

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО РАДИОИМПУЛЬСА СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ С МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМОЙ

Н.А. Айдакина, М.Е. Гушин, И.Ю. Зудин, С.В. Коробков, А.В. Костров, А.В. Стриковский

LABORATORY MODELING OF THE INTERACTION OF A WHISTLER-MODE RADIO PULSE WITH A MAGNETIZED PLASMA

N.A. Aidakina, M.E. Gushchin, I.Yu. Zudin, S.V. Korobkov, A.V. Kostrov, A.V. Strikovskiy

На стенде «Крот» проводятся исследования физических явлений, возникающих при взаимодействии интенсивного электромагнитного излучения с замагниченной плазмой. Экспериментально показана генерация квазистационарного магнитного поля (КМП) в слабостолкновительной замагниченной плазме в пространственно неоднородном высокочастотном поле свистового диапазона частот. Исследована крупномасштабная и мелкомасштабная динамика квазистационарных магнитных полей и самосогласованных плазменно-полевых структур, формируемых мощным низкочастотным радиоимпульсом свистового диапазона частот.

Using the “Krot” instrument, the studies of physical phenomena have been carried which occur during the interaction of intense electromagnetic radiation with magnetized plasmas. It is shown experimentally that a quasistationary magnetic field is generated in a weakly-collisional magnetized plasma in a spatially nonuniform high-frequency whistler-mode field. The large-scale and small-scale dynamics of pulsed magnetic fields and the self-consistent plasma-field structures formed by powerful whistler-mode radio pulses has been analyzed.

Генерация квазистационарных токов и магнитных полей при взаимодействии электромагнитного излучения с плазмой представляет фундаментальный интерес и может играть важную роль в практических приложениях. В последние годы ведутся многочисленные лабораторные исследования по генерации квазистационарных магнитных полей (КМП) с использованием излучения оптического [Беляев, 2008], микроволнового [Бродский, 1981; Анпилов, 1995] или радиочастотного [Popel, 2003] диапазонов. Кроме того, вопросы генерации КМП возникают и при проведении активных экспериментов в околоземной плазме. Прежде всего, это эксперименты по активному воздействию на параметры энергичных частиц радиационных поясов Земли [Арманд, 1988], использование бортовых антенных устройств для низкочастотного (ОНЧ) импульсного зондирования околоземной плазмы [Inan, 2003], а также высокочастотных антенных устройств для внешнего радиоимпульсного зондирования ионосферы [Benson, 1982].

При взаимодействии пространственно-неоднородных высокочастотных полей умеренной интенсивности со слабостолкновительной плазмой одним из основных источников нелинейных эффектов является усредненная пондеромоторная сила. При этом, если плазма помещена во внешнее магнитное поле, в пространственно-локализованном высокочастотном поле усредненная пондеромоторная сила может приводить к перераспределению плазмы [Костров, 1998] и к генерации замкнутых дрейфовых токов, протекающих в плазме без возмущения плотности. Возмущения концентрации плазмы, а также возбуждаемые вихревые токи могут являться источниками КМП.

На крупномасштабном плазменном стенде «Крот» проводятся модельные эксперименты, в которых исследуются возмущения параметров слабостолкновительной замагниченной плазмы, возникающие в поле интенсивной высокочастотной накачки свистового диапазона $\omega \ll \omega_{ce} \ll \omega_{pe}$, где ω_{ce} – электронная циклотронная частота, ω_{pe} –

плазменная частота [Гушин, 2008]. Стенд «Крот» (рис. 1) представляет собой вакуумную камеру объемом 180 м^3 . Плазменный столб длиной 4 м и диаметром 1.5 м создается импульсным индукционным ВЧ-разрядом (частота 5 МГц, мощность 1 МВт, длительность импульса 1.5 мс) в аргоне при давлении $p = 3 \cdot 10^{-4}$ Тор. Внешнее магнитное поле создавалось установленным в вакуумном объеме соленоидом, $B_0 = 25 \div 250$ Гс. Эксперименты выполнялись после выключения плазмозоудующих генераторов в спокойной распадающейся плазме с концентрацией $n_e = 10^{10} \div 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при температуре электронов $T_e = 0.5 \div 3.5$ эВ.

Для возбуждения локализованного в пространстве ВЧ-поля накачки использовалась одновитковая рамочная антенна диаметром $d = 7$ см, установленная вблизи оси плазменного столба. К антенне подводился импульсный сигнал частотой $f_0 = 65 \div 85$ МГц $< f_{ce}$, соответствующей свистовому диапазону, и мощностью до $P = 300$ Вт. Для измерений концентрации плазмы использовался метод зонда с СВЧ-резонатором [Янин, 2008], для регистрации КМП – шестивитковые индуктивные зонды диаметром 1.8 см.

Проведенные исследования показали, что взаимодействие импульса ВЧ-накачки свистового диапазона частот со слабостолкновительной замагниченной плазмой сопровождается генерацией КМП (рис. 2). В области плазмы, занятой полем накачки, аксиальная (продольная) компонента КМП усиливает внешнее статическое магнитное поле в плазме, т. е. наблюдается парамагнитный эффект.

По нашему мнению, основными источниками КМП являются нелинейные токи, возбуждаемые за счет продольной и поперечной компонент усредненной пондеромоторной силы, действующей на заряженные частицы в пространственно локализованном высокочастотном поле накачки [Айдакина, 2011].

Большой интерес представляет крупномасштабная динамика КМП, возбуждаемых импульсной ВЧ-накачкой свистового диапазона частот [Stenzel, 1993]. Исследования показали, что импульсные магнитные возмущения переносятся как вдоль, так и

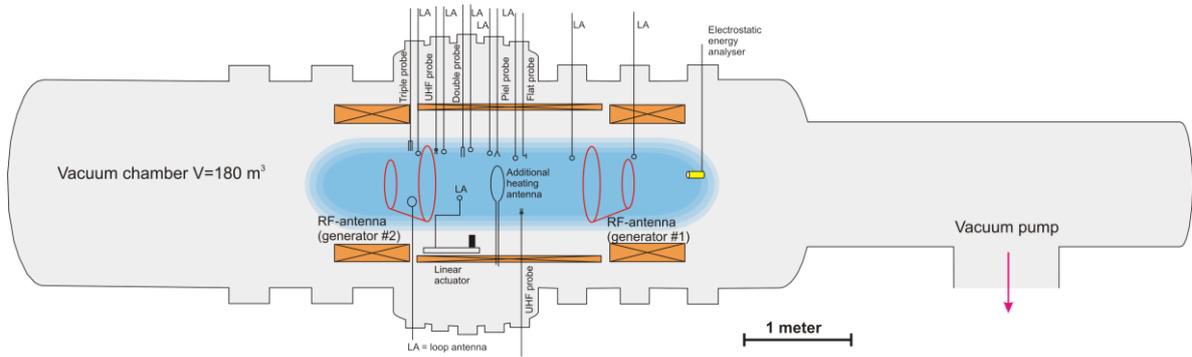


Рис. 1. Схема экспериментальной установки «Крот».

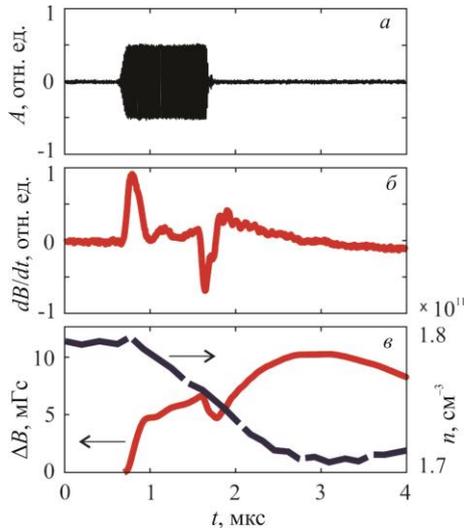


Рис. 2. Осциллограмма ВЧ-импульса накачки (частота $f_0=68.0$ МГц, мощность $P=300$ Вт, длительность 1 мкс) (а); неинтегрированный сигнал с магнитного зонда (б), аксиальная компонента возбуждаемого импульсом накачки КМП на расстоянии $z=3.5$ см от ВЧ-антенны (сплошная кривая) и одновременно регистрируемое возмущение концентрации фоновой плазмы на расстоянии $z=7$ см от ВЧ-антенны (штриховая линия). Величина внешнего магнитного поля $B_0=50$ Гс, температура электронов $T_e \sim 1$ эВ (в).

поперек внешнего магнитного поля. Скорость переноса этих возмущений не зависит от мощности ВЧ-накачки, т. е. плазменные токи, отвечающие за перенос КМП, представляют собой поляризационный отклик среды и не связаны с потоками ускоренных электронов.

Экспериментально полученные зависимости скорости продольного переноса магнитных возмущений от концентрации плазмы (рис. 3, б) и величины внешнего магнитного поля (рис. 3, в) с хорошей точностью повторяют теоретический закон дисперсии квазипродольных свистовых волн для характерных частот 1–5 МГц, определяемых, фактически, длительностью фронта импульса ВЧ-накачки. Таким образом, перенос индуцированных в плазме импульсных токов и магнитных полей осуществляется низкочастотными волнами свистового диапазона.

В ходе измерений КМП в различных радиальных позициях и для разных моментов времени после окончания импульса накачки была получена пространственно-временная структура КМП для ближней

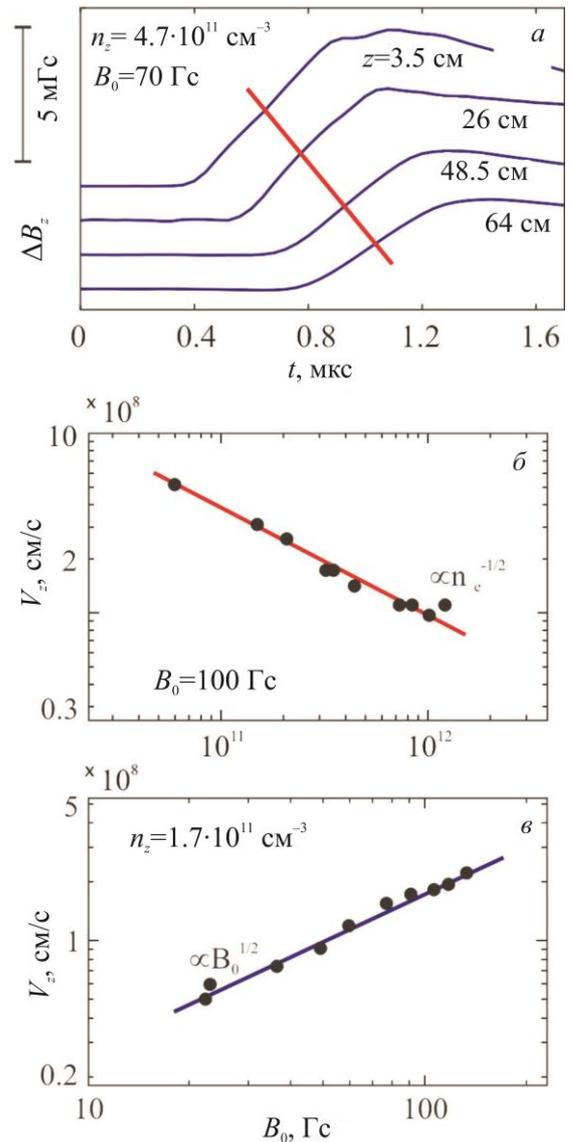


Рис. 3. Осциллограммы КМП (поперечная компонента), регистрируемые на различных расстояниях z от ВЧ-антенны (а); зависимость скорости переноса возмущений магнитного поля от концентрации плазмы (б) и величины внешнего магнитного поля (в); прямые соответствуют дисперсии волн свистового диапазона частот.

зоны излучающей антенны. Как видно из рис. 4, процесс проникновения возмущений поперек внешнего магнитного поля носит диффузионный характер с временным масштабом ~ 1 мкс.

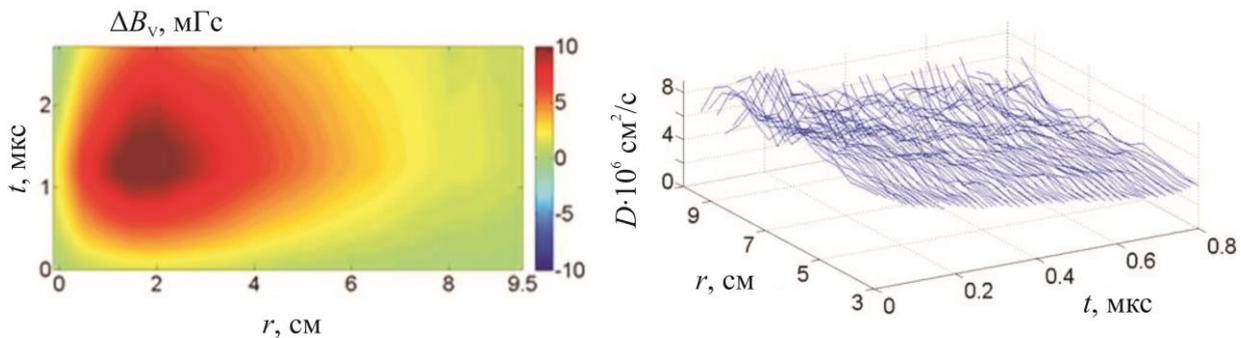


Рис. 4. Левая панель: пространственно-временная структура КМП (поперечная компонента, 1.3 мс после импульса ВЧ, импульс накачки $\tau=1.5$ мкс, концентрация и температура электронов $n_e=1 \cdot 10^{11}$ см⁻³ и $T_e=0.7$ эВ, внешнее магнитное поле $B_0=100$ Гс). Правая панель: пространственно-временная структура распределения коэффициента диффузии, имеющая вид плато (получено в приближении цилиндрической симметрии системы из результатов измерений КМП в различные моменты времени после окончания импульса накачки).

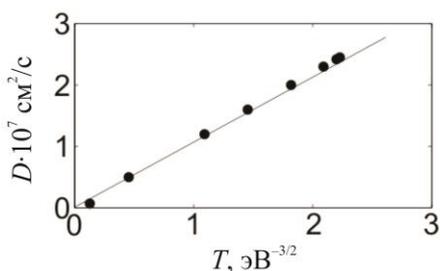


Рис. 5. Зависимости коэффициента диффузии от температуры (для кулоновской частоты столкновений).

С использованием численных методов была получена зависимость коэффициента диффузии от температуры, которая на рис. 5 показана вместе с теоретической зависимостью (исходя из данных о температуре, полученных методом двойного зонда) коэффициента диффузии для случая кулоновских столкновений $D \sim (T)^{-3/2}$. Хорошее согласование результатов подтверждает диффузионный характер проникновения возмущений поперек внешнего магнитного поля.

Обнаруженные эффекты генерации и динамики КМП, характерные для слабостолкновительной замагниченной плазмы, необходимо учитывать при планировании и проведении активных экспериментов в верхней ионосфере и магнитосфере Земли, в частности, с использованием мощных передатчиков диапазона ОНЧ на борту ИСЗ и ракет. Кроме того, в экспериментах с использованием периодической модуляции ВЧ-накачки, явления генерации КМП могут использоваться для параметрического возбуждения низкочастотных электромагнитных волн, например свистовых или альфвеновских, прямое возбуждение которых малоэффективно. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-02-12241-офи_м, № 13-02-97142-р_поволжье_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Айдакина Н.А., Гушин М.Е., Зудин И.Ю. и др. Квазистационарное магнитное поле, возбуждаемое в плазме радиопульсом свистового диапазона частот // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 93, № 9. С. 555–560.

Анпилов А.М., Бережецкая Н.К., Копьев В.А., Косый И.А. Парамагнитные свойства плазмы, создаваемой мощным микроволновым пучком // Там же. 1995. Т. 62. С. 783.

Арманд Н.А., Семенов Ю.П., Черток Б.Е. и др. Экспериментальное исследование в ионосфере Земли излучения рамочной антенны в диапазоне очень низких частот, установленной на орбитальном комплексе «Мир–Прогресс–28–Союз ТМ-2» // Радиотех. и электр. 1988. Т. 33, № 11. С. 2225.

Беляев В.С., Крайнов В.П., Лисица В.С., Матафонов А.П. Генерация быстрых заряженных частиц и сверхсильных магнитных полей при взаимодействии сверхкоротких интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями // УФН. 2008. Т. 178. С. 823.

Бродский Ю.Я., Жаров А.А., Нечуев С.И., Слуцкер Я.З. Генерация квазистатического магнитного поля в плазме интенсивной электромагнитной волной // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33. С. 160.

Гушин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В., Стриковский С.В. Параметрическая генерация свистовых волн при взаимодействии высокочастотных волновых пучков с магнитоактивной плазмой // Там же. 2008. Т. 88. С. 752.

Костров А.В., Смирнов А.И., Стародубцев М.В., Шайкин А.А. Влияние нелинейных эффектов на излучение волн свистового частотного диапазона в магнитоактивной плазме // Там же. 1998. Т. 67. С. 548.

Янин Д.В., Костров А.В., Смирнов А.И., Стриковский А.В. Диагностика нестационарных возмущений плотности плазмы // ЖТФ. 2008. Т. 78. С. 133.

Benson R.F. Stimulated plasma instability and nonlinear phenomena in the ionosphere // Radio Sci. 1982. V. 17. P. 1637–1659.

Inan U.S., Bell T.F., Bortnik J., Albert J.M. Controlled precipitation of radiation belt electrons // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. Iss A5. P. SMP6.

Popel S.I., Elsaesser K., Takeda Y., Inuzuka H. Magnetic field perturbations correlated with large amplitude lower-hybrid waves in a high-voltage linear plasma discharge // Phys. Plasmas. 2003. Т. 10. С. 2296.

Stenzel R.A., Urrutia J.M., Rousclup C.L. Pulsed currents carried by whistlers // Phys. of Fluids. 1993. V. B, N 5. P. 325.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия