

НАГРЕВ ПЛАЗМЫ В ОСТРОУГОЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ИНЖЕКЦИИ.

*М.С.Израффе, Б.И.Канаев, В.Л.Пастухов,
В.В.Литерский, Е.Е.Юшманов*

В кольцевой остроугольной ловушке с электростатическим запираем шелей получен специфический высоковакуумный разряд, позволяющий производить нагрев плазмы по типу омического.

Магнито-электростатическая ловушка (МЭЛ) представляет собой остроугольную магнитную систему, в которой утечка через острия заперта электростатическими барьерами, создаваемыми путем применения узких (порядка дебаевского радиуса) щелей с заземленными стенками и отрицательных запирающих электродов ("отражателей"), расположенных позади. Наиболее удобный способ нагрева плазмы в МЭЛ – это инжекция электронного пучка из области отражателя [1]; другой применяемый способ – СВЧ нагрев [2]. Типичная величина получаемых в экспериментах температур электронов и ионов составляет $50 \div 100$ эВ при плотности $\approx 10^{11} \div 10^{12}$ см⁻³ [3].

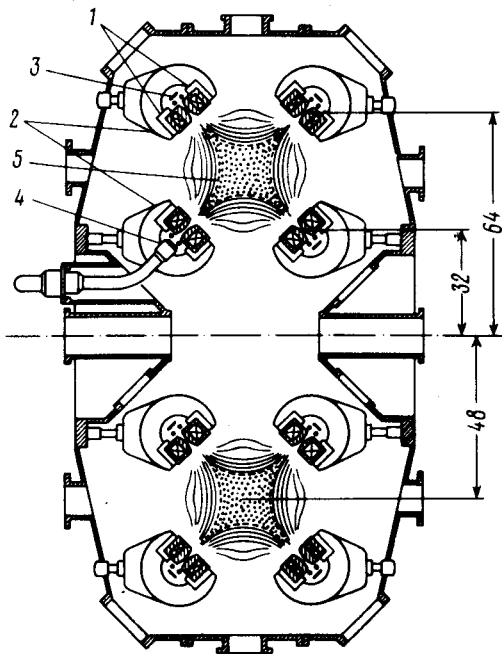


Рис.1. Схема ловушки АТОЛЛ:
1 – катушки магнитного поля,
2 – удерживающие обоймы, 3 –
отражатели, 4 – электронная
пушка, 5 – плазма. Размеры в
сантиметрах

На установке АТОЛЛ был выявлен новый механизм введения энергии в плазму, не имеющий аналогии среди других способов, применявшихся для нагрева в МЭЛ или ловушках иного типа. Схема установки показана на рис.1, некоторые детали магнитной щели – на рис.2. Электронная пушка 4 представляет собою накаливаемый эмиттер, замещающий небольшую часть одного из отражателей. Дополнительные электроды 3 (рис.2)

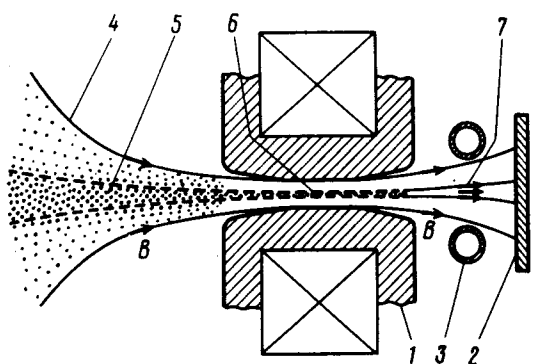


Рис.2. Схема магнитной щели: 1 – корпус катушки, образующий щель; 2 – отражатель; 3 – дополнительный электрод; 4 – силовая линия ограничивающая объем ловушки; 5 – центральная область плазмы с наибольшим отрицательным потенциалом; 6 – коридор ухода для ионов; 7 – поток уходящих ионов

служат для запираия вторичной эмиссии с отражателей и тока эмиссии пушки. В "обычном" режиме водородная плазма создается и поддерживается электронным током пушки и, главным образом, током вторично-эмиссионных электронов, выбиваемых с отражателей падающими на них ионами и втягиваемых затем в ловушку под действием потенциала отражателей, составляющего обычно около 2 кВ. Сама плазма в ловушке принимает отрицательный потенциал масштаба 1 кВ. Подача отрицательного потенциала на дополнительные электроды, большего, чем на отражатели, прекращает инжекцию электронов и приводит к распаду плазмы. Однако при достаточно большом магнитном поле (выше 15 кГс в малых щелях) оказывается возможным существование такого состояния, когда плазма с обычными параметрами ($n \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $T_e \approx 30 \text{ эВ}$, $T_i \approx 50 \div 100 \text{ эВ}$, $P \approx 10^{-6} \text{ тор}$) самоподдерживается в ловушке без какого бы-то ни было поступления электронов извне. Это состояние представляет своеобразный высоковакуумный разряд (между отражателями и землей) с током 10 А и более, в котором электродные процессы не участвуют, а источником нагрева плазмы являются токи, протекающие внутри нее самой между областями с различным потенциалом; материальный баланс плазмы поддерживается за счет ионизации нейтрального водорода.

Какие механизмы приводят к установлению этого состояния? Их специфика определяется геометрией МЭЛ. Уход электронов из ловушки вдоль магнитного поля заперт электростатическими барьерами между щелями и отражателями, однако имеет место достаточно интенсивный перенос электронов поперек магнитного поля на стенки щелей (природу этого переноса оставляем в стороне). Эти потери должны быть уравновешены такими же потерями ионов. Последние не могут уходить, как электроны, на стенки, поскольку находятся относительно них в глубокой потенциальной яме, но зато свободно уходят вдоль магнитного поля на отражатели. Интенсивность этих ионных потерь подстраивается под потери электронов за счет величины потенциала плазмы. Если бы потенциал был нулевым, ионы уходили бы свободно через всю ширину магнитной щели, и этот уход превышал бы уход электронов; чтобы снизить его, плазма принимает упомянутый выше отрицательный потенциал, вследствие чего ионам остается для ухода лишь узкий коридор в центре щели (рис.2), а в остальных частях щели их уход заперт электростатическим барьером, создаваемым полем заземленных стенок щели.

Такова причина возникновения отрицательного потенциала плазмы. Прямые наблюдения показали, что в поперечном направлении его абсолютная величина заметно уменьшается к периферии еще в пределах ловушки, так что внутри плазмы существует значительное электрическое поле масштаба 50 В/см. Это поле и является главным фактором процесса "самонагрева": диффундирующие наружу электроны, проходя разность потенциалов, приобретают энергию, часть которой путем обратной теплопроводности передается в центральные области ловушки, покрывая затраты на ионизацию, излучение и пр., т. е. обеспечивая поддержание плазмы. Ионы получают свою энергию за счет этого же электрического поля, ускоряющее действие которого превосходит заворачивающее действие относительно слабого магнитного поля (около 300 Гс на границе плазмы), вследствие чего рожденный на периферии ион "скачивается" на дно потенциальной ямы, т. е. в центр плазменного образования, и совершает в дальнейшем периодическое движение типа циклоидального. Кулоновские столкновения при этом не играют роли, так как времена τ_{ii} и τ_{ie} намного превосходят время жизни ионов в ловушке.

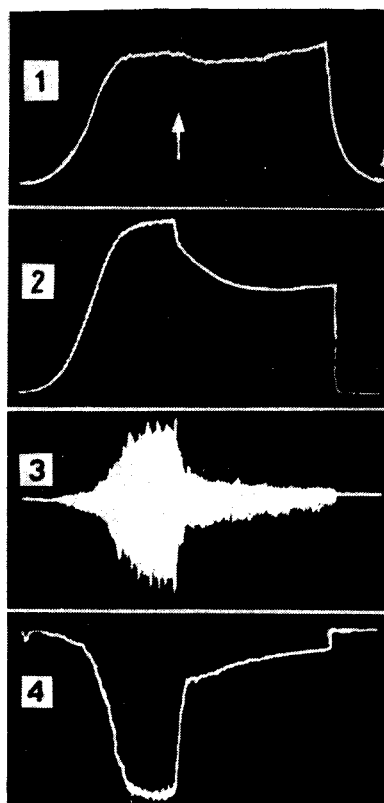


Рис.3. Режимы с инъекцией и без инъекции при $B > 15$ кГс. Развертка 8 мсек. Стрелка указывает момент записи инъекции: 1 — сигнал радиоинтерферометра; 2 — ток ионов на отражатели; 3 — сигнал шумов с зонда; 4 — электронный ток на электрод, расположенный за границей плазмы

Таковы механизмы, действующие в АТОЛЛЕ в режиме самоподдержания плазмы. С некоторой условностью описанный нагрев можно определить как "поперечный омический", указывая этим, что нагрев совершается токами, протекающими в поперечных электрических полях. Одним из условий осуществления режима самоподдержания является, как

отмечалось, достаточно сильное магнитное поле. Эта его роль, по-видимому, связана с тем, что при увеличении B понижается интенсивность поперечного переноса электронов, а следовательно, обязан понизиться и уход ионов, для чего плазма увеличивает свой отрицательный потенциал; это увеличение потенциала, в свою очередь, усиливает омический нагрев, делая возможным самоподдержание. Другим условием является чистота водорода: в присутствии около 5% примесей (например, N_2) описанный разряд начинает гаснуть. Это вызывается, по-видимому, тем, что примеси, во-первых, увеличивают радиационные потери и, во-вторых, уменьшают отрицательный потенциал плазмы, поскольку более тяжелые ионы вытекают из ловушки с меньшей скоростью и поэтому коридор в щели нужен более широкий.

Достоинством безынжекционного нагрева является его очевидная техническая простота, которую даже можно назвать "идеальной", поскольку для осуществления нагрева не требуется ничего, кроме той комбинации магнитного и электрического полей, которая образует саму ловушку. Другое преимущество имеет физический характер и заключается в том, что при таком нагреве в плазме отсутствуют электронные пучки, обычно порождающие неустойчивости. Тем самым, в этом случае можно ожидать лучшего удержания, что качественно подтверждается экспериментами на АТОЛЛЕ. На рис.3 видно, что в то время, как при переходе в безынжекционный режим плотность плазмы в ловушке практически не изменяется, ток ионных потерь становится меньше; видно также, что уменьшаются уровень шумов и интенсивность переноса электронов поперек магнитного поля.

Поступила в редакцию
6 октября 1981 г.

Литература

- [1] Азовский Ю.С., Карпухин В.И., Лаврентьев О.А. и др. Физика Плазмы, 1980, 6, 256.
- [2] Залесский Ю.Г., Комаров А.Д., Лаврентьев О.А. и др. Физика Плазмы, 1979, 5, 954.
- [3] Gormerano C. Nucl. Fus., 1979, 19, 1094.