Письма в ЖЭТФ, том 93, вып. 9, с. 555 – 560 © 2011 г. 10 мая

Квазистационарное магнитное поле, возбуждаемое в плазме радиоимпульсом свистового диапазона частот

Н. А. Айдакина, М. Е. Гущин, И. Ю. Зудин, С. В. Коробков[1)], *А. В. Костров, А. В. Стриковский*

Учреждение Российской академии наук Институт прикладной физики РАН, 603950, Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 2 марта 2011 г.

После переработки 23 марта 2011 г.

Экспериментально показана генерация квазистационарного магнитного поля (КМП) в слабостолкновительной замагниченной плазме в пространственно неоднородном высокочастотном поле свистового диапазона частот. 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. Исследована динамика возбуждаемых магнитных полей, обнаружено, что время установления КМП определяется временем включения высокочастотного поля, а перенос импульсных токов и магнитных полей из области их генерации происходит со скоростью низкочастотных свистовых волн.

1. Явления генерации квазистационарных токов и магнитных полей при взаимодействии электромагнитного излучения с плазмой представляют значительный фундаментальный интерес и важны для ряда приложений. На протяжении нескольких десятилетий активно исследуются квазистационарные магнитные поля (КМП), возбуждаемые в лабораторной плазме излучением оптического [1], микроволнового [2, 3] или радиочастотного [4] диапазонов. В околоземной плазме КМП, возбуждаемые интенсивными электромагнитными волнами, интересны с точки зрения генерации искусственных геомагнитных пульсаций в активных ионосферных экспериментах [5].

При взаимодействии пространственно неоднородных высокочастотных полей умеренной интенсивности со слабостолкновительной плазмой с пренебрежимо малой диссипацией электромагнитной энергии одним из основных источников нелинейных эффектов является усредненная пондеромоторная сила [6]. Если плазма помещена во внешнее магнитное поле, то в локализованном в пространстве высокочастотном поле усредненная пондеромоторная сила может приводить, с одной стороны, к перераспределению плазмы [7], а с другой, – к возбуждению замкнутых токов, протекающих по плазме без возмущения ее плотности [8]. Возмущения концентрации замагниченной плазмы, а также возбуждаемые вихревые токи могут быть источниками КМП, являющихся, фактически, возмущениями внешнего магнитного поля.

Изучение данных явлений актуально в связи с исследованиями волновых процессов в ионосфере и магнитосфере Земли. В частности, интерес представляет генерация КМП накачкой свистового диапазона частот, $\sqrt{f_{ci}f_{ce}} \ll f < f_{ce} \ll f_{pe}$ (где f_{ci}, f_{ce} – ионная и электронная циклотронные частоты, соответственно, f_{pe} – электронная плазменная частота, f – частота излучения). Волны данного типа, возбуждаемые в диапазоне крайне низких и очень низких частот (КНЧ и ОНЧ) наземными станциями и мощными бортовыми передатчиками космических аппаратов, можно использовать для активного воздействия на околоземную плазму и популяцию энергичных заряженных частиц, захваченных геомагнитной ловушкой. Кроме того, недавно в магнитосфере Земли были обнаружены естественные излучения свистового диапазона аномально большой амплитуды, режим взаимодействия которых с околоземной плазмой является существенно нелинейным [9]. Указания на возможность генерации КМП накачкой свистового диапазона можно найти в работах [10, 11], однако прямые экспериментальные наблюдения данного эффекта до настоящего времени отсутствовали.

В данной работе изложены результаты первых экспериментов, в которых наблюдались КМП, возбуждаемые высокочастотной (ВЧ) накачкой свистового диапазона. Эксперименты были поставлены на крупномасштабном плазменном стенде “Крот”, предназначенном для моделирования физических явлений в космической плазме. Параметры экспериментов были выбраны таким образом, что основным источником нелинейных токов, возбуждаемых неоднородным ВЧ полем в слабостолкновительной плазме, яв-

[1)]e-mail: korobkovs@gmail.com

лялась усредненная пондеромоторная сила. Исследованы механизмы генерации КМП локализованными в пространстве ВЧ полями свистового диапазона частот, пространственная структура и динамика КМП.

2. Экспериментальная установка представляет собой вакуумную камеру объемом 180 м^3. Плазменный столб длиной 4 м и диаметром 1,5 м создается импульсным ВЧ индукционным разрядом (частота 5 МГц, мощность 1 МВт, длительность импульса 1.5 мс) в аргоне при давлении $p = 3 \cdot 10^{-4}$ торр. Величина внешнего (статического) магнитного поля, создаваемого установленным в вакуумном объеме соленоидом, варьировалась в пределах $B_0 = 25 \div 250$ Гс. Эксперименты выполнялись после выключения плазмосоздающих генераторов, в спокойной распадающейся плазме с концентрацией $n_e = 5 \cdot 10^{10} \div 10^{12}$ 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 на частоте $f_0 = 65 \div 85$ МГц $< f_{ce}$, соответствующей свистовому диапазону, мощностью до $P = 300$ Вт (рис. 1a). Отношение плотности энергии электромагнитного поля W к плотности энергии теплового движения частиц плазмы $n_e T_e$ в ближней зоне антенны составляло величину $W/n_e T_e < 10^{-1}$. Длительность импульса накачки ($\tau = 0.1 \div 20$ мкс) выбиралась существенно меньшей характерных времен нагрева электронов $((\delta\nu_{ei})^{-1} \sim 500$ мкс, $\delta = 2m_e/m_i$, m_e и m_i – массы электрона и иона, соответственно, ν_{ei} – частота кулоновских столкновений). Таким образом, эффекты тепловой нелинейности не успевали развиться, и основной нелинейностью, приводящей к возмущениям концентрации плазмы и генерации КМП, являлась нелинейность, обусловленная усредненной пондеромоторной силой.

Для регистрации КМП использовались шестивитковые индуктивные зонды диаметром 1.8 см. Размещение зондов на подвижных штангах позволяло перемещать их по радиусу плазмы и поворачивать на произвольный угол относительно направления внешнего магнитного поля. По результатам калибровки, чувствительность зондовой системы, включавшей фильтры низких частот и усилитель с коэффициентом усиления $G = 58$ дБ, составила $\delta B \sim 10$ мкГс (1 нТл) при регистрации импульсных магнитных полей микросекундной длительности. Для измерений концентрации плазмы использовался метод зонда с СВЧ резонатором [12], модифицированный для регистрации малых нестационарных возмущений [13]. Чувствительность метода при измерении нестационарных возмущений плотности распадающейся плазмы, в соответствии с [13], достигает $\delta n_e/n_e \sim 10^{-5}$. Вариации плотности на относительном уровне $\Delta n_e/n_e \sim 10^{-2}$, характерном для описываемых экспериментов, приводят к существенным изменениям резонансной кривой СВЧ зонда и легко регистрируются без использования специальной усилительной аппаратуры. Измерения температуры электронов выполнялись двойным зондом.

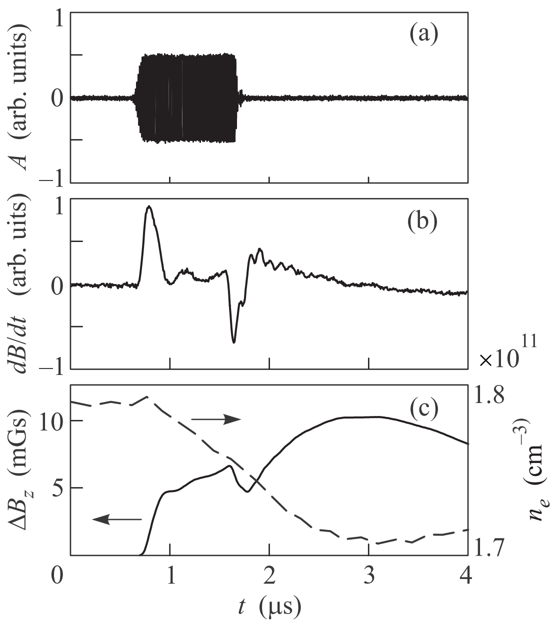

Рис. 1. (a) – осциллограмма ВЧ импульса накачки (частота $f_0 = 68.0$ МГц, мощность $P = 300$ Вт, длительность $\tau = 1$ мкс), (b) – неинтегрированный сигнал с магнитного зонда, (c) – аксиальная (ΔB_z) компонента возбуждаемого импульсом накачки КМП на расстоянии $z = 3.5$ см от ВЧ антенны (сплошная кривая) и одновременно регистрируемое возмущение концентрации фоновой плазмы на расстоянии $z = 7$ см от ВЧ антенны (штриховая кривая). Величина внешнего магнитного поля $B_0 = 50$ Гс, температура электронов $T_e \simeq 1$ эВ

Одной из важнейших проблем, возникающих при регистрации слабых импульсных магнитных полей в присутствии интенсивной ВЧ накачки, является защита измерительной аппаратуры от ВЧ сигнала, непосредственно принимаемого магнитными зондами, а также наводимого на чувствительную измерительную аппаратуру. Тракты магнитных зондов включали фильтры, ослаблявшие ВЧ сигнал на уровне не менее 100 дБ; кабельные трассы и измерительная аппаратура тщательно экранировались; зондовые цепи гальванически развязывались с вакуумной камерой и электрической сетью. Питание усилителя осуществлялось от аккумуляторной батареи, осциллограф включался в сеть через трансформатор, цепи синхронизации импульсного эксперимента подключались через трансформаторные развязки. Магнитные зонды помещались в электростатические экраны и изолировались от плазмы слоем диэлектрика толщиной 0.5 мм. Перечисленные меры позволили защитить измерительную аппаратуру от ВЧ сигнала, наводимого на зонд одновременно с сигналом КМП, существенно снизить уровень помех, а также предупредить появление ложных сигналов, обусловленных детектированием ВЧ импульса на слое пространственного заряда у поверхности зонда. Линейность измерительной системы проверялась отсутствием сигнала на ее выходе при подаче ВЧ импульса на вход, а также при помещении магнитного зонда непосредственно в ближнюю зону ВЧ антенны без плазмы (в вакууме). В плазме, в условиях возбуждения КМП, результаты магнитных измерений проверялись стандартным способом, а именно, по инверсии зондовых сигналов при повороте зондов на 180°.

3. Исследования показали, что взаимодействие импульса ВЧ накачки со слабостолкновительной замагниченной плазмой сопровождается возбуждением уверенно регистрируемых магнитными зондами КМП (рис. 1). Многочисленные проверки и контрольные эксперименты однозначно указывают на то, что единственным источником сигнала в зондовой цепи является импульсное магнитное поле, индуцированное ВЧ накачкой. В области плазмы, занятой полем накачки, аксиальная компонента КМП усиливает постоянное магнитное поле в плазме: наблюдается парамагнитный эффект. В условиях эксперимента величина КМП достигает $\Delta B \sim 10$ мГс, что соответствует возмущению внешнего магнитного поля на уровне до $\Delta B/B_0 \sim 10^{-4}$. Также, одновременно с обнаруженными КМП, регистрируются возмущения концентрации плазмы на уровне до $\Delta n_e/n_e \sim 5\cdot10^{-2}$.

В целом, зависимость возбуждаемых КМП от времени не повторяет форму огибающей импульса ВЧ накачки. Анализ этой зависимости (рис. 1c) позволяет выделить две составляющие наведенного в плазме магнитного поля, соответствующие, по-видимому, двум различным механизмам его генерации. Первая составляющая, медленно меняющаяся на масштабах длительности импульса ВЧ накачки, коррелирует с регистрируемыми в ближней зоне ВЧ антенны возмущениями плотности плазмы. Вытеснение плазмы из ближней зоны антенны продолжается после окончания импульса накачки. Значение концентрации оказывается минимальным через время порядка ~ 1 мкс и затем релаксирует к невозмущенному значению. Характерное время формирования и релаксации неоднородности концентрации определяется перераспределением плазмы на масштабе ближнего поля ВЧ антенны со скоростью ионного звука, $t \sim d/v_s \sim 10$ мкс. Как и возмущение плотности, парамагнитный эффект достигает максимальной величины через ~ 1 мкс после окончания импульса накачки, а затем релаксирует к невозмущенной индукции внешнего магнитного поля. Вторая составляющая аксиального КМП воспроизводит огибающую импульса ВЧ накачки и не связана с возмущениями концентрации плазмы. Характерное время установления и релаксации этой составляющей КМП определяется, фактически, длительностью фронтов ВЧ импульса (< 200 нс).

Измерения показывают, что возбуждаемые КМП имеют как продольную (аксиальную) (рис. 2a), так и поперечную (в основном — азимутальную) (рис. 2b)

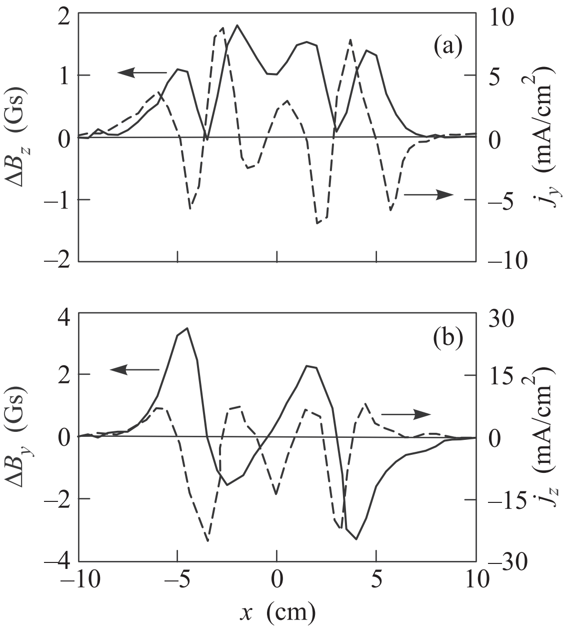

Рис. 2. Поперечные распределения КМП (сплошные кривые) и отвечающих за их генерацию компонент квазистационарного тока (штриховые кривые), установившиеся к окончанию импульса ВЧ накачки длительностью $\tau = 1$ мкс, регистрируемые на расстоянии $z = 3.5$ см от плоскости рамочной антенны: (a) – аксиальная компонента КМП и азимутальный ток, (b) – азимутальная компонента КМП и аксиальный ток. Концентрация электронов $n_e = 2\cdot10^{11}$ см$^{-3}$, температура электронов $T_e \simeq 0.7$ эВ, величина внешнего магнитного поля $B_0 = 100$ Гс

компоненты, сравнимые по абсолютной величине. Максимальные величины КМП достигаются в области плазмы, занятой ВЧ полем накачки (ближняя зона рамочной антенны), но пространственная структура обеих компонент КМП достаточно сложна. Отметим только, что поперечное распределение аксиальной (ΔB_z) компоненты КМП качественно воспроизводит структуру ближнего ВЧ магнитного поля рамочной антенны.

Для рамочной антенны, плоскость которой перпендикулярна направлению внешнего магнитного поля, цилиндрическая симметрия системы позволяет восстановить структуру нелинейных токов, обеспечивающих генерацию КМП. Соответствующие распределения плотности тока, полученные по результатам измерений КМП из квазистатического закона Ампера ($\mathrm{rot}\Delta\mathbf{B} = \frac{4\pi}{c}\mathbf{j}$), также приводятся на рис. 2. Из полученных результатов следует, что в плазме возбуждается система квазистационарных токов, величина и направление которых сложным образом изменяются по радиусу плазмы. Абсолютное значение плотности продольного тока j_z максимально напротив витков рамочной антенны; в соответствующих поперечных позициях ($x = \pm 3.5$ см) знак продольного тока соответствует движению электронов от антенны, то есть их вытеснению из области сильного ВЧ поля. Поскольку полный продольный ток через сечение плазмы равен нулю, а его плотность монотонно уменьшается по мере удаления от антенны вдоль оси z, возбуждаемые токи образуют замкнутую систему, причем их замыкание происходит непосредственно в области плазмы, занятой полем ВЧ накачки, и ее ближайшей окрестности.

Отдельный интерес представляет крупномасштабная динамика КМП, возбуждаемых импульсной ВЧ накачкой. На больших расстояниях от рамочной антенны в экспериментах регистрировались импульсные магнитные возмущения, переносимые вдоль направления внешнего магнитного поля, при этом возмущения концентрации плазмы вдали от антенны не наблюдались. Сигналы с магнитных зондов, разнесенных по продольной координате, качественно повторяют друг друга с точностью до задержки, увеличивающейся по мере удаления от ВЧ антенны вдоль оси z (рис. 3a). Исследования показали, что скорость переноса импульсных возмущений магнитного поля не зависит от мощности ВЧ накачки: 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. 3b) и величины внешнего магнитного поля (рис. 3c) хорошо соответствуют теоретическому закону дисперсии квазипродольных свистовых волн, $v_z \sim c\sqrt{f_{ce}f}/f_{pe}$ (где c – скорость света), для характерных частот $1 \div 5$ МГц, определяемых длительностью фронта импульса ВЧ накачки. Таким образом, перенос индуцированных в плазме импульсных токов и магнитных полей осуществляется низкочастотными волнами свистового диапазона. Подобный характер переноса импульсных токов и магнитных полей с временами $f_{ce}^{-1} \ll \Delta t \ll f_{ci}^{-1}$ соответствует режиму электронной магнитной гидродинамики [14] и экспериментально исследовался Стензелом с соавторами (см., например, [15]). Новизна полученных в данной работе результатов заключается в том, что генерация импульсных плазменных токов осуществляется не коротким видеоимпульсом, поданным на рамочную антенну [15], а за счет нелинейных эффектов, развивающихся в поле приложенного к рамочной антенне ВЧ радиоимпульса.

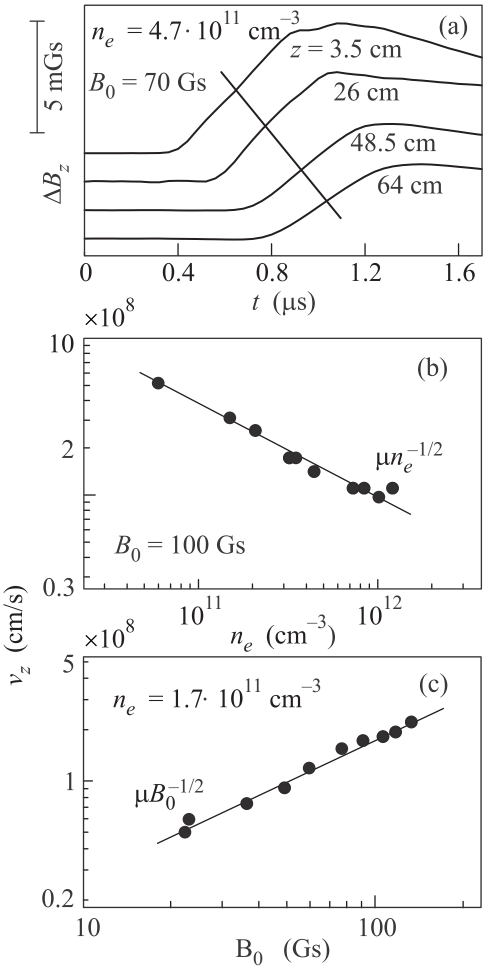

Рис. 3. (a) – осциллограммы КМП (ΔB_y-компонента), регистрируемые на различных расстояниях z от ВЧ антенны; зависимость скорости переноса возмущений магнитного поля от концентрации плазмы (b) и величины внешнего магнитного поля (c); прямые соответствуют дисперсии волн свистового диапазона частот $v_z \sim c\sqrt{f_{ce}f}/f_{pe} \propto \sqrt{B_0/n_e}$

4. Кратко обсудим результаты экспериментов. По нашему мнению, основным источником генерации КМП является усредненная пондеромоторная сила, действующая на заряженные частицы в пространственно неоднородном ближнем ВЧ поле рамочной антенны. Уменьшение концентрации плазмы, наблюдаемое в эксперименте, обусловлено продольной компонентой усредненной пондеромоторной силы. На границах формируемой в ближней зоне ВЧ антенны плазменной неоднородности возникают некомпенсированные токи намагничивания, которые приводят к локальному увеличению внешнего магнитного поля. Динамика данной составляющей КМП повторяет динамику перераспределения плазмы. Фактически, наблюдаемый парамагнитный эффект объясняется локальным уменьшением диамагнетизма плазмы в области, занятой полем ВЧ накачки. Из условия баланса поперечных давлений плазмы и магнитного поля можно получить следующее выражение для аксиальной компоненты КМП: $\Delta B_z/B_0 = -\frac{\beta}{2}\Delta n_e/n_e$, где $\beta = 8\pi n_e T_e/B_0^2$. Такая связь хорошо согласуется с полученными в эксперименте значениями ΔB_z и Δn_e. Например, для параметров рис. 1 ($n_e \simeq \simeq 2\cdot 10^{11}\,\text{см}^{-3}$, $B_0 = 50\,\text{Гс}$, $T_e \simeq 1\,\text{эВ}$, $\Delta n_e/n_e \simeq \simeq 5\cdot 10^{-2}$) получаем $\Delta B_z \simeq 5\,\text{мГс}$. Отличие полученной оценки от фактического значения ($\Delta B_z \simeq \simeq 10\,\text{мГс}$) обусловлено тем, что измерения возмущений концентрации были выполнены на большем расстоянии от ВЧ антенны ($z = 7\,\text{см}$), чем измерения КМП ($z = 3.5\,\text{см}$). Таким образом, в точке измерения КМП возмущения концентрации плазмы могут оказаться сильнее, чем на расстоянии $z = 7\,\text{см}$, достигая уровня $\Delta n_e/n_e \sim 10^{-1}$, обеспечиваемого за счет высокой плотности энергии ВЧ поля, сосредоточенной в ближней зоне антенны ($W/n_eT_e \sim \sim 10^{-1}$).

Поперечная компонента усредненной пондеромоторной силы вызывает дрейфовое движение электронов по траекториям, охватывающим плазменную область, занятую полем ВЧ накачки, по азимуту. Баланс сил в данном случае определяется выражением $c^{-1}[\mathbf{j}_d \times \mathbf{B}_0] = -\mathbf{F}_\perp$, где $\mathbf{j}_d$ – плотность азимутального дрейфового тока, $\mathbf{F}_\perp$ – поперечная пондеромоторная сила. Этот дрейфовый ток, по-видимому, является источником КМП, аксиальная составляющая которого воспроизводит огибающую импульса ВЧ накачки. Генерация данной составляющей КМП не связана с возмущениями концентрации плазмы, динамика установления и релаксации КМП определяется исключительно временем возбуждения и релаксации нелинейного тока, то есть длительностью фронтов ВЧ импульса.

Таким образом, результаты экспериментов показывают, что генерация квазистационарных токов и магнитных полей является важным свойством пространственно неоднородных ВЧ полей свистового диапазона частот, возбуждаемых в слабостолкновительной замагниченной плазме. Усредненная пондеромоторная сила является одним из основных источников КМП. Генерация КМП обусловлена перераспределением плазмы в ВЧ поле накачки и возникновением некомпенсированных токов намагничивания, а также возбуждением дрейфовых электронных токов, протекающих по плазме без возмущения ее концентрации.

Источником КМП является область локализации ВЧ поля накачки, в условиях эксперимента – ближняя зона рамочной антенны. Пространственная структура КМП и соответствующих нелинейных токов достаточно сложна, что связано с сильной неоднородностью ВЧ полей, возбуждаемых в плазме вблизи антенны. Индуцированные в плазме магнитные поля выносятся из области генерации низкочастотными волнами свистового диапазона, частотный спектр которых определяется длительностью фронта ВЧ импульса. Измерения, выполненные в широком диапазоне параметров замагниченной плазмы, убедительно показывают, что скорость переноса импульсных магнитных возмущений вдоль направления внешнего магнитного поля соответствует закону дисперсии квазипродольных свистовых волн.

Обнаруженные эффекты генерации КМП, характерные для слабостолкновительной замагниченной плазмы, могут наблюдаться в активных экспериментах, проводимых в верхней ионосфере и магнитосфере Земли, в частности, с использованием мощных передатчиков диапазона ОНЧ на борту ИСЗ и ракет. Учет подобных эффектов важен при планировании активных экспериментов; также, при периодической модуляции ВЧ накачки, явления генерации КМП могут использоваться для возбуждения низкочастотных электромагнитных волн, например, свистовых или альфвеновских.

Авторы выражают благодарность С.Э. Приверу за разработку и изготовление радиоэлектронной аппаратуры, использованной в ходе проведения экспериментальных исследований. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты # 09-02-91052-НЦНИ-а и # 10-02-01417-а), в рамках Научной программы VI.15 ОФН РАН.

1. В. С. Беляев, В. П. Крайнов, В. С. Лисица, А. П. Матафонов, УФН **178**, 823 (2008).

2. Ю. Я. Бродский, А. А. Жаров, С. И. Нечуев, Я. З. Слуцкер, Письма в ЖЭТФ **33**, 160 (1981).
3. А. М. Анпилов, Н. К. Бережецкая, В. А. Копьев, И. А. Коссый, Письма в ЖЭТФ **62**, 783 (1995).
4. S. I. Popel, K. Elsaesser, Y. Takeda, and H. Inuzuka, Phys. Plasmas **10**, 2296 (2003).
5. K. Papadopoulos, C. L. Chang, Geophys. Res. Lett. **12**, 279 (1985).
6. А. В. Гапонов, М. А. Миллер, ЖЭТФ **34**, 242 (1958).
7. А. В. Костров, А. И. Смирнов, М. В. Стародубцев, А. А. Шайкин, Письма в ЖЭТФ **67**, 548 (1998).
8. М. Е. Гущин, С. В. Коробков, А. В. Костров, С. В. Стриковский, Письма в ЖЭТФ **88**, 752 (2008).
9. C. Cattell, J. R. Wygant, K. Goetz et al., Geophys. Res. Lett. **35**, L01105 (2008).
10. В. И. Карпман, ЖЭТФ **89**, 71 (1985).
11. В. И. Карпман, А. И. Осин, О. Ф. Погребняк, Изв. ВУЗов, Радиофизика **31**, 409 (1988).
12. R. L. Stenzel, Rev. Sci. Instrum. **47**, 603 (1976).
13. Д. В. Янин, А. В. Костров, А. И. Смирнов, А. В. Стриковский, ЖТФ **78**, 133 (2008).
14. А. С. Кингсеп, К. В. Чукбар, В. В. Яньков, В сб. Вопросы теории плазмы, ред. Б. Б. Кадомцев, М.: Энергоатомиздат, **вып. 16**, 209 (1987).
15. R. A. Stenzel, J. M. Urrutia, and C. L. Rousclup, Phys. of Fluids B **5**, 325 (1993).