

## О САМОКАНАЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Г.А.Марков, В.А.Миронов, А.М.Сергеев*

Экспериментально обнаружен эффект нелинейной самоканализации плазменных волн нижегибридного диапазона частот, приводящий к образованию резко локализованной области плазмы и сильного высоко-частотного поля.

В данной работе приводятся результаты прямого наблюдения само-воздействия плазменных волн в диапазоне частот  $\omega_{H_i} < \omega < \omega_{H_e}$  ( $\omega_{H_e, i}$  – циклотронная частота электронов и ионов). Обнаружено, что под действием излучения образуется стационарный изолированный плазменный волновод, который захватывает создающие его нижегибридные волны. При этом локализация плазмы осуществляется в области сильного поля, что существенным образом отличает наблюдаемый эффект от исследованной ранее самофокусировки электромагнитных волн в изотропной плазме [1].

Плазма создавалась с помощью высокочастотного (ВЧ) индуктора, расположенного с торцевой стороны стеклянного баллона соосно с ним. Параметры установки были выбраны следующими: диаметр баллона – 20 см, его длина – 120 см, диаметр индуктора – 10 см, его длина – 7 см, частота ВЧ поля – 50 МГц, давление газа (воздуха или гелия)  $3 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-3}$  тор. Для определения параметров плазмы и ВЧ потенциала использовались подвижные зонды, измерения производились с помощью анализаторов спектра и осциллографов.

При значениях подводимой к источнику ВЧ мощности  $W \sim 10$  Вт плазма сосредоточена вблизи индуктора, причем свечение разряда однородно по сечению баллона. Наложение продольного постоянного магнитного поля  $H_0 = 500$  гс приводит к сжатию плазмы в тонкий шнур с поперечным масштабом, существенно меньшим диаметра индуктора и длиной, ограниченной продольным размером системы. При этом в области индуктора визуально наблюдается характерная коническая поверхность (рис. 1). Из представленных на рис. 1, а, б экспериментальных данных видно, что концентрация плазмы  $N$  и амплитуда ВЧ потенциала  $\phi$  почти не меняются вдоль оси шнура и резко спадают от центра в поперечном сечении. Измерение разности фаз колебаний в различных точках показали, что вдоль оси системы распространяется волна, длина которой  $\lambda$  уменьшается с понижением концентрации плазмы. При  $W = 12$  Вт и давлении воздуха в баллоне  $p = 10^{-2}$  тор максимум ВЧ поля на расстоянии  $L = 60$  см от индуктора составляет  $\approx 2$  В/см,  $N \approx 5 \cdot 10^7$  см $^{-3}$ , температура электронов  $T_e \approx 10$  эВ,  $\lambda \approx 12$  см. Таким образом, исследуемое образование представляет собой существенно отжатый от стенок плазменно-волноводный канал, локализирующий плазму и интенсивное ВЧ поле.

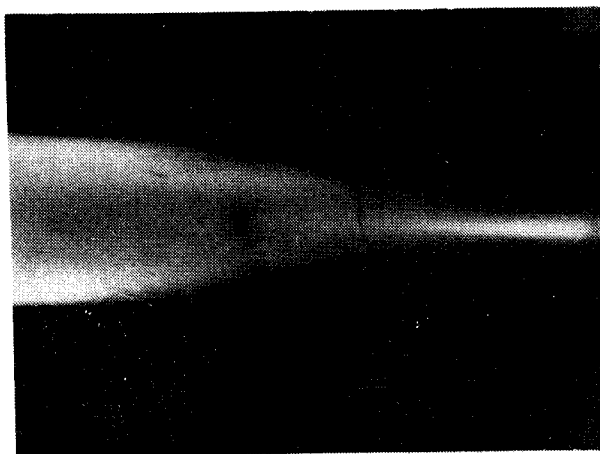


Рис. 1. Структура свечения разряда

Переходя к интерпретации полученных результатов, отметим, прежде всего, что измеренное значение длины волны оказывается значительно меньше соответствующей экспериментальным данным длины электромагнитных волн – вистлеров

$$\left( \lambda_b = c/f \left( 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_{H_e} \omega_{H_i}} \right)^{1/2} \approx 6 \text{ м} \right).$$

Поэтому наблюдаемая картина определенно связана с возбуждением плазменных (нижегибридных) волн в плазме с концентрацией, превышающей критическую  $N_{кр} = mf^2\pi/e^2$ . На это указывает и характерное рас-

пределение светимости плазмы (на рис. 1) вблизи источника, повторяющее пространственную структуру ВЧ – потенциала [2].

Таким образом, физическая картина рассматриваемого явления представляется следующей. Возбуждаемые индуктором нижнегибридные волны распространяются вдоль резонансных конических поверхностей от витков источника. Фокальное возрастание ВЧ поля способствует повышенной ионизации, а преимущественно продольный (вдоль магнитного поля) перенос приводит к образованию плазменного волновода, который канализирует создающие его плазменные волны. При малом уровне мощности ( $W \approx 10$  Вт) концентрация плазмы на оси несколько больше критической  $N_{кр} \approx 3 \cdot 10^7$  см<sup>-3</sup>, а вблизи стенок  $N \ll N_{кр}$  и, следовательно, самосогласованное распределение плазмы и поля является изолированным от стенок. С увеличением подводимой мощности плотность плазмы в шнуре возрастает, а его толщина увеличивается. При  $W \sim 100$  Вт концентрация электронов в баллоне всюду больше критической и роль стенок в локализации поля становится существенной.

Отличительная особенность наблюдаемого явления состоит в совместной стационарной локализации плазмы и высокочастотного поля. С целью интерпретации самоканализации плазменных волн рассмотрим простую модель аксиально-симметричного образования, однородного вдоль магнитного поля. При этом, очевидно, потенциал поля волны  $\Phi$  и концентрация электронов плазмы  $N$  имеют вид  $\Phi = \psi(r) \exp(i\omega t - ikz)$ ,  $N = N(r)$ , где  $r$  – расстояние до оси канала  $z \parallel \mathbf{H}_0$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ . ВЧ поле производит ионизацию газа, поэтому концентрация плазмы зависит от интенсивности распространяющейся в ней волны. Вследствие резкой локализации области, занятой плазмой, необходимо учитывать диффузию частиц в поперечном сечении канала, что приводит к существенно нелокальной зависимости концентрации электронов от амплитуды ВЧ потенциала

$$\frac{d^2 N}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dN}{dr} + [\alpha(k\psi)^2 \beta - \nu_a] \frac{N}{D_{\perp}} = 0. \quad (1)$$

В уравнении (1) величина  $\alpha(k\psi)^2 \beta$  аппроксимирует частоту ионизации молекул электронным ударом ( $\beta > 1$ ),  $\nu_a$  – частота прилипания электронов к электроотрицательным молекулам воздуха<sup>1)</sup>,  $D_{\perp}$  – коэффициент амбиполярной диффузии поперек магнитного поля. В распределении плазмы, определяемом уравнением (1), распространяется НГ волна потенциал которой удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\frac{d^2 \psi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} - k^2 \left( 1 - \frac{N}{N_{кр}} \right) \psi = 0. \quad (2)$$

<sup>1)</sup> Оценки показывают, что для экспериментально полученного плазменного шнура в воздухе продольный перенос электронов является несущественным. Этот фактор, однако, важен для гелиевой плазмы. Он приводит к тому же результату, что и действие прилипания и тем самым объясняет структурное сходство каналов в двух различных газах.

Система (1) – (2) допускает пространственно локализованные решения<sup>2)</sup>, для которых вблизи оси  $N > N_{кр}$ , а в периферийной части  $N < N_{кр}$ , что и определяет экспоненциальное спадание поля. Быстрое убывание концентрации обеспечивается действием прилипания (или продольным переносом в гелии). Подобные решения соответствуют возможности существования самоподдерживающегося плазменно-волноводного канала, изолированного от стенок баллона. На рис. 3 показано распределение концентрации плазмы и ВЧ потенциала, полученные в результате численного расчета системы (1) – (2) для  $\beta = 2$ ,  $D_{\perp} / \nu_a = 6,3 \text{ см}^2$ ,  $\lambda = 12 \text{ см}$  и хорошо согласующееся с измеренным экспериментально (рис. 2, а. б).

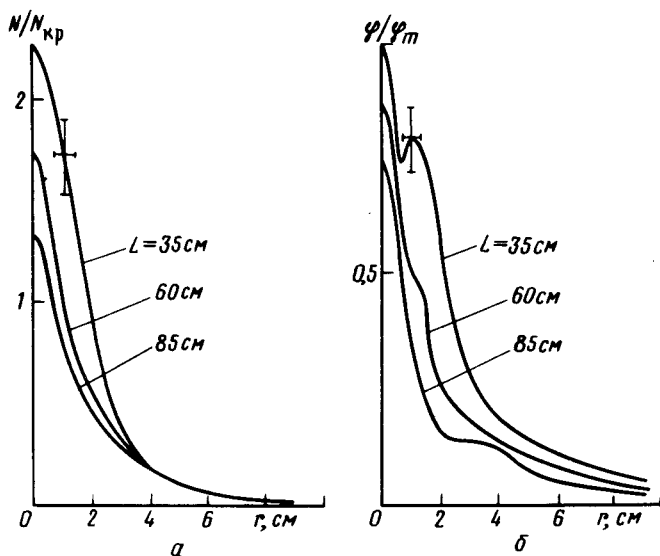


Рис. 2. Радиальное распределение плотности плазмы а и ВЧ потенциала б

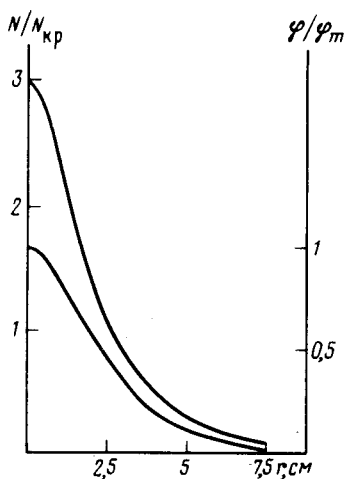


Рис. 3

<sup>1)</sup> Возможность построения локализованных решений при ионизационной нелинейности отмечалась для электромагнитных волн (вистлеров) и плазменных волн в работах [3, 4].

Диссипация ВЧ энергии сопровождается уменьшением амплитуды волны по мере распространения ее в канале. Это несколько модифицирует поперечную структуру, описываемую уравнением (2) и, в частности, приводит к убыванию концентрации плазмы на оси системы от источника волн вдоль магнитного поля, что находится в соответствии с экспериментально полученными данными.

Авторы признательны А.Г.Литваку, по инициативе которого был проведен эксперимент.

Институт прикладной физики  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
13 марта 1979 г.

### Литература

- [1] Б.Г.Еремин, А.Г.Литвак. Письма в ЖЭТФ, 13, 603, 1971; В.А.Исаев, В.Н.Круглов, В.А.Миронов, Б.К.Полуяхтов. Физика плазмы, 3, 607, 1977.
  - [2] R.L.Stenzel, W.Gekelman. Phys. Fluids, 20, 108, 1977; R.L.Stenzel, W.Gekelman. Phys. Fluids, 20, 1316, 1977.
  - [3] А.Г.Литвак. Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 9, 629, 1966.
  - [4] Н.С.Ерохин, С.С.Моисеев, И.П.Панченко. УФЖ, 23, 287, 1978.
-