

## САМОКОНЦЕНТРАЦИЯ И КАНАЛИРОВАНИЕ РАЗРЯДА АЛЬФВЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

*В.С.Бажанов, Г.А.Марков*

Исследован эффект ионизационной самоконцентрации и каналирования полей электромагнитного источника альфвеновского диапазона частот  $\omega < \omega_{Bi}$  ( $\omega_{Bi}$  — гирочастота ионов). Эффект связан с возбуждением разряда полем источника и формированием вытянутого вдоль внешнего магнитного поля узкого и длинного плазменно-полевого канала, вблизи которого сконцентрировано сильное поле, сравнительно слабо убывающее вдоль канала.

В условиях ионизационной нелинейности возможно [1-3] формирование узких плазменно-волновых каналов, позволяющих локализовать передачу и выделение энергии электромагнитного излучения источников в замагниченной плазме. Плазменная неоднородность может при этом существенно изменить радиационные характеристики возбуждающей антенны и улучшить ее согласование с питающим трактом [4,5]. Формирование такой неоднородности в ночной зимней ионосфере на высотах  $H > 150$  км, где длина свободного пробега горячего ( $\mathcal{E}_e > 10$  эВ) электрона  $l_e \gtrsim 10$  км, означает по существу формирование искусственного дакта плотности. Модуляция плотности плазмы в таком дакте сопровождается глубокой ( $\sim 100\%$ ) модуляцией потоков высыпавшихся энергичных частиц из деформированной разрядом магнитной силовой трубки [6,7] и возбуждением широкого спектра спорадических резонансных явлений [8].

Специфическая дисперсия альфвеновских волновых полей в плазме позволяет, по-видимому [9], формировать самолокализованные в узкой магнитной силовой трубке и очень длинные при малых потерях полевые каналы. При нелинейном взаимодействии сильных полей с плазмой в таком канале возможно образование специфического сконцентрированного в узкий и длинный шнур разряда, направленных потоков ускоренных частиц и заметного повышения эффективности излучения коротких ( $l_{ист} \ll \lambda_{фона}$ ) низкочастотных источников [4,5]. Таким образом, появляется возможность сравнительно маломощными малогабаритными источниками формировать в ионосфере активные плазменные антен-

ны альфвеновского диапазона, что представляет определенный интерес для разработки активных методов исследования околоземного космического пространства.

Эксперименты по исследованию эффектов ионизационного самовоздействия электромагнитных полей альфвеновского диапазона частот были выполнены в стеклянной разрядной камере диаметром 200 мм и длиной 1500 мм, помещенной в продольное магнитное поле  $B_0 = 500$  Гс. В качестве возбуждающей дипольной системы использовались две параллельные проволочки ( $\varnothing 2$  мм,  $l = 40$  мм), лежащие в плоскости  $B_0$  перпендикулярно направлению  $B_0$  на расстоянии  $l_{\text{ист}} \approx 60$  мм друг от друга. К проволочкам подводилось осциллирующее напряжение амплитудой  $\sim 1$  кВ на частоте  $f \approx 32$  кГц.

На рис. 1 показано связанное с формированием разряда относительное изменение распределения вдоль оси уста-

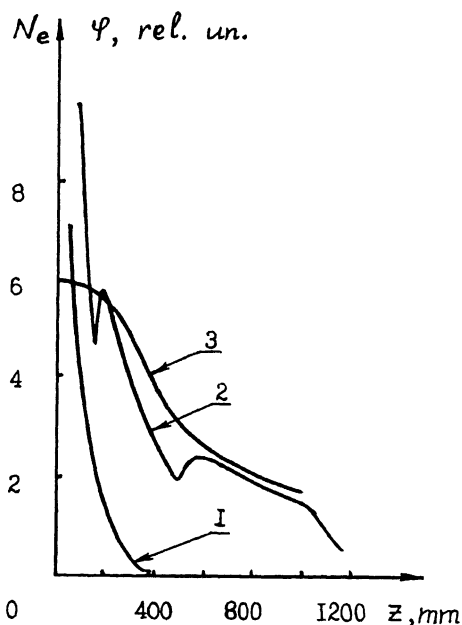
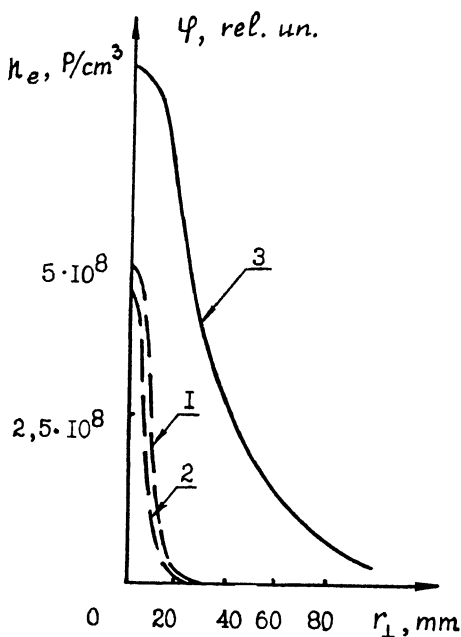


Рис. 1. Распределение высокочастотного потенциала электрического поля  $\varphi(z)$  вдоль оси разрядной камеры: кривая 1 —  $\varphi(z)$  в допробойном режиме работы ( $p < 10^{-4}$  Тор,  $U_{\text{вых}} \approx 1$  кВ); кривая 2 —  $\varphi(z)$  на расстоянии 20 мм от оси разряда ( $p = 10^{-1}$  Тор,  $U_{\text{вых}} = 1$  кВ, коэффициент усиления приемника уменьшен в 20 раз по сравнению с допробойным случаем); кривая 3 — распределение погонной плотности плазмы вдоль оси разряда  $N_e(z)$  ( $p = 10^{-1}$  Тор,  $U_{\text{вых}} = 1$  кВ).

новки ( $z_0 \parallel \mathbf{V}_0$ ) высокочастотного потенциала  $\varphi(z)$ , возбуждаемого дипольным источником. Кривая 1 соответствует случаю малого давления ( $p < 10^{-4}$  Тор), когда выходного напряжения генератора оказалось недостаточно для возбуждения разряда. Кривая 2 соответствует распределению  $\varphi(z)$  на расстоянии 20 мм от оси разряда при  $p = 10^{-1}$  Тор. Коэффициент усиления приемника был в 20 раз больше в случае отсутствия разряда (кривая 1). Кривая 3 показывает относительные изменения погонной плотности плазмы вдоль оси разряда  $N_e(z)$ , определенные по интегральной светимости плазмы в видимом диапазоне частот.

На рис. 2 штриховыми линиями приведено поперечное распределение плотности плазмы  $n_e(r_\perp)$ , снятое электрическим зондом на разных расстояниях  $z$  от центра возбуждающего диполя ( $z_1 = 550$  мм — кривая 1 и  $z_2 = 850$  мм — кривая 2). Сплошная кривая 3 (рис. 2) отражает поперечное распределение  $\varphi(r_\perp)$ , деформированное разрядом на расстоянии  $z = 550$  мм от источника.



**Рис. 2.** Поперечное распределение плотности плазмы  $n_e(r_\perp)$  в разряде при  $p = 10^{-1}$  Тор,  $U_{\text{вых}} = 1$  кВ: кривая 1 —  $n_e(r_\perp)$ , снятая на расстоянии  $z_1 = 550$  мм от возбуждающего разряд диполя; кривая 2 —  $n_e(r_\perp)$ , снятая на расстоянии  $z_2 = 850$  мм; кривая 3 — поперечное распределение  $\varphi(r_\perp)$ , деформированное разрядом на расстоянии  $z = 550$  мм от источника.

Температура электронов в разряде практически не зависит от координат ( $z$  и  $r_{\perp}$ ) и составляет величину  $\mathcal{E}_e \simeq 10$  эВ. Наличие локальных минимумов на кривой 2 (рис. 1) объясняется сложением в противофазах колебаний ближнего квазистационарного поля источника и возбуждаемого им волнового поля с длиной волны  $\lambda_{\parallel} \simeq 320$  мм. Анализ дисперсионных свойств замагниченной плазмы позволяет утверждать, что наблюдаемая волна удовлетворяет дисперсионному уравнению медленных магнитозвуковых волн (продольные волны горячей магнитоактивной плазмы, аналогичные ионно-звуковым волнам изотропной плазмы)

$$\omega = k_{\parallel} v_s.$$

Здесь  $\omega = 2\pi f$ ,  $k_{\parallel} = 2\pi/\lambda_{\parallel}$ ,  $v_s \simeq 10^6$  см/с — скорость ионного звука.

Физическая картина наблюдаемого явления представляется нам следующей. В квазистационарном поле источника возбуждается разряд, который вытягивается вдоль внешнего магнитного поля  $\mathbf{B}_0$  из-за преимущественно продольного переноса заряженных частиц. В результате большой разницы в проводимости плазмы вдоль и поперек  $\mathbf{B}_0$  формирование разряда в альфвеновском диапазоне частот сопровождается переносом сильного поля источника вдоль  $\mathbf{B}_0$  и обужением его поперечного распределения на больших расстояниях от источника. В плазме разряда возбуждаются сравнительно быстрые альфвеновские и медленные квазипотенциальные волны, локализованные внутри плазменной неоднородности. При достаточной амплитуде волновые поля могут поддерживать и формировать плазменно-полевые каналы на больших расстояниях от источника.

При возбуждении альфвеновского разряда высокого давления  $p \gtrsim 0.1$  Тор электродами, разнесенными поперек внешнего магнитного поля, от каждого из электродов вытягиваются свои плазменно-полевые каналы, поперечное сечение которых повторяет сечение сильного поля соответствующего электрода (от штыря — узкая лента, от кольца — полый цилиндр и т. д.). Такая структура разряда сохраняется и при очень малых частотах поля ( $f \lesssim 30$  Гц), когда плазменный канал формируется за время одного полупериода сильного поля и успевает срелаксировать за время слабого поля. В этом случае формирование плазменно-полевого канала происходит в виде ударной волны ионизации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 93-02-824).

## Список литературы

- [1] *Марков Г.А., Миронов В.А., Сергеев А.М.* // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. В. 11. С. 672-676.
- [2] *Марков Г.А., Миронов В.А., Сергеев А.М., Соколова И.А.* // ЖЭТФ. 1981. Т. 80. В. 6. С. 2265-2271.
- [3] *Вдовиченко И.А., Марков Г.А., Миронов В.А., Сергеев А.М.* // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44. В. 5. С. 216-219.
- [4] *Марков Г.А.* // Физика плазмы. 1988. Т. 14. В. 9. С. 1094-1099.
- [5] *Кудрин А.В., Марков Г.А.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 2. С. 163-171.
- [6] *Агафонов Ю.Н., Бажанов В.С., Исякаев В.Я. и др.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 17. С. 1-5.
- [7] *Агафонов Ю.Н., Бажанов В.С., Исякаев В.Я. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 52. В. 10. С. 1127-1190.
- [8] *Агафонов Ю.Н., Бажанов В.С., Гальперин Ю.И. и др.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 16. С. 65-69.
- [9] *Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П.* Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 1983. С. 111-118.

Нижегородский  
государственный университет  
им. Н.И.Лобачевского

Поступило в Редакцию  
10 января 1995 г.