

## УДЕРЖАНИЕ ПЛАЗМЫ В ТРЕХМЕРНОЙ ЛОВУШКЕ, ОБРАЗОВАННОЙ СВЧ КВАЗИПОТЕНЦИАЛОМ

*Г.С. Лукьяничков*

Существование усредненного квазипотенциала  $\phi = e^2 E^2 / 4 m \omega^2$ , создаваемого электромагнитным полем с амплитудой  $E$  и частотой  $\omega$  [1], позволяет провести трехмерное удержание редкой плазмы ( $\omega_p < \omega$ ) без применения постоянного магнитного поля. В настоящей работе произведена попытка удержать сгусток плазмы силами усредненного СВЧ потенциала. Схема эксперимента такова (см. рис.1): трехмерная квазипотенциальная ловушка создается в цилиндрическом резонаторе диаметром 9 см и длиной 12 см путем возбуждения СВЧ генератором дециметрового диапазона моды  $E_{011}$ , в которой электрическое поле в центре равно 0. Источником плазмы служила искровая пушка 2, плазменная струя из которой могла проходить через центр резо-

натора. Длительность генерации плазмы пушкой  $0,2 \pm 0,5$  мксек. В эксперименте минимальная высота барьера ловушки  $700$  эв, добротность резонатора  $750$ , длительность СВЧ импульса  $7 + 9$  мксек, вакуум  $3 \cdot 10^{-7}$  тор, плотность плазмы струи в центре резонатора  $5 \cdot 10^9$  частиц/см<sup>3</sup>.

Задерживая время включения СВЧ генератора относительно момента срабатывания пушки, можно исследовать два возможных режима. Первый режим – струя плазмы, подходя к резонатору, встречает на своем

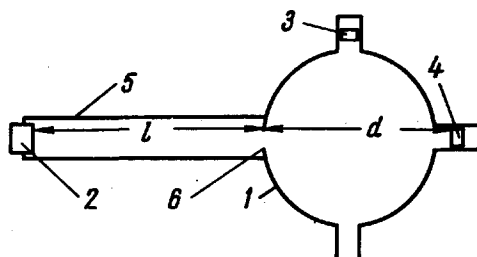


Рис.1. Расположение искровой пушки и зондов: 1 – резонатор; 2 – искровая пушка; 3,4 – плазменные зонды; 5 – пролетная труба; 6 – диафрагма диаметром  $0,6$  см

пути уже созданный СВЧ барьер,  $T < 11$  мксек ( $T$  – время между моментом срабатывания пушки и моментом окончания СВЧ импульса), второй – СВЧ генератор включается тогда, когда плазма уже вошла в резонатор.  $T > 11$  мксек.

На осциллограмме зонд 4 (рис.2,а) видно, что во время импульса фокусирующей СВЧ мощности (рис.2,б) плазма на зонд не проходит и попадает на него через интервал  $t$  после окончания СВЧ импульса. Теоретически плазма, подошедшая к диафрагме 6 во время СВЧ импульса, не может проникнуть в резонатор и должна зеркально отразиться в пролетную трубу. На зонд должна попасть лишь плазма, подошедшая к диафрагме позже момента окончания СВЧ импульса. Эта плазма имеет скорость меньше, чем  $l/T$ , и появится на зонде 4 через время  $t$  большее  $(d/l)T$ . Если  $t < (d/l)T$ , то можно считать, что регистрируется плазма, захваченная в центре резонатора. На рис.3 показаны экспериментальные точки и прямая  $t = (d/l)T$ . Видно, что в первом режиме, при  $T < 11$  мксек захвата плазмы нет и формула  $t = (d/l)T$  хорошо соответствует эксперименту.

Во втором режиме, при  $T > 11$  мксек, плазма приходит на зонд 4 раньше, чем это следует из формулы  $t = (d/l)T$ . Это явление можно было бы объяснить появлением достаточно быстрой компоненты плазмы в момент включения СВЧ мощности, однако результаты эксперимента в первом режиме свидетельствуют об отсутствии эффекта ускорения плазмы в момент окончания СВЧ импульса. Приход плазмы на зонд 4 раньше, чем она может появиться из диафрагмы, означает, что ее

источник находится где-то ближе, при этом на зонде 3 сигнал отсутствует, что отвергает пробой на остаточном газе как причину раннего прихода плазмы на зонд 4. Пробой дал бы одинаковую картину на обоих

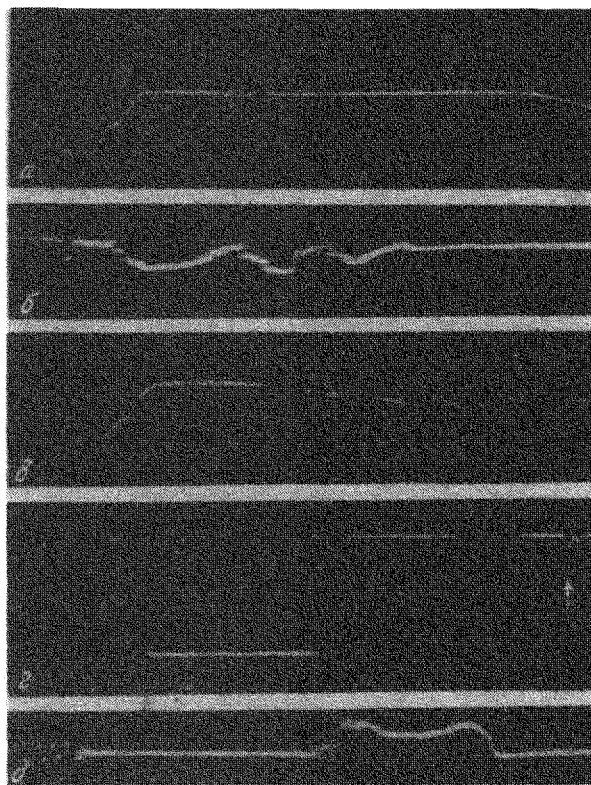


Рис. 2. Осциллограммы уровня мощности моды  $H_{111}$  и зондовых сигналов

зондах. Полученный результат свидетельствует о захвате плазмы СВЧ рельефом. Отсутствие сигнала на зонд 3 можно объяснить тем, что захваченная плазменная струя не успела хаотизироваться по всем направлениям.

Кроме зондовой применялась микроволновая диагностика. Была осуществлена возможность, позволяющая возбуждать в резонаторе еще одну моду —  $H_{111}$  на малом уровне мощности и наблюдать за ее уровнем. Благодаря тому, что мода  $H_{111}$  возбуждается на более длинной волне и распределение электрического поля в этой моде имеет максимум в центре резонатора, условия резонатора на этой диагностической моде нарушаются сгустком плазмы в центре резонатора гораздо легче, нежели условия резонанса для фокусирующей моды  $E_{011}$ . На рис. 2(а и е) приведены осциллограммы уровня мощности моды  $H_{111}$ . Появление сиг-

нала связано с полной расстройкой резонатора на этой моде из-за нахождения в нем плазмы. Теоретически и экспериментально выяснено, что для расстройки резонанса на моде  $H_{111}$ , аналогичной наблюдаемой (рис.2,  $\epsilon$ ), необходимо, чтобы в центре резонатора находилось н. мень-

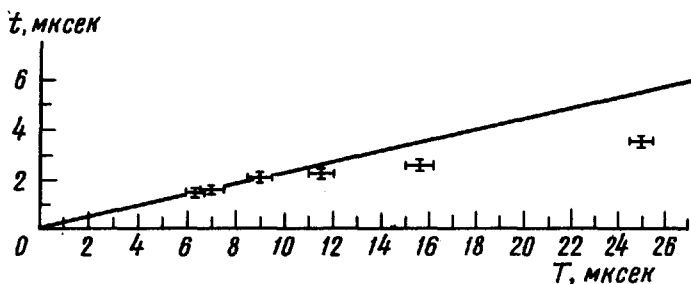


Рис.3. Задержка прихода плазмы на зонд в зависимости от времени между моментом срабатывания пушки и концом СВЧ импульса

ше  $10^9$  частиц. В момент включения СВЧ импульса в фокусирующей области было  $5 + 1,10^{10}$  частиц. Приведенные факты соответствуют теоретическим представлениям о возможности трехмерного удержания плазмы СВЧ квазипотенциалом.

На рис.2 приведены полученные в эксперименте осциллограммы зондовых сигналов и осциллограммы уровня мощности моды  $H_{011}$ .

$a$  — расстройка резонанса на моде  $H_{111}$ . Слева видна нулевая линия. Отклонение луча вверх свидетельствует об уменьшении уровня мощности моды  $H_{111}$  из-за расстройки резонатора плазмой, поступающей из диафрагмы  $b$  (фокусирующая СВЧ мощность = 0).  $b$  — сигнал на зонд  $4$ , вызванный струей плазмы из диафрагмы (фокусирующая СВЧ мощность = 0). Отклонение луча вниз соответствует приходу плазмы на зонд. Слева видна наводка, возникающая в момент срабатывания пушки,  $\epsilon$  — расстройка резонанса на моде  $H_{111}$  (фокусирующая СВЧ мощность включена после попадания плазмы в резонатор). То, что осциллограмма  $B$  практически совпадает с осциллограммой  $a$ , свидетельствует о том, что после включения СВЧ мощности плазма продолжает оставаться в резонаторе. Если СВЧ импульс включить до попадания плазмы в резонатор (первый режим), расстройки моды  $H_{111}$  не наблюдается.  $\zeta$  — сигнал на зонд  $4$  (режим удержания) длительность импульса фокусирующей СВЧ мощности  $8,5$  мксек. Снято при коэффициенте усиления в 20 раз большем, чем в осциллограмме  $b$ . Отклонение луча вниз соответствует приходу плазмы на зонд. Ровная линия плазменного сигнала вызвана работой усилителя осциллографа в режиме насыщения. После включения фокусирующей СВЧ мощности (осциллограмма  $d$ ) плазменный сигнал на зонде ис-

чезает и появляется через время  $t$  после окончания СВЧ импульса в виде маленького зазубренного пика — указано стрелкой. Уменьшение величины сигнала связано с сильной расфокусировкой плазменной струи в результате многократного отражения от "стенок" квазипотенциальной ловушки.  $\delta$  — уровень мощности моды  $E_{0,11}$ .

Физический институт  
им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
14 сентября 1967 г.

### Литература

- [1] М.А.Миллер. ЖЭТФ, 36, 1909, 1959.