

УДК 533.9

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСПЫШЕЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЕ

М.Е. Викторов, С.В. Голубев

LABORATORY MODELING OF BURST PROCESSES IN A RAREFIED PLASMA

M.E. Viktorov, S.V. Golubev

В работе проведено исследование циклотронной неустойчивости на стадии распада плазмы импульсного электронно-циклотронного резонансного разряда в прямой аксиально-симметричной магнитной ловушке. В распадающейся плазме, где выполняется условие $f_{pe} / f_{ce} \ll 1$ (f_{pe} и f_{ce} – плазменная и циклотронная частоты электронов), зарегистрированы квазипериодические серии импульсов электромагнитного излучения, направленного поперек магнитного поля ловушки. Наблюдаемая неустойчивость имеет много общего с явлениями, наблюдаемыми в космических магнитных ловушках, например с генерацией аврорального километрового радиоизлучения Земли, где эффективное резонансное взаимодействие волн и частиц происходит в областях с пониженной плотностью плазмы.

In this paper we study the development of cyclotron instability during plasma decay after pulsed electron cyclotron resonance discharge in a mirror magnetic trap. In decaying plasma, where the condition $f_{pe} / f_{ce} \ll 1$ is satisfied (f_{pe} – electron plasma frequency, f_{ce} – electron gyrofrequency), series of quasi-periodic pulses of electromagnetic radiation propagated across the ambient magnetic field were detected. Observed instability has much in common with the phenomena observed in space magnetic traps, such as the generation of auroral kilometer radio emission of the Earth, where the effective resonant interaction of waves and particles occurs in areas with low density of plasma.

Несмотря на более чем полувековую историю, исследования взаимодействия электромагнитных волн и частиц в магнитоактивной плазме в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) до сих пор являются актуальными. Одним из наиболее интересных процессов, наблюдаемых в условиях ЭЦР, является генерация электромагнитного излучения в результате взрывного развития циклотронных неустойчивостей магнитоактивной плазмы, удерживаемой в различного рода магнитных ловушках, сопровождающихся высыпаниями энергичных частиц. Механизм генерации электромагнитного излучения в условиях ЭЦР в магнитоактивной плазме давно и успешно применяется для объяснения широкого класса явлений, наблюдаемых в разнообразных условиях в магнитосферах планет, в солнечных корональных петлях и атмосферах звезд, в лабораторных магнитных ловушках. Лабораторные эксперименты по изучению циклотронных неустойчивостей в магнитных ловушках проводились в ряде работ [Alikaev et al., 1968; Garner et al., 1987]. Процессы генерации электромагнитного излучения, наблюдаемые в лабораторном эксперименте, имеют много общего с функционированием естественных источников вспышек циклотронного излучения – космических циклотронных мазеров (КЦМ), ответственных за генерацию КНЧ-ОНЧ электромагнитного излучения в магнитосфере Земли [Беспалов, Трахтенгерц, 1986] и играющих ключевую роль в формировании отдельных видов солнечных вспышек. В последние годы в связи с появлением современных ЭЦР-источников на основе зеркальных ловушек интенсивно развиваются исследования, связанные с лабораторным моделированием процессов в космической и околоземной плазме. Так, использование гиротрона для нагрева плазмы в условиях ЭЦР позволяет значительно увеличить энергию, запасенную в неравновесной компоненте плазмы.

Мы демонстрируем использование лабораторной установки, основанной на прямой аксиально-симметричной магнитной ловушке с плазмой, создаваемой и поддерживаемой мощным миллиметровым излучением гиротрона в условиях электронного циклотронного резонанса, для исследования циклотронных неустойчивостей в космической плазме. Детальное описание экспериментальной установки приведено в [Водопьянов и др., 2005].

В исследовании нагрев плазмы, находящейся в магнитном поле пробочной конфигурации, осуществляется на основной гармонике гирочастоты. Нагрев в условиях ЭЦР позволяет создавать двухкомпонентную плазму, содержащую плотную холодную компоненту с изотропным распределением по скоростям, и менее плотную компоненту горячих электронов с анизотропной функцией распределения (с преобладанием поперечного по отношению к магнитному полю импульса над продольным). Концентрация и температура соответствующих компонент создаваемой плазмы равны $N_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_h \sim 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim 300 \text{ эВ}$, $T_h \geq 10 \text{ кэВ}$.

В условиях эксперимента можно говорить о двух характерных областях параметров: плотной плазме, поддерживаемой излучением гиротрона, и плазме на стадии распада. Применительно к данной системе возможно возникновение двух типов кинетических неустойчивостей. Циклотронная неустойчивость первого типа развивается в плотной плазме, поддерживаемой мощным СВЧ-излучением гиротрона. Здесь наблюдаются высыпания энергичных электронов из ловушки, которые связаны с возбуждением свистовых волн с направлением распространения, близким к направлению оси ловушки. Данный механизм развития неустойчивости был ранее изучен как для лабораторной плазмы [Водопьянов и др., 2005], так и для космической плазмы [Беспалов, Трахтенгерц, 1986]. Циклотронная неустойчивость

второго типа развивается в распадающейся плазме. Высыпания энергичных электронов в данном случае могут быть объяснены резонансным взаимодействием с медленной необыкновенной волной (Z-мода), распространяющейся поперек внешнего магнитного поля, или с быстрой необыкновенной волной (X-мода) с квазипоперечным направлением распространения.

В данной работе представлены результаты исследования циклотронной неустойчивости на стадии распада плазмы импульсного ЭЦР-разряда в прямой аксиально-симметричной магнитной ловушке. В распадающейся плазме после выключения ЭЦР-нагрева, когда плотность фоновой холодной плазмы значительно уменьшается так, что плазменная частота электронов становится много меньше электронной гирочастоты, был обнаружен новый тип неустойчивости [Водопьянов и др., 2007]. В такой плазме развитие неустойчивости определяется существенным различием во временах жизни в ловушке горячей и холодной компонент плазмы. После выключения ЭЦР-нагрева плотность холодной компоненты плазмы быстро уменьшается, тем самым создаются условия для возбуждения волн, распространяющихся поперек магнитного поля. В эксперименте, описанном в [Водопьянов и др., 2007], были обнаружены квазипериодические высыпания энергичных электронов из магнитной ловушки и синхронные импульсы электромагнитного излучения плазмы в направлении, перпендикулярном внешнему магнитному полю системы. Наблюдаемые высыпания энергичных частиц в данном случае были интерпретированы как результат резонансного взаимодействия электронов с медленной необыкновенной волной, распространяющейся в квазипоперечном направлении относительно внешнего магнитного поля. Механизм генерации последовательностей импульсных высыпаний на нелинейной стадии развития неустойчивости удалось объяснить в рамках модели циклотронного мазера [Шалашов и др., 2006], в котором превышение порога неустойчивости происходит за счет уменьшения потерь электромагнитной энергии, характерного для распада плазмы. Условия в распадающейся плазме и в областях с пониженной плотностью плазмы в магнитосфере Земли очень схожи; там происходит генерация аврорального километрового радиоизлучения с квазипоперечным направлением распространения по отношению к геомагнитному полю.

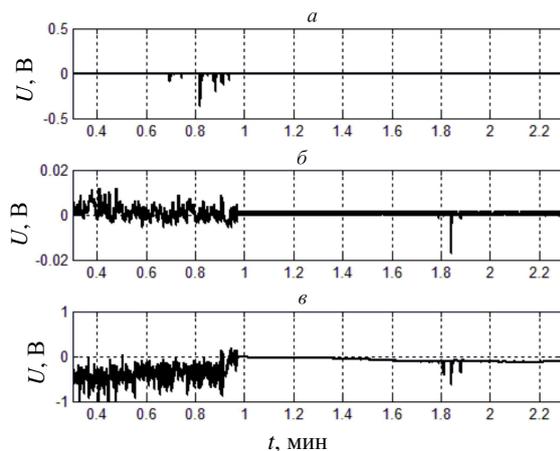
Целью данной работы является исследование электромагнитного излучения плазмы, которое вызывает высыпание энергичных электронов из ловушки. Для измерения спектра излучения использовался набор СВЧ-приемников с различными полосами пропускания. Каждый приемный канал состоял из двух фильтров: полосового, обеспечивающего требуемую полосу пропускания и крутизну характеристики, и фильтра нижних частот (ФНЧ), обеспечивающего широкую полосу заграждения со стороны верхних частот. Фильтры были разработаны таким образом, чтобы избежать попадания паразитного излучения гиротрона в полосу приема детекторов. Все СВЧ-детекторы были прокалиброваны, что

позволило провести абсолютные измерения мощности микроволнового излучения плазмы.

Согласно теории циклотронных неустойчивостей [Gaponov-Grekhov et al., 1981] предполагалось, что резонансное взаимодействие электромагнитных волн с горячими электронами двухтемпературной плазмы будет происходить в центре магнитной ловушки, т. е. там, где магнитное поле, а значит и циклотронная частота электронов, минимальны. Однако в данном эксперименте показано, что частота излучаемого излучения значительно превосходит значение циклотронной частоты в центре ловушки. Кроме того, частота детектируемого электромагнитного излучения растет при увеличении напряженности магнитного поля системы, что подтверждает циклотронный механизм развития неустойчивости.

В экспериментах электронная гирочастота в центре ловушки была равна 10–15 ГГц. В то же время, неустойчивость наблюдалась в виде серии широкополосных квазипериодических импульсов электромагнитного излучения частотой 25–27 ГГц и длительностью 1–10 мкс. Синхронно наблюдались высыпания энергичных (≥ 10 кэВ) электронов. Типичные сигналы приведены на рисунке. Максимальная амплитуда сигнала на СВЧ-детекторе достигала 300 мВ, что соответствует мощности излучения 5 мВт. Принимая во внимание величину телесного угла, который перекрывается детектором, и расстояние от оси ловушки до детектора, можно получить полную мощность излучения 3 Вт. Мощность наблюдаемых сигналов существенно превышает тепловые шумы, что говорит о стимулированном механизме излучения.

В дополнение к методам диагностики, описанным выше, для измерения вариаций давления плазмы во время развития неустойчивости использовался диамагнитный зонд. Данные, полученные при помощи диамагнитного зонда, позволили оценить полные потери энергии, сопровождающие развитие неустойчивости. Анализ показал, что около 2/3 энергии, изначально запасенной в горячей компоненте



Типичные сигналы с детекторов: СВЧ-излучение в направлении вдоль внешнего магнитного поля на частоте 6–18 ГГц (свистовые волны) (а), СВЧ-излучение в направлении перпендикулярно внешнему магнитному полю на частоте 18–26 ГГц (быстрая необыкновенная волна) (б), сигнал с детектора быстрых электронов, высыпающихся из магнитной ловушки (в). Длительность СВЧ-нагрева была равна 1 мс.

плазмы, выносятся из плазменного объема горячими электронами. Поэтому циклотронная неустойчивость играет важную роль в энергетическом балансе распадающейся плазмы и является более быстрым механизмом потерь горячих электронов, по сравнению с потерями вследствие кулоновских столкновений.

Результаты проведенных экспериментов и их сравнение с теорией позволят в будущем получить новые представления о процессах, играющих важную роль в динамике лабораторной, околоземной и космической плазмы.

Работа была проведена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственный контракт № 14.740.11.1333).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. Альфвеновские мазеры. Горький: ИПФ АН СССР, 1986. 191 с.

Водопьянов А.В., Голубев С.В., Демехов А.Г. и др., Лабораторное моделирование нестационарных процессов в космических циклотронных мазерах: первые результаты и перспективы // Физика плазмы. 2005. Т. 31, № 11. С. 927.

Водопьянов А.В., Голубев С.В., Демехов А.Г. и др. Наблюдение импульсных высыпаний быстрых электронов и циклотронный механизм генерации вспыхивающей активности в распадающейся плазме ЭЦР-разряда // ЖЭТФ. 2007. Т. 131, № 2. С. 330.

Шалашов А.Г., Водопьянов А.В., Голубев С.В. и др. Мазер на циклотронном резонансе в распадающейся плазме // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84, № 6, С. 375.

Alikaev V.V., Glagolev V.M., Morosov S.A. Anisotropic instability in a hot electron plasma, contained in an adiabatic trap // Plasma Phys. 1968. V. 10. P. 753.

Gaponov-Grekhov A.V., Glagolev V.M., Trakhtengerts V.Yu. Cyclotron resonance maser with background plasma // Sov. Phys. JETP. 1981. V. 53. P. 1146.

Garner R.C., Mauel M.E., Hokin S.A. et al. Warm electron-driven whistler instability in an electron-cyclotron-resonance heated, mirror-confined plasma // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. P. 1821.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород