенных в этой работе результатов затруднительна.

Институт ядерной физики
Сибирское отделение
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25 декабря 1972 г.

Литература

- [1] Г.И.Будкер, В.В.Мирнов, Д.Д.Рютов. Письма в ЖЭТФ, 14, 320, 1971.
 - [2] Г.И.Будкер, В.В.Мирнов, Д.Д.Рютов. Труды Междунар. конф. по теории плазмы. Киев. 1971.
 - [3] В.В.Мирнов, Д.Д.Рютов. Ядерный синтез, 12, вып. 6, 1972.
 - [4] В.В.Мирнов, Д.Д.Рютов. Труды 5-й Европ. конф. по физике плазмы, Гренобль, 1972, стр. 100.
-