

УДЕРЖАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПОТОКА ПЛАЗМЫ СИЛЬНЫМ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПОЛЕМ

К.Ф.Сергейчев, И.Р.Геккер

В данной работе выполнены эксперименты по удержанию прозрачной плазмы ($\omega_{L_e} \ll \omega$) в аксиальносимметричной квазипотенциальной яме, создаваемой в круглом волноводе полем бегущей волны H_{01} [1,2].

Об экспериментах по фокусировке электронов в квазипотенциальных рельефах сообщалось в [3,4]. Сжатие плазмы СВЧ полем, наблюдавшееся ранее в [5] не имеет отношения к удержанию плазмы СВЧ барьером, на что указывалось в [6], поскольку там не было выполнено условие применимости теории квазипотенциала [1].

В поле волны H_{01} при $r/R \leq 0,2$ распределение квазипотенциала близко к параболе:

$$\Phi(r) \approx 10,8 \Phi_0 (r/R)^2, \quad (1)$$

где $\Phi_0 = e E_{\phi \max}^2 / 4m\omega^2$ (высота квазипотенциального барьера при $r/R = 0,48$), e, m – заряд и масса электрона, E_{ϕ} – амплитуда напряженности электрического поля, ω – частота поля.

При стационарном заполнении квазипотенциальной ямы (1) плазмой с $kT/e = (k/e)(T_e + T_i) \leq 0,2 \Phi_0$ должно установиться распределение плотности n [7]:

$$n/n_0 \approx \exp\left\{-10,8 \frac{e \Phi_0}{kT} (r/R)^2\right\}. \quad (2)$$

Здесь мы пренебрегаем возмущением распределения СВЧ поля плазмой. При неравновесном заполнении ямы плазмой в пределах $r/R \leq 0,2$, ког-

да $\Phi(\rho) \gg kT/e$ (ρ – начальная граница плазмы), плазменный шнур должен совершать радиальные гармонические колебания относительно $r=0$ с частотой

$$F = 7,25 \cdot 10^3 \frac{1}{R} \sqrt{\frac{Ze\Phi_0}{A}}, \quad (3)$$

где Z и A – кратность заряда и массовое число иона. Экспериментальная установка (рис.1) состояла из волновода круглого сечения, в котором преобразователем [8] возбуждалась волна H_{01} с КСВН $< 1,1$. Плазма

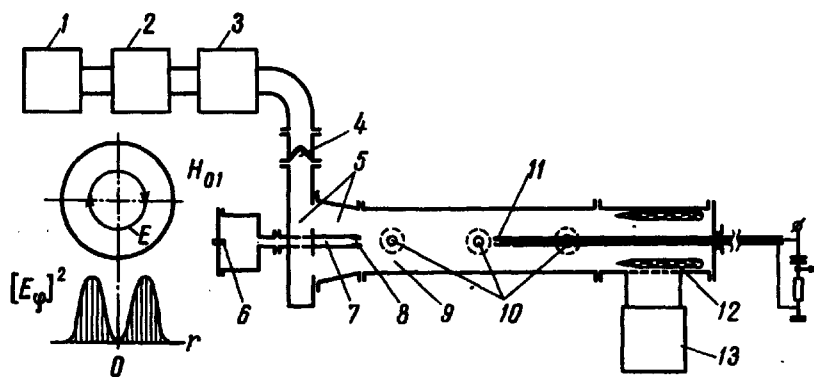


Рис.1. Схема установки с волной H_{01} . 1 – СВЧ генератор, 2 – регулируемый аттенюатор, 3 – ферритовый вентиль, 4 – вакуумное СВЧ окно, 5 – возбуждатель волны H_{01} , 6 – искровой источник плазмы, 7 – трубка, 8 – диафрагма, 9 – круглый волновод, 10 – боковые патрубки, 11 – экранированный плазменный зонд, 12 – СВЧ нагрузка, 13 – откачка

создавалась искровым источником с разрядом по поверхности плексигласа ($C = 0,15 \text{ мкф}$, $U \sim 2 \text{ кВ}$) и инжестрировалась в виде направленного расходящегося потока в область установившегося СВЧ поля через металлическую трубку, с диафрагмой на конце. Относительный диаметр диафрагмы, находящейся на расстоянии 58 см от источника, составлял $d/2R = 0,1$. Генератор 10 см диапазона создавал импульс с длительностью до 40 мксек и значением $\Phi_0 < 100 \text{ в}$. Остаточное давление составляло $(5 \div 9) \cdot 10^{-7} \text{ тор}$.

Сначала было исследовано радиальное удержание потока плазмы при ее инжестрии в установившееся СВЧ поле (стационарное заполнение). Для этого через торец волновода вводился экранированный плазменный зонд, регистрирующий малую часть плазменного потока (относительное отверстие зонда $\delta/2R = 2 \cdot 10^{-2}$). Зонд перемещался вдоль оси установки в пределах $l = 0 \div 70 \text{ см}$, считая от входной диафрагмы. В эксперименте проводились измерения интеграла импульса ионного тока, протекающего в цепи коллектора зонда, $N = \int_0^{\infty} i_+ dt$ при включенном СВЧ поле. По интегралам можно было судить о сохранении или уменьшении числа частиц, по-

падающих на зонд при отодвигании его от диафрагмы. На рис.2 приведены типичные осциллограммы ионного тока, полученные при положении зонда вблизи диафрагмы *a, б* и при удалении его на 70 см *в, г* (в случае *в*)

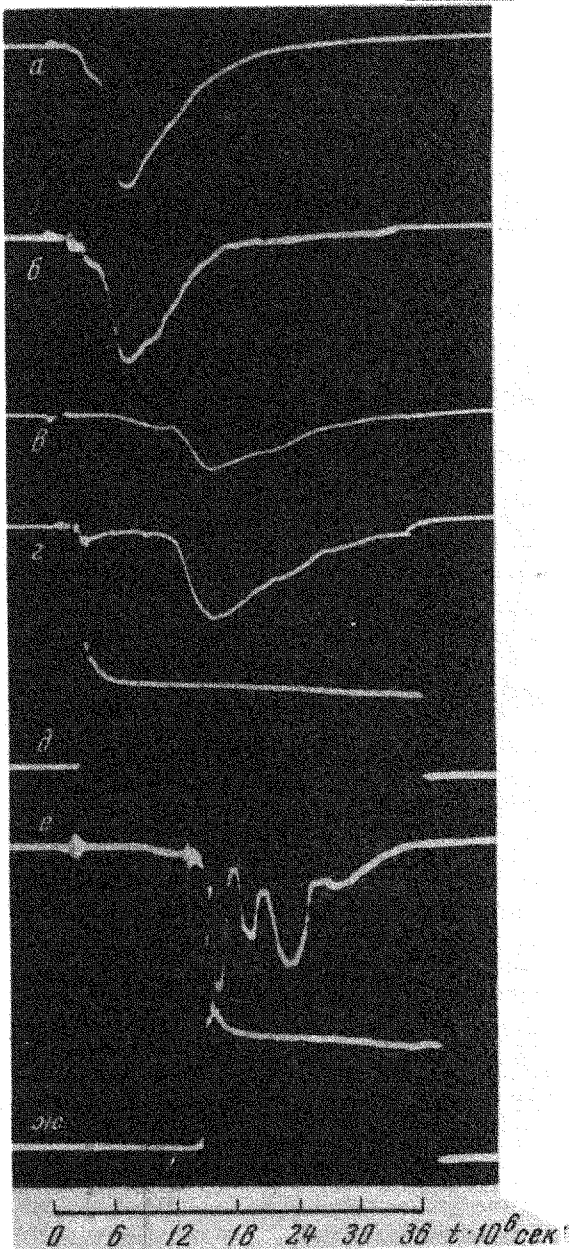


Рис.2. Осциллограммы ионного тока на плазменный зонд: *a* — $l = 0, \Phi_0 = 0$; *б* — $l = 0, \Phi_0 = 65$ в; *в* — $l = 70$ см, $\Phi_0 = 0$ (усиление увеличено в 4,4 раза); *г* — $l = 70$ см, $\Phi_0 = 65$ в; *д* — огибающая СВЧ импульса (для *б* и *г*); *е* — $l = 70$ см, $\Phi_0 \neq 0$; *ж* — огибающая СВЧ импульса (для *е*)

введено дополнительное усиление сигнала, кратное 4,4). Максимальная плотность плазмы, измеренная по осциллограмме *a*, соответствовала $\omega \xi_e / \omega^2 = 0,04$. Из сравнения *в* и *a* видно, что при отсутствии СВЧ поля плазма расходится и число частиц, регистрируемых зондом, удаленным от диафрагмы, резко падает. При инжекции плазмы в СВЧ поле с барьером $\Phi_0 = 65$ в ионный ток зонда, удаленного на 70 см от диафрагмы, резко

возрастает z , причем интеграл импульса ионного тока стремится к интегралу импульса тока, измеренному при тех же условиях вблизи входной диафрагмы b . При этом форма импульсов σ и z оказывается подобной. По интегралам ионного тока N , измеренным на различных расстояниях зонда от диафрагмы для двух значений Φ_0 соответственно равных 0 (СВ) поле отсутствует) и 65 в, были построены зависимости $N/N_0 = f(l)$ (см.

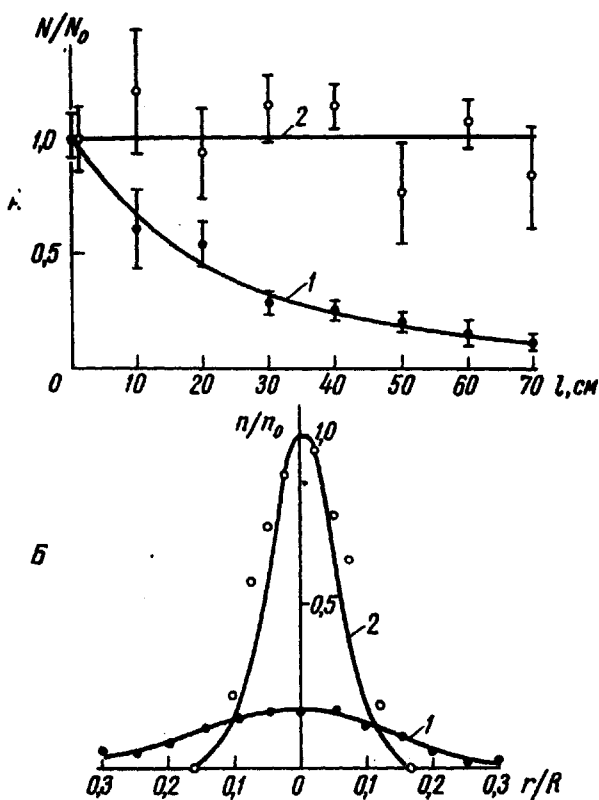


Рис.3. Зависимости, показывающие удержание плазмы. А — изменение относительной величины интеграла ионного тока по длине волновода: 1 — $\Phi_0 = 0$; 2 — $\Phi_0 = 65$ в; Б — распределение плотности плазмы по радиусу ($l = 92$ см): 1 — $\Phi_0 = 0$; 2 — $\Phi_0 = 65$ в

рис.3,а). За N_0 в каждом случае принимается интеграл ионного тока, измеренный вблизи входной диафрагмы. Экспериментальные точки, полученные для $\Phi_0 = 65$ в ложатся вблизи прямой $N/N_0 = 1,0$, что в сравнении с кривой $1(\Phi_0 = 0)$ свидетельствует об удержании плазменного потока СВЧ полем. Отклонение значений N/N_0 от 1,0 может быть связано как со случайной погрешностью измерений (погрешность вычислена с надежностью 0,9), так и с возможными колебаниями плотности плазмы из-за некоторого несоответствия между радиальным распределением потока плазмы на входной диафрагме и распределением (2).

Для исследования радиального распределения удерживаемого потока плазмы через боковые патрубки на расстоянии 92 см от диафрагмы вво- дился экранированный плазменный зонд с относительным диаметром $\delta/2R = 10^{-2}$, перемещаемый по радиусу волновода. Максимальная плот- ность плазмы на входной диафрагме в этом эксперименте была выше и соответствовала $\omega_{L_e}^2/\omega^2 = 0,2$. При помощи зонда были построены за- висимости $N/N_0 = f(r/R)$ для Φ_0 , равного 0 и 65 в (рис.3, б). За N_0 принимался интеграл ионного тока при $r/R = 0$ и $\Phi_0 = 65$ в. Эти зависи- мости являются по существу распределениями плотности частиц $n/n_0 = = f(r/R)$, что в данном случае вытекает из геометрического подобия ос- циллограмм. Поперечные энергии ионов пренебрежимо малы в сравнении с температурой электронов. (Максимальные поперечные энергии ионов $\sim 0,1$ эв, а электронная температура kT_e/e по измерениям ленгмюров- ского зонда 4 эв.) Поэтому точки экспериментальной зависимости $n/n_0(r/R)$ сравнивались с расчетной, полученной из (2) для $\Phi_0 = 65$ в и $kT/e = kT_e/e = 4$ эв (кривая 2, рис.3, б). Из кривых 1 и 2 видно, что плазма в СВЧ поле удерживается в пределах диаметра, меньшего в 2,5 ра- за, чем диаметр струи, измеренный в том же сечении без СВЧ поля (счи- тая по полуширине распределения). При этом плазма канализируется, со- храняя распределение концентрации по радиусу близкое к начальному (у диафрагмы). Совпадение интегралов $2\pi \int N/N_0 r dr$ с точностью до 20% вычисленных по экспериментальным кривым 1 и 2 рис.3, б, также указы- вает на удержание практически всей инжектированной в СВЧ поле плазмы без заметных потерь.

При задержке момента включения СВЧ импульса по отношению к момен- ту выстрела плазменного источника, так, чтобы этот момент соответство- вал появлению ионного тока на зонде, наблюдалась модуляция амплитуды ионного тока (рис.2, в, ж).* Периоды модуляции в начале и конце импуль- са ионного тока различны, что обусловлено наличием в плазме ионов раз- ных сортов, которые движутся в различных частях потока по его длине. Характерные частоты модуляции импульса ионного тока приходятся на ин- тервал значений $(0,2 - 1,0) \cdot 10^6$ гц; расчет F для H^+ и C^+ при том же Φ_0 соответственно дает: $0,25 \cdot 10^6$ гц. и $0,83 \cdot 10^6$ гц.

В заключение авторы выражают благодарность М.С.Рабиновичу и В.П.Силину за интерес к работе, Г.А.Аскарьяну за обсуждение результа- тов, В.И.Антонову, Н.Н.Дряпикову, В.Е.Трофимову и Л.Э. Цоппу за по- мощь в проведении экспериментов.

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

Поступило в редакцию
30 декабря 1966 г.

Литература

- [1] А.В.Гапонов, М.А.Миллер. ЖЭТФ, 34, 242, 1958.
[2] М.А.Миллер. Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1, № 3, 1958.

- [3] Д.М.Браво-Животовский и др. Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2, 94, 1959.
- [4] E.S.Weibel, G.L.Clark. J.Nucl. Energy, C-2, 112, 1961.
- [5] C.K.Birdsael, A.J.Lichtenberg. Phys. Rev. Lett., 3, 163, 1959.
- [6] H.S.Butler, G.S.Kino. Trans. IRE, ED-8, 528, 1961.
- [7] Т.Ф.Волков, Сб. Физика плазмы и проблема упр. термояд. реакций. 3, 336, изд-во, АН СССР, 1958.
- [8] И.Р.Геккер и др. Радиотехника и электроника, 10, 1138, 1965.

* Случай неравновесного заполнения, когда граница плазменного потока расширяется до соответствующего ρ .