

ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ МНОГОЧАСТОТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МАГНИТОАКТИВНУЮ ПЛАЗМУ

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

INTERMODULATION EFFECTS ARISING DURING THE MULTIFREQUENCY WAVE ACTION ON MAGNETIZED PLASMA

N.A. Aidakina, M.E. Gushchin, I.Y. Zudin, S.N. Korobkov, A.V. Kostrov, A.V. Strikovskii

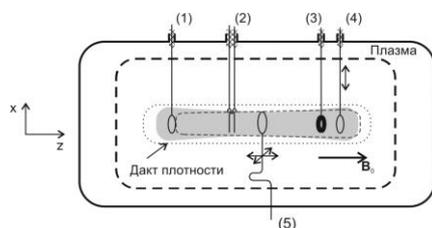
Доклад посвящен экспериментальным исследованиям нелинейного взаимодействия свистовых волн с замагниченной плазмой. В ходе экспериментов был обнаружен и исследован ряд интермодуляционных эффектов, включая кроссмодуляцию и самомодуляцию интенсивных волн, генерацию сигналов на разностной частоте и частоте модуляции. Полученные результаты позволили выделить несколько механизмов генерации возмущений плазмы высокочастотной накачкой.

The report is devoted to the experiments of nonlinear interaction of whistler waves with magnetoplasma. Some intermodulation phenomena are observed in experiments including crossmodulation and selfmodulation of the waves, as like as modulation frequency signal generation. Several mechanisms for plasma perturbation generation by high frequency pump are recognized.

Исследование механизмов нелинейного взаимодействия свистовых волн с плазмой и их возбуждения является актуальной задачей физики околоземной плазмы. Получаемые в рамках этого направления результаты могут быть использованы для развития новых методов диагностики околоземной плазмы, а также при интерпретации результатов натуральных экспериментов. Темой настоящего доклада является экспериментальное исследование нелинейных эффектов, возникающих при распространении в плазме интенсивных свистовых волн. В экспериментах основное внимание уделялось интермодуляционным эффектам: обогащению спектра волны накачки и пробных волн, а также генерации низкочастотных сигналов. Измерения проводились в условиях сильнозамагниченной слабостолкновительной плазмы, которые характерны для верхней ионосферы и магнитосферы.

Эксперимент был выполнен на крупномасштабном плазменном стенде «Крот». Концентрация плазмы варьировала в диапазоне $5 \cdot 10^{10}$ – $5 \cdot 10^{11}$ см⁻³, индукция статического магнитного поля составляла 100–200 Гс, температура невозмущенной плазмы равнялась 0.5–1 эВ. В этих условиях $\beta = 8\pi nT/B = 1.6 \cdot 10^{-5}$ – 10^{-3} , а частота ν электрон-ионных столкновений (которые преобладают над столкновениями с нейтральными частицами) равна $3 \cdot 10^6$ – 10^7 с⁻¹.

Схема установки приведена на рис. 1. Рамочная антенна, установленная на оси камеры, использовалась для возбуждения интенсивной волны накачки



- (1) антенна для излучения пробной волны (рамка, Ø2 см)
- (2) зонд с СВЧ резонатором на отрезке двухпроводной линии
- (3) магнитный зонд
- (4) приемная антенна (рамка, Ø2 см)
- (5) антенна для излучения волны накачки (рамка, Ø7 см)

Рис. 1. Схема установки. Антенны установлены на подвижных штангах. Плоскости всех антенн ориентированы перпендикулярно магнитному полю. Расстояние от антенны накачки до приемной антенны 30–50 см.

свистового диапазона частот. Волна накачки модулировалась по амплитуде, либо накачка состояла из двух волн с близкими частотами (бихроматическая накачка). Частота модуляции (биений) изменялась в диапазоне от 100 кГц до 3 МГц. Частота несущей АМ накачки равнялась 68.5 МГц; волны, составляющие бихроматическую накачку, имели частоту около 160 МГц. Мощность, подводимая к антенне, составляла 25–250 Вт, при этом плотность энергии в волне накачки была мала по сравнению с газодинамическим давлением плазмы. Вторая рамочная антенна излучала пробную свистовую волну с частотой 40–50 МГц, которая сама по себе не вызывала нелинейных эффектов. В условиях эксперимента волна накачки и пробные волны распространялись преимущественно вдоль направления внешнего магнитного поля, что обусловлено особенностью поверхности волновых векторов в свистовом диапазоне [Колданов и др., 2011]. Кроме того, для увеличения эффективности взаимодействия с плазмой обе волны каналировались дактом плотности, который формировался за счет длительного нагрева плазмы волной накачки [Заборонкова и др., 1992].

Сигнал, формирующийся в результате нелинейного взаимодействия волн, принимался рамочной антенной и подвергался спектральному анализу. Возбуждаемые накачкой переменные магнитные поля и возмущения концентрации регистрировались с помощью магнитного зонда и зонда с СВЧ-резонатором на отрезке двухпроводной линии [Янин и др., 2008].

В ходе эксперимента был обнаружен эффект возникновения спутников в спектре пробной волны при ее взаимодействии с накачкой (рис. 2, а). Интервалы между спутниками и несущей кратны частоте модуляции (биений) накачки, а сам спектр асимметричен. На рис. 2, б представлены спектры переменных составляющих амплитуды и фазы пробной волны (для их выделения применялись численные методы). Обе спектрограммы содержат узкополосный пик на частоте модуляции (биений) накачки. Таким образом, в эксперименте наблюдалась кроссмодуляция, в результате которой изменялись амплитуда и фаза пробной волны.

В спектре бихроматической накачки также отмечено появление эквидистантных спутников (возни-

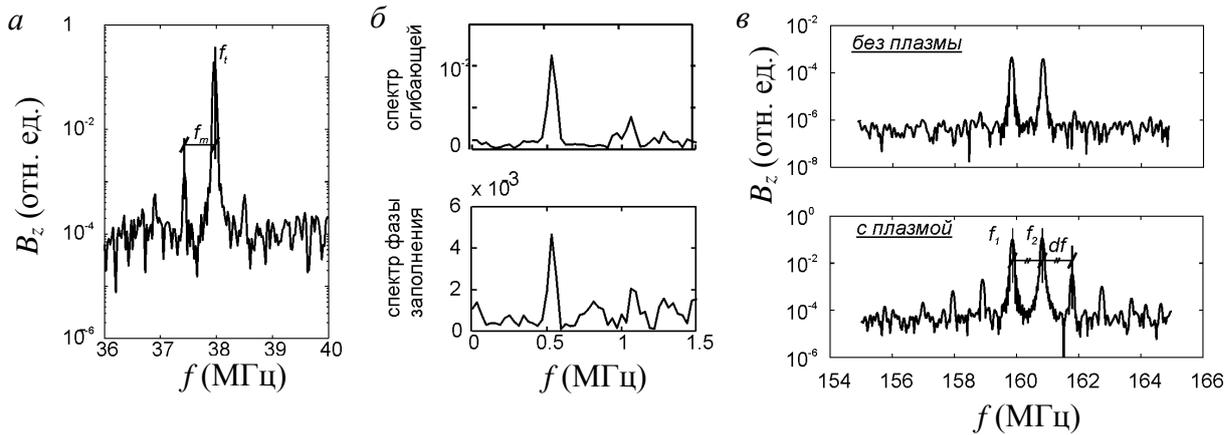


Рис. 2. Спектр пробной волны, проходящей через плазму, модифицированную накачкой (а). Спектры амплитуды и фазы заполнения пробной волны (б). Спектр волны накачки при взаимодействии с плазмой. Для сравнения приведен спектр, регистрируемый без плазмы (в).

кала самомодуляция), при этом, в отличие от спектра пробной волны, спектр оставался симметричным (рис. 2, в).

Причиной возникновения модуляции может быть распространение волны в нестационарной среде [Островский, Степанов, 1971]. В этом случае основным фактором, влияющим на распространение волн, должны являться наблюдавшиеся в эксперименте возмущения концентрации на частоте модуляции (биений) накачки. В эксперименте также были зарегистрированы возмущения магнитного поля, но их относительная амплитуда была значительно меньше. Проведенные измерения показали, что источниками возмущений магнитного поля являлись азимутальные токи, охватывающие область, занятую полем накачки.

Рисунок 3 иллюстрирует зависимость амплитуд возмущений магнитного поля и концентрации от частоты модуляции при заданных параметрах плазмы. При низких частотах наблюдается коррелированное убывание амплитуд. На более высоких частотах амплитуда переменного магнитного поля выходит на постоянный уровень, в то время как амплитуда возмущений концентрации продолжает убывать.

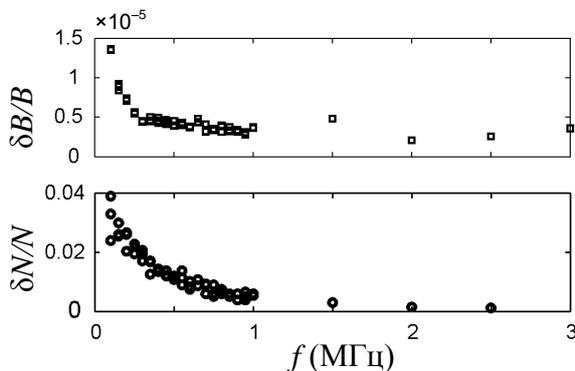


Рис. 3. Зависимость амплитуд возмущений магнитного поля (компонента B_z , параллельная оси камеры) и концентрации от частоты модуляции. Обе величины отнесены к невозмущенным значениям. Измерения выполнены на оси камеры на расстоянии ~ 10 см от плоскости антенны накачки. Параметры плазмы: $N=2 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$, $T=0.5-1$ эВ, $B=100$ Гс. Накачка – амплитудно-модулированная волна с частотой 68.5 МГц. Мощность, подводимая к антенне, – 250 Вт.

Указанные особенности можно объяснить наличием двух механизмов генерации магнитного поля, дающих аддитивный вклад. Первый связан с возникновением токов намагничения, охватывающих область плазмы с возмущающей концентрацией. Амплитуда возмущений концентрации в этом случае пропорциональна амплитуде возмущений магнитного поля [Айдакина и др., 2011]:

$$\delta B/B = \beta/2 \cdot \delta N/N.$$

Преобладанием данного механизма можно объяснить согласованное изменение амплитуд возмущения концентрации и магнитного поля при низких частотах модуляции. Количественные оценки подтверждают это предположение: в условиях эксперимента $\beta/2 = 2 \cdot 10^{-4}$, $(\delta B/B)/(\delta N/N) = 3.5 \cdot 10^{-4}$.

Другим источником возмущений магнитного поля являются дрейфовые токи, возникающие под действием поперечной составляющей усредненной пондеромоторной силы. Амплитуда таких токов, равно как и возбуждаемых ими магнитных полей, не зависит от частоты модуляции [Гуцин и др., 2008]. В эксперименте данный механизм проявился при высоких частотах модуляции.

Первый лабораторный эксперимент по генерации низкочастотных волн дрейфовыми токами, возникающими под действием усредненной пондеромоторной силы, описан в работе [Гуцин и др., 2008]. Впоследствии данный эффект наблюдался в натуральных экспериментах [Рябов, Котик, 2012].

Проведенные эксперименты позволили выявить эффекты самомодуляции и кроссмодуляции свистовых волн, возникающие на общей трассе распространения. Данные явления, по всей видимости, связаны с возмущениями плазмы, возникающими под действием интенсивной волны. Таким образом, продолжение этих исследований может быть полезно для развития методов диагностики нестационарных возмущений околоземной плазмы и геомагнитного поля.

В экспериментах было выявлено два механизма возбуждения магнитных полей свистовой накачкой, которые, по всей видимости, могут проявляться при

воздействии на плазму волн других типов. Результаты экспериментов [Айдакина и др., 2011] свидетельствуют, что возникающие возмущения могут распространяться в плазме в форме свистовых волн. Следует ожидать, что при соответствующем выборе условий эксперимента возможно возбуждение волн других типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Айдакина Н.А., Гушин М.Е., Зудин И.Ю. и др. Квазистационарное магнитное поле, возбуждаемое в плазме радиоимпульсом свистового диапазона частот // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 93, вып. 9. С. 555–560.

Гушин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В., Стриковский А.В. Параметрическая генерация свистовых волн при взаимодействии высокочастотных волновых пучков с магнитоактивной плазмой // Там же. 2008. Т. 88, вып. 11. С. 834–838.

Заборонкова Т.М., Костров А.В., Кудрин А.В. и др. Каналирование волн свистового диапазона частот в неоднородных плазменных структурах // ЖЭТФ. 1992. Т. 101, вып. 4(10). С. 1151–1161.

Колданов В.А., Коробков С.В., Гушин М.Е., Костров А.В. Численное моделирование электромагнитных полей, возбуждаемых рамочными антеннами в плазме в свистовом диапазоне частот // Физика плазмы. 2011. Т. 37, № 8. С. 729–738.

Коробков С.В., Гушин М.Е., Костров А.В. и др. Ближнее поле рамочной антенны в плазме в свистовом диапазоне частот // Там же. 2007. Т. 33, № 2. С. 120–127.

Островский Л.А., Степанов Н.С. Нерезонансные параметрические явления в распределенных системах // Известия вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14, № 4. С. 489–529.

Рябов А.В., Котик Д.С. Генерация УНЧ-пульсаций в ионосфере при воздействии на нее мощным КВ-излучением // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012. № 3(1). С. 65–70.

Янин Д.В., Костров А.В., Смирнов А.И., Стриковский А.В. Диагностика нестационарных возмущений плотности плазмы // ЖТФ. 2008. Т. 78, вып. 1. С. 133–136.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия