

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫСЫПАНИЙ В КОСМИЧЕСКОМ ЦИКЛОТРОННОМ МАЗЕРЕ

А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, Д.А. Мансфельд

LABORATORY INVESTIGATION OF ELECTRON PRECIPITATIONS IN SPACE CYCLOTRON MASERS

A. V. Vodopyanov, S. V. Golubev, D. A. Mansfeld

Обсуждаются результаты экспериментального исследования автоколебательного режима развития циклотронной неустойчивости неравновесной плазмы электронно-циклотронного резонансного разряда в простой магнитной ловушке, проводимого в рамках работ по лабораторному моделированию нестационарных процессов в космических циклотронных мазерах. Плазма в ловушке содержит две популяции электронов, одна из которых (основная) имеет концентрацию $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и температуру $\sim 300 \text{ эВ}$, а другая (энергичная) $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и 10 кэВ соответственно. Неустойчивость проявляется в виде квазипериодических импульсных высыпаний энергичных электронов из ловушки, сопровождающихся всплесками электромагнитного излучения на частоте ниже электронной гирочастоты в центре ловушки.

При помощи системы алюминиевых фильтров различной толщины, устанавливаемой перед датчиком, регистрирующим электроны (pin-диодом), измерена функция распределения вылетевших из ловушки электронов по энергиям. Получено максвелловское распределение по энергиям с температурой $\sim 8 \text{ кэВ}$. Это находится в хорошем соответствии с результатами измерений температуры энергичных электронов в ловушке по их тормозному рентгеновскому излучению.

С помощью измерений диамагнетизма плазмы проведено исследование динамики энергообмена горячей компоненты плазмы и возбуждаемых в мазере волн.

При помощи перемещаемого pin-диода, расположенного в диагностической камере, проведены измерения пространственного распределения вылетающих из ловушки энергичных электронов. Установлено, что пространственная структура электронных высыпаний существенно зависит от величины магнитного поля в центре ловушки и при некоторых его значениях может носить сильно неоднородный характер. Так при магнитном поле ловушки, соответствующем максимальной генерации СВЧ-излучения при циклотронной неустойчивости, максимум электронных высыпаний наблюдается на периферии системы, в то время как в центре имеется провал. При увеличении магнитного поля максимум высыпаний приближается к оси ловушки, и в итоге распределение приобретает равномерно спадающий при удалении от центра характер. Измерения показали, что радиальное распределение концентрации основной плазмы, в отличие от высыпания энергичных электронов, остается монотонно спадающим от центра при всех режимах нагрева. Можно предположить, что немонотонное радиальное распределение высыпаний энергичных электронов обусловлено соответствующим распределением электромагнитного поля в возбуждаемых при циклотронной неустойчивости волнах. В этом отношении наблюдаемое явление имеет сходство с формированием пространственной структуры пульсирующих пятен в полярных сияниях.

We present the results of experimental study of an auto-oscillation regime of the cyclotron instability in nonequilibrium ECR-discharge plasma in a simple mirror machine. This work is performed in the context of laboratory modeling of non-stationary processes in space cyclotron masers. The plasma comprises two populations of electrons, one of which (bulk plasma) has the number density $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and the temperature $\sim 300 \text{ eV}$, and the other (energetic) $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ and 10 keV , respectively. The instability occurs as quasi-periodic bursts of precipitated energetic electrons, accompanied with bursts of the electromagnetic radiation at frequencies below the electron gyrofrequency in the trap center.

Using the set of Al filters of different thicknesses, placed in front of the energetic electrons detector (PIN diode), the energy distribution function (EDF) of the precipitated electrons has been measured. As the result, the Maxwellian EDF with temperature $\sim 8 \text{ keV}$ has been obtained. This result is in a good agreement with the measurements of energetic-electron temperature by bremsstrahlung emission of the plasma.

The investigation of energy exchange between the hot plasma component and excited waves in maser has been performed by means of plasma diamagnetism measurements.

By moving the PIN diode across the trap axis, we obtained the spatial distribution of precipitated energetic electrons. It has been found that the spatial structure of electron precipitation essentially depends on the value of magnetic field at the trap center, and can be non-monotonic under certain conditions. In particular, if the magnetic field corresponds to the most intense electromagnetic-wave generation upon the cyclotron instability, then the precipitation is peaked at the periphery of the chamber, with a hole observed in the center. As the magnetic field increases, the precipitation maximum approaches the center, and finally the distribution acquires a monotonic radial profile. Measurements show that the radial distribution of the bulk plasma density, unlike the energetic-electron precipitation, has a monotonic structure for all regimes. We attribute the non-uniform spatial structure of energetic electrons to the respective electromagnetic field distribution in the waves excited upon the cyclotron instability. In this respect, the proposed mechanism for the observed phenomenon has a similarity with the spatial structure formation of pulsating auroral patches.

Введение

Динамика большого числа процессов в космической плазме во многом определяется резонансным взаимодействием частиц и волн, в частности, циклотронным взаимодействием. Настоящая работа продолжает ряд исследований, направленных на лабораторное моделирование космических циклотронных мазеров (КЦМ) [1, 2], и посвящена изуче-

нию характеристик высыпаний энергичных электронов. Лабораторный эксперимент дает возможность многократного повторения измерений при контролируемом изменении параметров. В то же время лабораторное моделирование имеет свои трудности, связанные уже со слишком малыми пространственными и временными масштабами моделируемых процессов при их переносе из космоса

в лабораторные условия. При выполнении ряда условий на безразмерные параметры можно утверждать, что процессы, протекающие в лабораторной плазме, имеют много общего со схожими процессами в космических магнитных ловушках, в частности, в радиационных поясах Земли.

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. СВЧ-излучение гиротрона (1) (частота 37.5 ГГц, мощность 130 кВт, длительность импульса 1.5 мс, линейная поляризация) фокусировалось диэлектрической линзой в центр разрядной камеры. Интенсивность излучения в фокальной плоскости была до 10 кВт/см². Разрядная камера диаметром 70 мм находилась в аксиально-симметричной зеркальной магнитной ловушке, магнитное поле в которой создавалось двумя соленоидными (2). Длительность импульса магнитного поля 13 мс, максимальное значение напряженности магнитного поля в пробке 3.5 Тл, пробочное отношение 4. Длина ловушки L (расстояние между пробками) равнялась 25 см. Рабочий газ (аргон, азот) напускался в разрядную камеру через импульсный клапан из колбы, диапазон рабочих давлений от 10⁻⁵ до 10⁻³ Торр. Плазма в ловушке образуется в результате ЭЦР-пробоя газа и содержит две популяции электронов, одна из которых (основная) имеет концентрацию ~ 10¹³ см⁻³ и температуру ~ 300 эВ, а другая (энергичная) ~ 10¹⁰ см⁻³ и 10 кэВ соответственно [3].

Циклотронная неустойчивость проявляется в виде квазипериодических импульсных высыпаний энергичных электронов из ловушки, сопровождающихся всплесками электромагнитного излучения на частоте ниже электронной гирочастоты в центре ловушки. Для регистрации энергичных электронов, покинувших магнитную ловушку, использовался (рис. 1) рpиn-диод СППД-11-04 (5), который способен регистрировать электроны с энергией в диапазоне от 7 до 500 кэВ. Диод располагался на расстоянии 60 см от центра магнитной ловушки на подвижном вводе и мог перемещаться в поперечных направлениях. Перед входным окном детектора имелась возможность располагать набор алюминиевых фильтров различной толщины (см. далее) и магнитную завесу (6). С целью контроля режима разряда и диагностики параметров плазмы на манипулятор также устанавливался ленгмюровский зонд (7). Для измерения энергетических потерь плазмы использо-

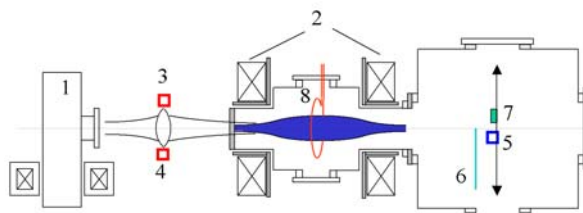


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – гиротрон (37.5 ГГц, 130 кВт, 1 мс), 2 – пробкотрон (25 см, $R = 4-10 B_{\max} = 3.5$ Тл), 3, 4 – приемники СВЧ (с полосами >2, >5.4, >8.2, >11.8 ГГц), 5 – рpиn-диод (детектор энергичных электронов), 6 – набор алюминиевых фильтров, магнитная завеса, 7 – ленгмюровский зонд, 8 – диамагнитный зонд.

вался диамагнитный зонд (8), выполненный в виде петли внутри вакуумного объема, охватывающей всю плазму в центральном сечении ловушки с пассивной интегрирующей цепочкой. Все сигналы с датчиков подавались на многоканальный цифровой осциллограф и записывались на ЭВМ.

Энергетический спектр

Для получения информации об энергетическом спектре покидающих ловушку электронов с помощью системы алюминиевых фильтров различной толщины, устанавливаемых перед окном рpиn-диода, была измерена функция распределения горячих электронов по энергии. Используемые фильтры имели толщину 2; 4; 8; 30 микрон. Толщина фильтра определяла минимальную энергию, которую должны иметь электроны, чтобы пролететь через фильтр. С учетом чувствительности рpиn-диода (7 кэВ) значения минимальной энергии для приведенных выше толщин фильтров равны соответственно 25; 32; 43; 84 кэВ.

Измеренное распределение быстрых электронов по энергиям представлено на рис. 2. Прямая линия соответствует распределению Максвелла с $T_e = 8$ кэВ. Это находится в хорошем соответствии с результатами экспериментов по измерению температуры энергичных электронов по тормозному рентгеновскому излучению [3].

Следует заметить, что используемый рpиn-диод кроме энергичных электронов способен регистрировать кванты рентгеновского излучения с энергиями до 40 кэВ. Поэтому для проверки рядом с рpиn-диодом был поставлен постоянный магнит, создающий магнитное поле, отклоняющее электроны. При этом сигнал датчика очень сильно уменьшился; это говорит о том, что без магнита мы регистрируем электроны.

Таким образом, проведенная диагностика позволяет получить важную информацию о функции распределения высыпавшихся из ловушки электронов при развитии циклотронной неустойчивости.

Диамагнитные измерения

Диамагнитный зонд использовался для измерения быстрых вариаций газокINETического давления плазмы, связанных с импульсными выбросами горячих электронов. Диамагнитный зонд представлял собой проводящую медную петлю, охватывающую плазменный столб. Вспышечный режим развития циклотронной неустойчивости сопровождается выбросом горячих электронов – изменением магнитного момента среды, т.е. быстрым изменением магнитного потока через петлю, которое наводит в ней э.д.с.

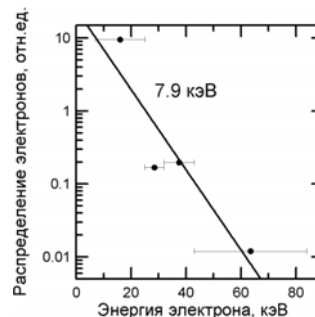


Рис. 2. Распределение вылетевших из ловушки электронов по энергии. Прямая линия соответствует максвелловскому распределению с температурой 7.9 кэВ.

В наших экспериментах диамагнитная петля помещалась в центральном сечении ловушки перпендикулярно силовым линиям магнитного поля (см. рис. 1). Петля ориентировалась таким образом, что возрастание магнитного потока через контур петли давало положительный сигнал на осциллографе. Выбросы плазмы из ловушки приводят к увеличению магнитного потока и, как следствие, регистрируются осциллографом в виде положительных импульсов (рис. 3).

Использование этой диагностики позволяет в нашем случае изучать динамику энергосодержания плазмы. Проинтегрировав сигнал за один всплеск, получаем, что за один «пичок» из ловушки выносятся $\sim 10^{-3}$ Дж. Характерная длительность «пичка» составляет 100 нс, следовательно, мощность такого выброса составляет ~ 10 кВт. Принимая во внимание, что горячая плазменная фракция имеет концентрацию 10^{10} см $^{-3}$ и температуру 10 кэВ, получаем, что за один всплеск из ловушки выносятся от 10 до 100 % горячей электронной популяции.

Изучение пространственного распределения высыпаний энергичных электронов

В наших экспериментах по изучению электронных высыпаний, сопровождающих развитие автоколебательного режима циклотронной неустойчивости, было замечено, что при некоторых условиях пространственное распределение вылетающих из ловушки электронов может носить сильно неоднородный характер. Измерение пространственного распределения вылетающих из ловушки горячих электронов проводилось при помощи перемещаемого pin-диода, расположенного в диагностической камере. Перемещение датчика осуществлялось как в вертикальной, так и горизонтальной плоскости с шагом 2 см. В выбранной точке пространства записывались несколько реализаций сигнала, после чего pin-диод перемещался в другую точку. Для обработки сигнала в качестве параметра, характеризующего интенсивность электронных высыпаний, была выбрана суммарная интенсивность сигнала с датчика. Зная этот параметр, можно оценить плотность потока энергии регистрируемых электронов. Для уменьшения погрешности измерений проводилось статистическое усреднение параметра по нескольким реализациям.

На рис. 4 приведены результаты пространственных измерений в вертикальной плоскости, получен-

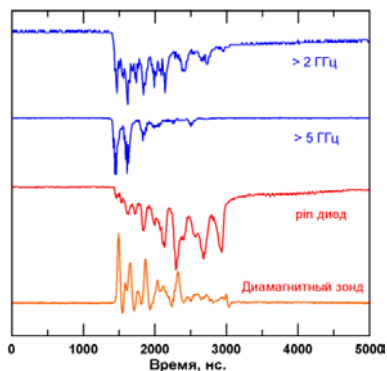


Рис. 3. Типичная серия «пичков». Осциллограммы сигналов (сверху вниз): СВЧ-излучения в канале >2 ГГц, >5 ГГц, pin-диода, диамагнитного зонда.

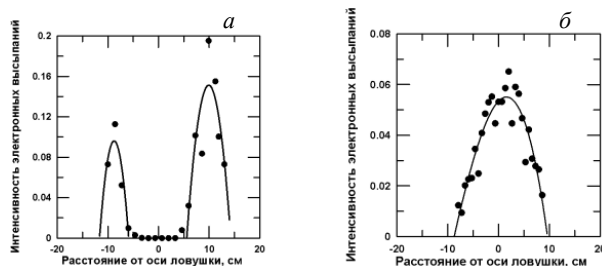


Рис. 4. Поперечные распределения интенсивности электронных высыпаний: а – магнитное поле в центре ловушки 5060 Гс, б – 3600 Гс.

ные при разных величинах магнитного поля ловушки и фиксированных остальных параметрах. Выбранное значение магнитного поля для рис. 4, а соответствует максимальной генерации СВЧ-излучения при циклотронной неустойчивости. Из графика видно, что электронные высыпания симметричны относительно центра диагностической камеры и максимум приходится на периферию (около 10 см от центра). Эксперименты проводились несколько раз и показали хорошую повторяемость данного результата.

Зависимость пространственного распределения в горизонтальной плоскости вылетающих из ловушки электронов при разных магнитных полях показана следующая. При малых магнитных полях ($B_L = 3600$ Гс) радиальное распределение носит монотонный характер (см. рис. 4, б), затем (при $B_L = 5060$ Гс) в центре наблюдается провал. При дальнейшем увеличении магнитного поля до значения 5900 Гс провал в центре уменьшается, и максимумы сближаются. При максимальном значении магнитного поля 6400 Гс распределение снова приобретает равномерно спадающий при удалении от центра характер.

Необходимо отметить, что при этом фоновая (основная) плазма практически не изменяет своего пространственного распределения. Можно предположить, что немонотонное радиальное распределение высыпаний энергичных электронов обусловлено соответствующим распределением электромагнитного поля в возбуждаемых при циклотронной неустойчивости свистовых волнах. Известно, что поперечная компонента волнового поля в круглом волноводе имеет ноль на оси волновода. Таким образом, для объяснения высыпаний с максимумом на оси естественно предположить участие в этом процессе продольной компоненты волнового поля, которая может взаимодействовать с энергичными электронами на черенковском резонансе.

Таким образом, экспериментально продемонстрировано влияние модовой структуры поперечного (по отношению к внешнему магнитному полю) распределения волнового поля на циклотронную неустойчивость в лабораторной магнитной ловушке. Этот результат показывает возможность лабораторного моделирования циклотронной неустойчивости в космических плазменных волноводах, например, таких, которые приводят к формированию пульсирующих пятен в полярных сияниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Демехов А.Г., Мансфельд Д.А., Трахтенгерц В.Ю. Лабораторное моделирование нестационарных процессов в космических циклотронных мазерах // Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды VIII конференции молодых ученых «Астрофизика и физика околоземного пространства», Иркутск, 12–17 сентября 2005 г. Иркутск, 2005 (в печати).
2. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Демехов А.Г., Зорин В.Г., Мансфельд Д.А., Разин С.В., Трахтенгерц В.Ю. Физика плазмы. 2005. Т. 31, № 11. С. 1–12.
3. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Зорин В.Г., Разин С.В., Шилов М.А. Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, № 14. С. 90–94.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород