

04

©1992 г.

ИНЖЕКЦИЯ ПЛАЗМЫ ИЗ НЕЗАВИСИМОГО СВЧ ИСТОЧНИКА В ОТКРЫТУЮ МАГНИТНУЮ ЛОВУШКУ

1. ОДНОРОДНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

З.Р.Берия, Г.Е.Гогиашвили, С.И.Нанобашвили

Описываются эксперименты по заполнению открытой магнитной ловушки с однородным магнитным полем плазмой, инжектируемой из независимого СВЧ источника. В источнике плазма с концентрацией от 10^9 до 10^{12} см $^{-3}$ и температурой 3–8 эВ создается в режиме ЭЦР на частоте 2400 МГц (подводимая мощность до 150 Вт) при давлении рабочего газа (Ar, He, Ne) 10^{-5} – 10^{-2} Тор. Расстояние между источником плазмы и ловушкой можно менять в пределах 30–80 см практически без ухудшения эффективности заполнения ловушки плазмой. Подробно изучены характеристики плазмы в ловушке. Показано, что особенно при низких давлениях ($p < 10^{-3}$ Тор) однородность заполнения весьма высока. Кроме того, обнаружено существование группы быстрых электронов, рождаемой в СВЧ источнике плазмы, которая вносит определенный вклад в заполнение ловушки плазмой при высоких давлениях ($p > 10^{-3}$ Тор) путем ионизации нейтрального газа в разрядном баллоне.

Введение

Для заполнения магнитных ловушек различной конфигурации плазмой часто применяются бесконтактные методы, среди которых в последнее время наибольшее распространение получили СВЧ методы ее накопления (см., например, [1–3]). Как правило, формирование плазмы происходит в режиме электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) в самой же ловушке, что не всегда удобно. Действительно, для изучения в „чистом виде“ разнообразных физических процессов при взаимодействии электромагнитных волн с магнитоактивной плазмой, при отработке методов ее нагрева и удержания в магнитных ловушках и т.д. целесообразно инжектировать в исследуемый объем „мишенную“ плазму из отдельного источника „спокойной“ плазмы и менять ее параметры независимо от параметров магнитной ловушки. С этой целью нами был создан стационарный СВЧ источник плазмы, конструкция и характеристики которого подробно описаны в работе [4].

Цель настоящей работы — изучение в широких пределах изменения условий эксперимента характеристик и свойств плазмы, инжектируемой

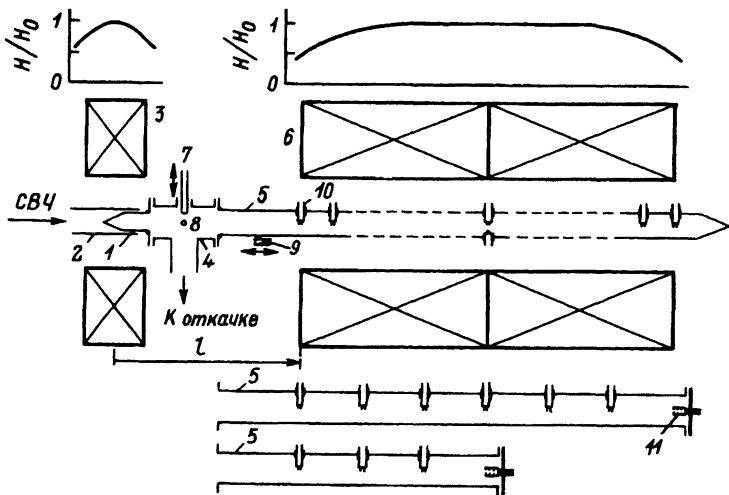


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — разрядная камера; 2 — прямоугольный волновод; 3 — катушка, создающая магнитное поле в источнике; 4 — диагностическая секция; 5 — исследуемый объем; 6 — соленоид; 7, 10 — двойные электрические зонды; 8, 9 — полупроводниковые датчики света; 11 — многосеточный анализатор.

из этого СВЧ источника в открытую магнитную ловушку с однородным магнитным полем.

Описание экспериментальной установки

Эксперименты выполнялись на стационарной установке, схема которой приведена на рис. 1. Установка состоит из двух основных частей: собственно из независимого СВЧ источника плазмы и из открытой магнитной ловушки, в которую и инжектируется плазма.

В СВЧ источнике формирование плазмы осуществляется в кварцевом баллоне 1 с внутренним диаметром 2.6 и длиной 10 см. Подвод стационарной СВЧ энергии (2400 МГц, 150 Вт) к разрядной камере осуществляется стандартным прямоугольным волноводом 2 сечением $7.2 \cdot 3.4 \text{ см}^2$, в котором возбуждается волна TE_{01} . Для согласования с волноводным трактом концу баллона придается коническая форма. Волноводный тракт состоит из стандартных элементов, позволяющих плавно менять подводимую к плазме СВЧ мощность и измерять подводящую и отраженную мощности. Разрядная камера с волноводом помещается в стационарное магнитное поле, создаваемое короткой катушкой 3 с внутренним диаметром 19.5 и длиной 15 см. В катушке создается сильно неоднородное магнитное поле с максимумом в центре катушки. Магнитное поле в центре катушки можно менять плавно от нуля до максимального значения 2000 Э.

Разрядная камера СВЧ источника плазмы подсоединяется к цилиндрической секции 4, изготовленной из нержавеющей стали и являющейся одновременно и диагностической секцией, и запредельным волноводом, не пропускающим СВЧ мощность из источника плазмы в исследуемый объем в магнитной ловушке [4].

К цилиндрической секции 4 с противоположной стороны разрядной камеры источника плазмы соосно с ней подсоединяется исследуемый объем 5, в который и происходит инжекция плазмы. Исследуемый объем с

плазмой размещается в стационарном магнитном поле, создаваемом соленоидом b с внутренним диаметром 19.5 и длиной 90 см. Соленоид состоит из 12 идентичных катушек, расположенных на двух каретках. В каждой катушке по 4 обмотки. Подбором расстояния между каретками и соответствующими подключениями катушек к источнику тока можно получить как однородное магнитное поле, так поле пробочной и многопробочной конфигураций с регулируемым пробочным отношением и ловушку со встречными полями. Максимальное поле на оси соленоида можно менять плавно от нуля до максимального значения 5000 Э. Приведенные в этой работе результаты касаются инъекции плазмы в ловушку с однородным магнитным полем (длина однородной части 50 см, максимальная неоднородность поля на оси около 0.1%).

Расстояние между СВЧ источником плазмы и основным объемом исследований (ловушкой) можно менять в широких пределах ($l=30-90$ см). При расстояниях, больших 30 см, влиянием друг на друга рассеянных магнитных полей катушки источника и соленоида практически можно пренебречь.

В описываемых экспериментах в качестве исследуемого объема 5 использовались стеклянные баллоны с внутренним диаметром 6 и 4 см. Основные эксперименты по изучению характеристик плазмы, накопленной в ловушке, были проведены в баллоне диаметром 4 см и длиной 115 см. Только лишь в экспериментах, связанных с пучком быстрых электронов, использовались баллоны диаметром 6 см и длиной 115 см и 65 см.

В процессе экспериментов для определения эффекта заполнения и изучения характеристик плазмы в ловушке (концентрации и температуры электронов) использовались передвижной вдоль баллона 5 полупроводниковый датчик света 9 и двойные электрические зонды 10, введенные по оси баллона в 13 сечениях с шагом 7.5 см. Кроме того, в центральной части ловушки в трех сечениях введены по четыре двойных электрических зонда, размещенных на разном радиусе баллона для определения распределения параметров плазмы. Электрические зонды можно также использовать для локального определения спектра собственных колебаний плазмы.

Что касается определения продольной энергии электронов, то оно осуществлялось размещенным на конце баллона многосеточным анализатором 11, аналогичным описанному в работе [5].

В описываемых экспериментах рабочим газом служили аргон, гелий и неон. Плазма в СВЧ источнике создавалась при давлении рабочего газа от 10^{-5} до 10^{-2} Тор. Вакуумная система предварительно откачивалась до давления 10^{-8} Тор.

Характеристики плазмы в ловушке

Характеристики плазмы, инжектируемой из независимого СВЧ источника, подробно описаны в работе [4]. Лишь коротко напомним, что из СВЧ источника можно было получить плазму с регулируемой концентрацией от 10^9 до 10^{12} см $^{-3}$ и температурой $T_e=2-10$ Эв. Что касается распределения концентрации по радиусу, то при низких давлениях и сравнительно небольших подводимых СВЧ мощностях к источнику оно монотонно спадает от центра к периферии. С повышением давления профиль концентрации заметно уплощается, а повышение подводимой СВЧ мощности ($P > 100$ Вт) приводит к расслоению плазмы с образованием

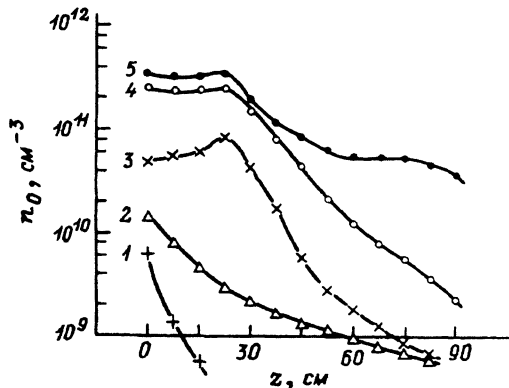


Рис. 2. Распределение концентрации плазмы вдоль соленоида при значениях магнитного поля, равных 0 (1), 100 (2), 400 (3), 1000 (4), 1600 Э (5), и $p = 3 \cdot 10^{-3}$ Тор.

нескольких максимумов концентрации по сечению. Плазма с такими параметрами из СВЧ источника инжектировалась в однородное магнитное поле, создаваемое соленоидом.

На рис. 2-6 приведены характерные картины распределения концентрации плазмы в аргоне вдоль ловушки (подводимая СВЧ мощность $P=100$ Вт), снятые в различных условиях эксперимента с помощью двойных электрических зондов 10 (аналогичные данные получены и со светового датчика 9). Что касается температуры электронов, то она практически не меняется и находится в пределах нескольких электрон-вольт.

Из рис. 2 видно, что при давлении аргона $3 \cdot 10^{-3}$ Тор концентрация плазмы в отсутствие магнитного поля (кривая 1) быстро падает и практически не заходит в исследуемый объем 5. Эксперименты показали, что характерная длина спада сильно зависит от давления нейтрального газа и с его увеличением она уменьшается и при давлении $p > 5 \cdot 10^{-3}$ Тор плазма уже не выходит за пределы диагностической секции 4.

Наложение магнитного поля приводит к сжатию плазменного шнура и его полному отрыву от стенок камеры. Кроме того, оно приводит к эффективному затягиванию плазмы в ловушку. С увеличением магнитного поля происходит более однородное заполнение ловушки плазмой (рис. 2, кривые 2-5).

Из рис. 2 видно также, что в начальной части ловушки (откуда инжектируется плазма) при увеличении магнитного поля происходит даже некоторое увеличение концентрации плазмы, которое потом сменяется монотонным спадом. Это увеличение концентрации связано с увеличением в этой области магнитного поля (рис. 1) и сжатием плазмы. Это сжатие наглядно видно из светового излучения [6]. Затем в однородной части поля ловушки происходит монотонный спад концентрации вследствие поперечной диффузии частиц. Увеличение магнитного поля соленоида приводит к уменьшению эффективности поперечной диффузии и, как следовало ожидать, более однородному заполнению ловушки плазмой (рис. 2, кривые 2-5).

Однородность заполнения ловушки зависит не только от величины магнитного поля, но и от давления нейтрального газа. Как видно из рис. 3, если при давлении аргона $3 \cdot 10^{-3}$ Тор (кривая 1) концентрация плазмы вдоль ловушки еще довольно быстро падает, то при давлении

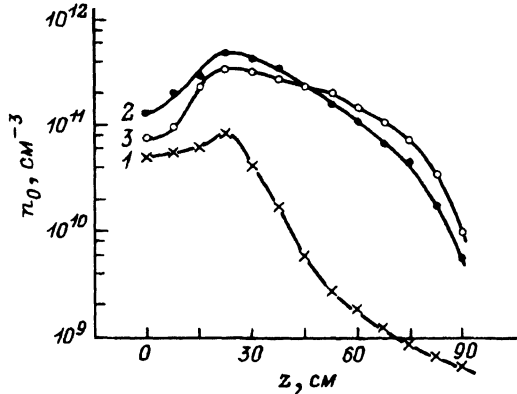
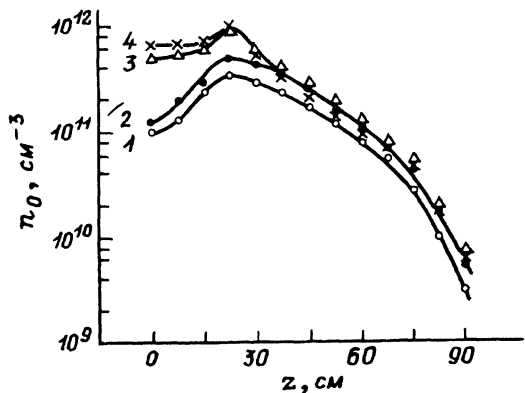


Рис. 3. Распределение концентрации плазмы вдоль соленоида при давлениях нейтрального газа, равных $3 \cdot 10^{-3}$ (1), $7 \cdot 10^{-4}$ (2), $3 \cdot 10^{-4}$ Тор(3), и $H_t = 400$ Э.

Рис. 4. Распределение концентрации плазмы вдоль соленоида при значениях магнитного поля, равных 100(1), 400(2), 1000(3), 1600 Э (4), и $p = 7 \cdot 10^{-4}$ Тор.



$p < 10^{-3}$ Тор это падение резко уменьшается и даже при сравнительно небольших значениях магнитного поля ловушки ($H_t = 400$ Э) однородность заполнения весьма высока (кривые 2,3).

Как показали эксперименты, при низких давлениях ($p < 10^{-3}$ Тор) и значении магнитного поля ловушки $H_t \geq 100$ Э однородность заполнения и характеристики плазмы в центральной области ловушки (в основном концентрация плазмы и ее распределение по сечению) практически не зависят от величины магнитного поля (рис. 4). То, что в начальной части ловушки с увеличением магнитного поля плотность плазмы растет и различие между ними значительно, можно, по-видимому, связать с особенностями изменения градиента магнитного поля в этой части. Но на данном этапе исследований выяснение причины этого явления не входит в нашу задачу. Самое главное то, что в рабочей части ловушки характеристики плазмы практически не зависят от величины магнитного поля. Это обстоятельство открывает большие возможности проведения экспериментов в широком диапазоне изменения величины магнитного поля. Например, это обстоятельство весьма привлекательно при исследовании физических процессов взаимодействия электромагнитных волн с магнитоактивной плазмой при отработке ВЧ и СВЧ методов нагрева плазмы, при исследовании удержания плазмы в открытой магнитной ловушке и во многих других случаях.

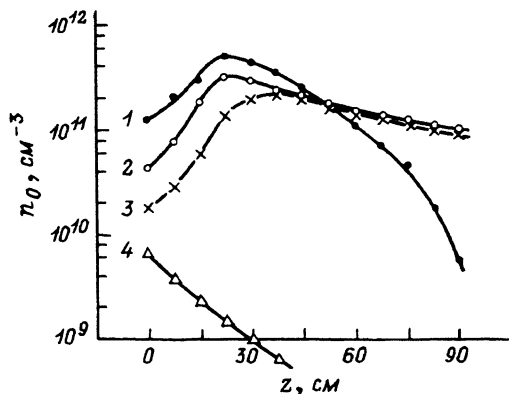


Рис. 5. Распределение концентрации плазмы вдоль соленоида при различных расстояниях между источником плазмы и соленоидом.
 l , см: 1 — 30, 2 — 50, 3 — 70, 4 — 90;
 $p = 7 \cdot 10^{-4}$ Тор, $H_t = 400$ Э.

Все приведенные выше результаты получены при расстоянии между СВЧ источником плазмы и ловушкой $l=30$ см. Увеличение этого расстояния вплоть до 80 см не только не приводит к ухудшению, но даже улучшает однородность заполнения ловушки плазмой (рис. 5). Однако при $l \geq 90$ см плазма уже практически не инжектируется в ловушку (кривая 4), несмотря на то, что как видно из этого рисунка, плотность плазмы на оси баллона у входа в ловушку не очень сильно уменьшается. С другой стороны, необходимо отметить, что при больших l существенно уменьшается диаметр плазменного столба, т.е. значительно уменьшается общее число частиц. По-видимому, это обстоятельство и играет решающую роль в балансе и в конечном счете в затягивании плазмы в ловушку. Конечно, это предположение требует дополнительной проверки.

Несмотря на это, несомненно, что расстояние между СВЧ источником плазмы и ловушкой до $l=80$ см вполне достаточно в подавляющем большинстве экспериментов по инжекции плазмы в открытую магнитную ловушку.

В предыдущей работе [4] нами было показано, что в СВЧ источнике плазму можно поддерживать как в режиме ЭЦР ($\omega = \omega_{He}$, $H_s = H_c$, $\omega_{He} = eH/mc$, $H_c = (m\omega c)/e$), так и при магнитных полях $H_s < H_c$ ($\omega > \omega_{He}$), когда концентрация плазмы достаточно велика и в объеме плазмы выполняется условие верхнего гибридного резонанса (ВГР),

$$\omega^2 = \omega_p^2 + \omega_{He}^2, \quad \omega_p = \left(\frac{4\pi e^2 n}{m} \right)^{1/2}.$$

Все приведенные выше результаты по исследованию характеристик плазмы в ловушку касались случая, когда в источнике плазма поддерживалась в режиме ЭЦР. Кроме того, нами в описываемых экспериментах были проведены аналогичные измерения характеристик плазмы в ловушке и в случае, когда в СВЧ источнике плазма поддерживалась уже в режиме ВГР ($H_s = 0.9H_c$). Результаты, по крайней мере при низких давлениях аргона, когда $p < 10^{-3}$ Тор, показали почти полную их идентичность со случаем, когда $H_s = H_e$ (рис. 6). Несомненно, это обстоятельство также можно расценить как положительную черту такого способа заполнения ловушки плазмой.

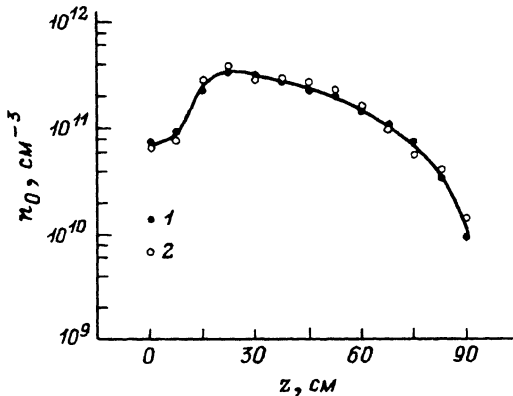


Рис. 6. Распределение концентрации плазмы вдоль соленоида при магнитных полях в источнике плазмы $H_s = H_c(1)$, $H_s = 0.9H_c(2)$ и $p = 3 \cdot 10^{-4}$ Тор, $H_t = 400$ Э.

В описанных выше экспериментах рабочим газом служил аргон, но нами был проведен полный цикл экспериментов и на других газах, в частности гелии и неоне. Эксперименты показали, что характер изменения параметров плазмы в ловушке практически идентичен, только лишь абсолютные значения параметров (в основном концентрация) отличаются незначительно, что, очевидно, можно связать с различным значением сечения ионизации атомов в разных газах.

Что касается измерения с помощью двойных зондов флуктуации плотности плазмы в ловушке, то оказалось, что во всем исследовавшемся диапазоне условий наблюдались колебания концентрации на довольно низком уровне с частотой 50–100 кГц.

Об образовании пучка быстрых электронов

Обработка вольт-амперных характеристик, снятых в ходе экспериментов с помощью двойных электрических зондов, практически во всем исследовавшемся диапазоне условий показали наличие в магнитной ловушке двухтемпературной плазмы: холодной компоненты в несколько электрон-вольт и горячей порядка нескольких сот электрон-вольт. Кроме того, как указывалось в работе [7], в СВЧ разряде в области поглощения формируется не только холодная плазма, но и продольный пучок быстрых электронов, энергия которых лежит также в области нескольких сот электрон-вольт.

Вот эти обстоятельства и обусловили проведение нами серии измерений по обнаружению продольного пучка быстрых электронов. В этих экспериментах в качестве исследуемого объема 5 (рис. 1), как уже указывалось выше, использовались стеклянные баллоны диаметром 6 см и длиной 115 и 65 см, на концах которых для определения продольной энергии электронов размещались многосеточные анализаторы энергии, аналогичные описанным в работе [5].

Как показали измерения, действительно, в условиях наших экспериментов в плазме присутствует пучок быстрых электронов, энергия которых в зависимости от режима разряда меняется от ~ 30 до ~ 300 эВ. Можно выделить несколько режимов, при которых энергия пучка электронов отличается друг от друга, но среди них два режима выделяются наиболее четко. Это режим разряда при низких давлениях — давление

нейтрального аргона $p < 10^{-3}$ Тор и режим при высоких давлениях — $p > 10^{-3}$ Тор.

При низких давлениях нейтрального аргона ($p < 10^{-3}$ Тор) продольная энергия электронов в пучке ~ 300 эВ как в центре ловушки, так и на ее конце. Оценки показывают, что в аргоне длина свободного пробега электронов с энергией 300 эВ в этой области давлений больше длины системы. Поэтому очевидно, что электроны пучка не теряют энергию на ионизацию нейтрального газа и их энергия вдоль пучка не должна изменяться, что хорошо соответствует экспериментальным результатам. Отсюда можно сделать два заключения. То, что в области рождения пучка энергия электронов должна быть также ~ 300 эВ и что при низких давлениях накопление плазмы в ловушке происходит только лишь за счет диффузии „первичной“ плазмы из СВЧ источника вдоль магнитного поля, а не за счет ионизации нейтрального газа электронами пучка.

При высоких давлениях нейтрального аргона ($p > 10^{-3}$ Тор), как показывают оценки, длина свободного пробега электронов с энергией 300 эВ становится меньше длины системы. При $p = 3 \cdot 10^{-3}$ Тор длина свободного пробега $\lambda_i \simeq 50$ см. Поэтому при движении вдоль баллона электроны пучка должны производить на длине свободного пробега в среднем один акт ионизации и потерять часть энергии. Как известно, при одном акте ионизации в аргоне электрон теряет примерно 40 эВ. Таким образом, уменьшение длины баллона l (рис. 1) на 50 см должно привести к увеличению энергии электронов пучка на ее конце примерно на 40 эВ по сравнению с длинным баллоном. Действительно, эксперименты показали, что если энергия электронов пучка на конце длинного баллона (т.е. на конце ловушки) ~ 200 эВ, то при уменьшении длины баллона на 50 см (т.е. в центре ловушки) оно составляет ~ 230 – 250 эВ. Разница между двумя этими случаями составляет ~ 40 эВ, что находится в хорошем согласии с расчетами. В этом случае таким же образом можно оценить энергию электронов пучка в области их рождения. Она оказалась равной ~ 300 эВ, т.е. такой, как и в случае низких давлений. Очевидно, это обстоятельство дает возможность сделать заключение, что механизм возникновения быстрых электронов не зависит от давления нейтрального газа.

Кроме того, можно заключить, что в области высоких давлений накопление плазмы в ловушке происходит как за счет диффузии „первичной“ плазмы из СВЧ источника (несмотря на то, что эффективность по сравнению с режимом низкого давления значительно ниже), так и за счет ионизации нейтрального газа пучком быстрых электронов. По-видимому, это обстоятельство и определяет резкое отличие градиента концентрации плазмы вдоль баллона в случае низкого и высокого давлений (см., например, рис. 3).

Нами был проведен аналогичный цикл экспериментов и в гелии. Результаты обеих серий экспериментов находятся в полном согласии. И в гелиевой плазме при низких давлениях энергия пучка не меняется вдоль баллона и составляет ~ 250 – 300 эВ, а при высоких давлениях электроны на длине свободного пробега теряют энергию, необходимую для одного акта ионизации, т.е. ~ 50 – 60 эВ. Оценки в этом случае энергии электронов пучка в области их рождения дают также значение ~ 250 – 300 эВ.

Таким образом, совокупность экспериментальных данных дает возможность сделать общее заключение, что механизм возникновения пучка

быстрых электронов, кроме того, что не зависит от давления нейтрального газа, не зависит и от рода газа.

Что касается самого механизма образования пучка быстрых электронов, то, к сожалению, имеющиеся экспериментальные данные пока не позволяют представить ясную картину. Можно только предположить, что пучок образуется в самом СВЧ источнике плазмы вследствие ускорения электронов в области ЭЦР или в поле плазменной волны, которая в свою очередь появляется вследствие трансформации волны накачки в сильно неоднородной плазме и в сильно неоднородном магнитном поле СВЧ источника плазмы. Конечно, все эти предположения требуют экспериментального подтверждения и дальнейших исследований.

Заключение

Таким образом, эксперименты показали эффективность действия независимого стационарного СВЧ источника плазмы, с помощью которого легко можно заполнить „спокойной“ плазмой открытую магнитную ловушку с однородным полем. Параметры плазмы можно менять в широких пределах практически независимо от напряженности магнитного поля ловушки. Можно получить плазму в ловушке как с резким спадом концентрации по длине, так и почти однородным распределением. Кроме того, можно регулировать распределение концентрации и по сечению от пикированной на оси до однородного почти по всему диаметру баллона и с резким спадом около границы. Расстояние между источником плазмы и ловушкой можно менять до $l \leq 80$ см и оно практически не влияет на эффективность заполнения ловушки плазмой.

Совокупность экспериментальных данных дает возможность заключить, что такой способ заполнения плазмой открытой магнитной ловушки с однородным полем с успехом можно применить в разнообразных физических экспериментах.

Что касается экспериментов по заполнению открытой магнитной ловушки пробочной конфигурации, то оно составляет цель последующих исследований.

Список литературы

- [1] *Anisimov A.I., Budnikov V.N., Vinogradov N.I. et al. // Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res. 1969. Vol. 11. P. 399-413.*
- [2] *Залесский Ю.Г., Комаров А.Д., Лаврентьев О.А. и др. // Физика плазмы. 1979. Т. 5. № 5. С. 954-957.*
- [3] *Nanobashvili S., Datlov J., Stöckel J., Zacek F. // Czech. J. Phys. 1987. Vol. B37. P. 194-200.*
- [4] *Гогияшвили Г.Е., Нанобашвили С.И., Ростомашвили Г.И. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 9. С. 1746-1750.*
- [5] *Галактионов Б.В., Долматова К.А. // Диагностика плазмы. М., 1963. С. 247-255.*
- [6] *Gogiashvili G.E., Nanobashvili S.I., Rostomashvili G.I. // Proc. 17th Intern. Conf. on Phenomena Ionized Gases. Budapest, 1985. P. 951-953.*
- [7] *Будников В.Н., Галактионов Б.В., Новик К.М. и др. // ЖТФ. 1973. Т. 43. Вып. 3. С. 525-534.*

Институт физики
Тбилиси

Поступило в Редакцию
26 июня 1991 г.