

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ИЗЛУЧЕНИЕ ВОЛН СВИСТОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ

А.В.Костров¹⁾, А.И.Смирнов, М.В.Стародубцев, А.А.Шайкин¹⁾

Институт прикладной физики РАН

603600 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 13 марта 1998 г.

Экспериментально исследовано влияние тепловых и стрикционных нелинейных эффектов на излучение электромагнитных волн свистового частотного диапазона в магнитоактивной плазме. Установлено, что нелокальная тепловая нелинейность определяет диаграмму направленности антенны, а стрикционная нелинейность, наиболее существенная вблизи поверхности антенны, ответственна за согласование излучателя с окружающей плазмой.

PACS: 52.35.Hr, 52.40.-w

Излучение интенсивных электромагнитных волновых полей в плазме часто сопровождается развитием различных нелинейных процессов (стрикционных, ионизационных, тепловых), сильно изменяющих электродинамические характеристики окружающей среды. Нелинейные эффекты проявляют себя, в первую очередь, вблизи антенных устройств, где напряженность электрических и магнитных полей достигает, как правило, максимального значения. Они влияют на согласование излучателей с плазмой и, вообще говоря, на структуру ближних (квазистатических) полей и полей излучения [1–4].

В магнитоактивной плазме неоднородности, возникающие из-за нагрева электронов в ближних полях антенн, вытянуты вдоль магнитного поля и могут поддерживать локализованные в пространстве электромагнитные моды, которые по мере исчезновения неоднородностей излучаются в окружающее пространство. В результате диаграмма направленности в присутствии неоднородности существенно сужается. В непосредственной близости от антенн под влиянием стрикционных процессов появляются мелкомасштабные неоднородности (порядка характерных поперечных размеров проводов), определяющие входной импеданс излучателей, что очень заманчиво использовать для согласования антенн с плазмой. Экспериментальному изучению перечисленных выше эффектов и посвящена данная работа.

Эксперименты проводились в распадающейся аргоновой плазме при давлении нейтрального газа $p_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ торр. Установка представляла собой вакуумную камеру длиной 150 см и диаметром 80 см. Плазма создавалась высокочастотным импульсным разрядом в однородном магнитном поле $H_0 = 100$ Э. Концентрация достигала значения $N = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и далее (после отключения источника плазмы) уменьшалась с характерным временем $\tau_N \approx 2$ мс. Основные эксперименты были проведены при концентрации плазмы 10^{12} см^{-3} ; температура электронов при этом составляла 0.5 эВ.

Концентрация фоновой плазмы контролировалась с помощью СВЧ интерферометра ($\lambda = 8$ мм), а локальные возмущения концентрации измерялись подвижными

¹⁾ kstr@appl.sci-nnov.ru, shaykin@appl.sci-nnov.ru

двойным и СВЧ зондами [5]. Пространственное распределение электромагнитных полей исследовалось с помощью подвижной рамочной антенны диаметром 0.7 см, электростатически экранированной и изолированной от плазмы слоем диэлектрика.

В тракт передающей антенны, представляющей собой электростатически экранированную рамку диаметром 5 см (не изолированную от плазмы), одновременно подавались два сигнала: первый, непрерывный зондирующий сигнал малой мощности ($P \approx 0.2$ Вт), частота которого могла изменяться в полосе от 10 до 500 МГц, перекрывающей весь свистовый диапазон; второй, импульс накачки ($P_0 \approx 100$ Вт, $f_0 = 60$ МГц) с длительностью $\tau_i = 1.25$ мс (на рис.2а – область заштрихована).

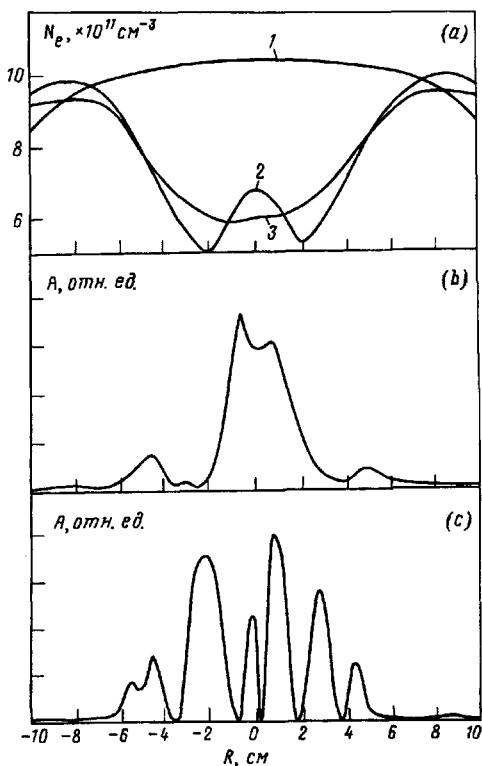


Рис.1. Поперечные распределения: а – концентрация плазмы (1 – невозмущенное, 2 – в течение импульса волны накачки, 3 – спустя 100 мкс после окончания импульса накачки) амплитуды H_2 -компоненты поля зондирующей волны в канале: б – в течение импульса накачки, с – спустя 100 мкс после окончания импульса накачки

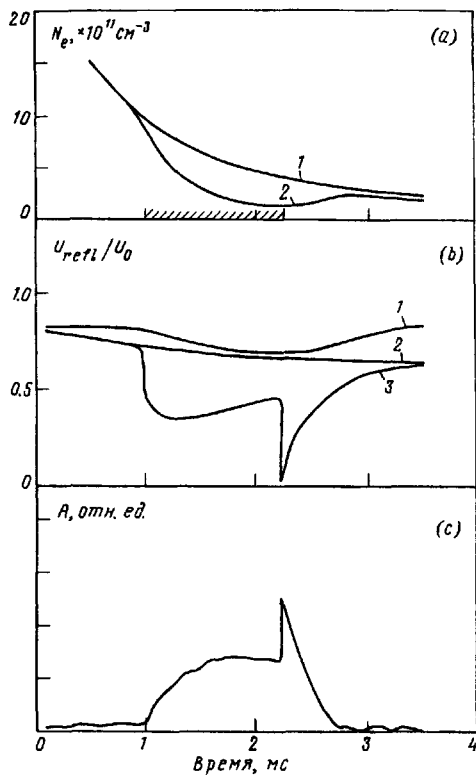


Рис.2. а – Зависимость концентрации плазмы от времени: 1 – невозмущенная плазма и 2 – возмущенная импульсом накачки; б – осциллограммы отраженной волны в подводющем тракте на зондирующей частоте $f = 90$ МГц: 1 – антенна, покрыта слоем изолятора в присутствии импульса накачки; 2 – неизолированная антенна без волны накачки, 3 – в присутствии импульса накачки, с – типичная осциллограмма H_2 -компоненты поля зондирующей волны $f = 90$ МГц в плазменном канале на расстоянии $z = 35$ см от передающей антенны

Сигнал накачки существенно модифицировал параметры окружающей плазмы и влиял на эффективность излучения зондирующих волн и их диаграмму направленности. В результате нагрева электронов вблизи антенны полем накачки и дальней-

ших термодиффузионных процессов в плазме формируется сильно вытянутый вдоль магнитного поля канал с пониженной плотностью [1]. Зондирующие волны захватываются в образовавшийся плазменный волновод и распространяются на значительные расстояния от излучающей антенны; тем самым возникающие из-за тепловой нелинейности плазменные неоднородности формируют диаграмму направленности излучателя как для волны накачки, так и для зондирующих волн.

Интересна структура высокочастотных полей пробных волн, распространяющихся в плазменном канале. Известно, что при частотах $\omega_0 < \omega_{He}/2$ квазипродольные вистлеры с продольным волновым числом $k \approx \omega_{pe}(\omega/\omega_{He})^{1/2}/c$, где ω_0 – частота пробной волны, ω_{pe} и ω_{He} – плазменная и гирочастоты электронов, c – скорость света в вакууме, могут распространяться в канале с повышенной плотностью, в каналах же с пониженной плотностью плазмы распространяются косые свистовые волны (волны конической рефракции с поперечным волновым числом $k_{\perp} \approx \omega_{pe}/c$).

На рис.1а показано распределение концентрации плазмы в поперечном сечении канала в момент работы волны накачки (кривая 2) и через 100 мкс после ее выключения (кривая 3). Центральный максимум на кривой 2 обусловлен структурой вихревого электрического поля рамки. Поперечный масштаб теплопроводности $L_{T\perp} \approx \rho_{eH}/(2m/M)^{1/2} \approx 2$ см (m и M – массы электрона и иона, соответственно, ρ_{eH} – гирорадиус электрона) порядка размеров рамки ($2a \approx 5$ см), в таких условиях поперечная неоднородность температуры электронов приводит к неоднородному распределению плотности плазмы в канале. После выключения импульса накачки максимум концентрации в центре релаксирует за времена $\tau_{\perp} \approx L_{T\perp}^2/(2.6)^2 \rho_{eH}^2 \nu_{ei} \approx 10^{-5}$ с (ν_{ei} – частота электрон-ионных столкновений), то есть значительно быстрее, чем заплывает весь канал радиусом 6 см (см. рис.2а, кривая 2).

Видно, что при наличии максимума плотности в центре канала поле H_z локализовано только в этом максимуме (рис.1б), что свидетельствует о возбуждении квазипродольной свистовой моды. После выключения импульса накачки, когда канал становится квазиоднородным (кривая 3 на рис.1а), в нем могут распространяться более короткие волны свистового диапазона (в частности, волны конической рефракции (рис.1с)).

Таким образом, изменяя форму плазменного волновода, можно эффективно сепарировать волны свистового диапазона с различными поперечными длинами, а затем и излучать их в окружающую плазму, то есть управлять диаграммой направленности рамочного излучателя²⁾.

Информация о согласовании антенны с окружающей плазмой извлекалась из анализа осциллограмм отраженного сигнала в подводящем тракте. Для зондирующей волны такая осциллограмма представлена на рис.2б. Из нее видно, что амплитуда отраженного сигнала резко изменяется при включении или выключении волны накачки. Столь быстрое изменение входных параметров антенны (происходящее за времена, значительно меньшие характерных времен термодиффузионного перераспределения плазмы) свидетельствует о стрикционном механизме воздействия на плазму. Это воздействие наиболее существенно в непосредственной близости от поверхности антенны, где велика напряженность электрических полей. Как следует

²⁾ Во время ВЧ импульса в спектре излучения появлялись гармоники на суммарной и разностной комбинации его частоты и рабочей частоты передаваемого сигнала, иногда сравнимые по интенсивности с последним.

из экспериментальных данных, после выключения импульса волны накачки наблюдается почти полное согласование антенны с фидером³⁾. Тепловой канал же релаксирует к однородному состоянию за времена $\tau_{rel} \approx 10^{-3}$ с, значительно большие характерного времени подсогласования $\tau_{согл} \approx 10^{-4}$ с. Нужно отметить, что в случае рамки, покрытой слоем изолятора значительно большие толщины двойного слоя, резких изменений амплитуды отраженного сигнала зондирующих волн и эффекта подсогласования после выключения импульса накачки не наблюдалось (кривая 1 на рис.2b), хотя в плазме формировался тепловой канал такой же формы и характерных размеров, как и антенной без изолятора.

Таким образом, экспериментально исследованы стрикционные и тепловые эффекты при работе рамочного излучателя, расположенного в магнитоактивной плазме и работающего в свистовом частотном диапазоне. Показана возможность управления входными и излучательными характеристиками рамочной антенны с помощью подачи на нее мощного импульса высокочастотного напряжения. При этом стрикционные эффекты оказывают заметное влияние на входной импеданс антенны и, в частности, могут существенно улучшить ее согласование с плазмой, а образовавшиеся вследствие нагрева крупномасштабные плазменные неоднородности изменяют диаграмму направленности рамочной антенны.

А.В.Костров и М.В.Стародубцев признательны Российскому фонду фундаментальных исследований (грант 96-02-16471-а), А.И.Смирнов и А.А.Шайкин признательны Российскому фонду фундаментальных исследований (грант 96-02-17473) за финансовую поддержку.

-
1. Г.Ю.Голубятников, С.В.Егоров, А.В.Костров и др., Физика плазмы **14**, 482 (1988).
 2. H.C.Koons and D.A.McPherson, Radio Sci. **9**, 547 (1974).
 3. I.P.Shkarofsky, Radio Sci. **7**, 503 (1972).
 4. Ю.Н.Агафонов, В.С.Важанов, В.Я.Исякаев и др., Письма в ЖЭТФ **52**, 1127 (1990).
 5. R.L.Stenzel, Rev. Sci. Instrum. **47**, 603 (1976).

³⁾ Этот эффект связан с замедлением высокочастотного тока при его распространении по проводнику, окруженному каналом пониженной плотности, который формируется под действием стрикционного вытеснения плазмы от поверхности проводника. Замедление тока приводит к появлению электрического дипольного момента у рамочной антенны. Именно наличие такого момента и объясняет эффективное излучение квазипродольных свистовых волн рамкой, ориентированной плоскостью перпендикулярно внешнему статическому полю.