

УДК 533.9.01

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ КИНЕТИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСНОГО РАЗРЯДА, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА С ЧАСТОТОЙ 24 ГГц

*Д. А. Мансфельд, М. Е. Викторов, А. В. Водопьянов**

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

В плазме электронного циклотронного резонансного разряда, поддерживаемого мощным непрерывным излучением гиротрона с частотой 24 ГГц в прямой магнитной ловушке, впервые экспериментально обнаружена неустойчивость, проявляющаяся в виде высыпаний горячих электронов, происходящих синхронно с генерацией всплесков электромагнитного излучения. Наблюдаемая неустойчивость имеет кинетический характер и обусловлена формированием неравновесного распределения горячих частиц по скоростям. Предложено два возможных объяснения механизма возбуждения волн в двухкомпонентной плазме со стационарным источником неравновесных частиц. Результаты проведённых исследований представляют интерес для моделирования динамики магнитосферных циклотронных мазеров.

ВВЕДЕНИЕ

Источники мощного сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения — гиротроны — широко используются для электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы в лабораторных магнитных ловушках, находят применение в установках по термоядерному синтезу, ЭЦР-источниках многозарядных ионов, источниках рентгеновского и ультрафиолетового излучения. Одной из характерных особенностей нагрева плазмы в условиях электронного циклотронного резонанса является формирование электронных фракций с неравновесным распределением по скоростям и последующее возбуждение волн в плазме в результате кинетических неустойчивостей. Недавно было показано, что даже в магнитогидродинамически стабильных магнитных системах, используемых в ЭЦР-источниках многозарядных ионов, высыпания горячих частиц в результате кинетических неустойчивостей могут существенно влиять на удержание плазмы, ограничивая достижение предельных параметров таких источников [1].

С другой стороны, в настоящее время большой интерес вызывает фундаментальная проблема происхождения различных типов электромагнитных излучений, генерирующихся энергичными заряженными частицами в природных магнитных ловушках, в т. ч. в магнитосферах Земли и планет Солнечной системы [2–4], в солнечных корональных петлях [5, 6] и т. д. Закономерности формирования этих излучений и параметры их воздействия на энергичные заряженные частицы, а также условия перехода от квазистационарного к импульсному режиму генерации и обратного перехода являются предметом активного исследования, поскольку нелинейный характер указанных процессов порождает целый ряд до сих пор нерешённых задач. В виду универсальности физических механизмов генерации излучения, существенные аспекты природных систем могут быть воспроизведены в лабораторных условиях в открытых магнитных конфигурациях с магнитными пробками. Использование мощного СВЧ-излучения гиротронов позволяет существенно увеличить концентрацию и энергию запаасаемых в ловушке частиц (вплоть до релятивистских

* avod@yandex.ru

значений), что даёт возможность исследовать различные режимы возбуждения волн энергичными частицами.

В данной работе обсуждаются первые эксперименты по изучению процессов генерации электромагнитного излучения при кинетических неустойчивостях неравновесной плазмы электронного циклотронного резонансного разряда, поддерживаемого непрерывным СВЧ излучением гиротрона на частоте 24 ГГц, в зеркальной магнитной ловушке.

1. ОПИСАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Для создания и нагрева плазмы использовался технологический гиротронный комплекс, генерирующий непрерывное электромагнитное излучение с частотой 24 ГГц и мощностью до 5 кВт. Непрерывное излучение гиротрона, проходя через согласованный СВЧ ввод, попадает в центр разрядной камеры. Конструкция СВЧ ввода обеспечивает передачу в разрядную камеру более 90 % мощности гиротрона, а также обеспечивает защиту гиротрона от потоков плазмы и отражённого плазмой излучения. На выходе из разрядной камеры установлена металлическая диафрагма с пятью отверстиями с диаметром 6 мм, формирующая резонатор для СВЧ излучения. Подача рабочего газа (аргон) в разрядную камеру контролируется прецизионным ручным натекателем, установленным со стороны СВЧ ввода. Давление рабочего газа в камере измеряется широкодиапазонным вакуумметром СС-10. Откачка воздуха из камеры осуществляется безмасляными форвакуумным и турбомолекулярным насосами, обеспечивающими предельное остаточное давление в камере $(1 \div 2) \cdot 10^{-7}$ Торр. Диапазон рабочих давлений составляет $2,5 \cdot 10^{-7} \div 10^{-6}$ Торр. Для создания условий электронно-

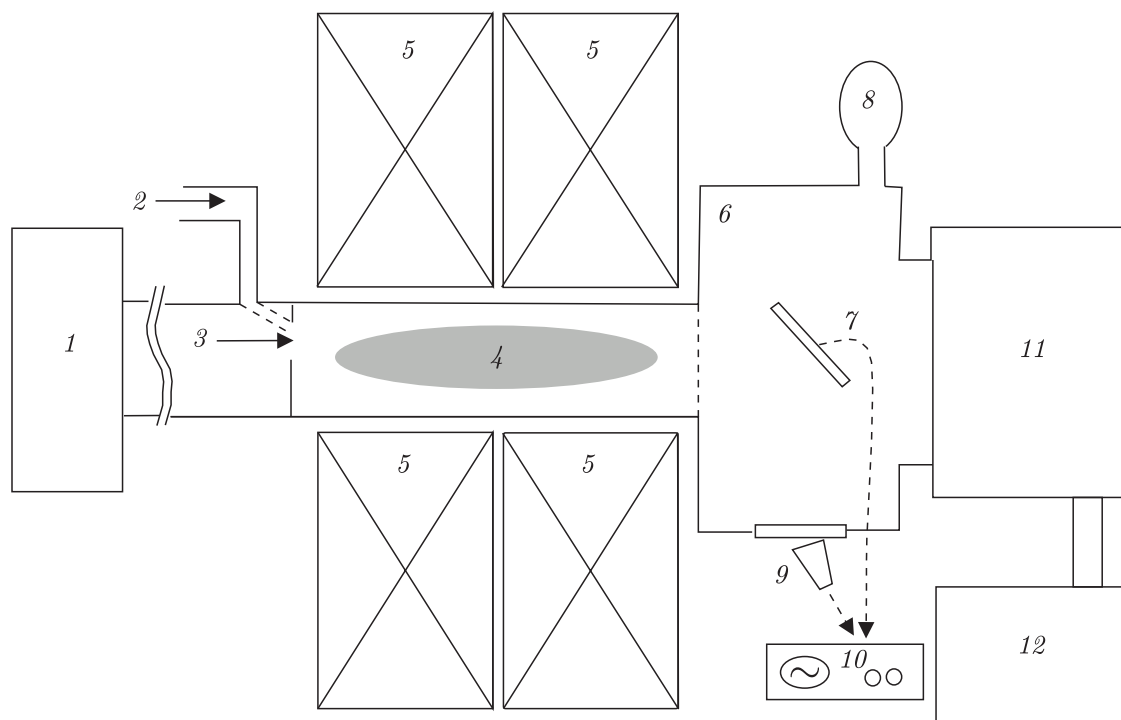


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — гиротрон, 2 — направление подачи аргона, 3 — направление ввода СВЧ излучения, 4 — плазма, 5 — магнитная ловушка, 6 — диагностическая камера, 7 — зонд, 8 — вакуумметр СС-10, 9 — СВЧ антенна, 10 — осциллограф, 11 — турбомолекулярный насос, 12 — форвакуумный насос

го циклотронного резонанса разрядная камера помещена в магнитное поле, создаваемое двумя магнитными катушками биттеровского типа с водяным охлаждением.

Экспериментально измеренная зависимость величины магнитного поля на оси камеры от продольной координаты представлена на рис. 2. Максимальная величина магнитного поля в каждой катушке составляет 1 Тл при протекающем токе 740 А, длина ловушки равняется 13 см, пробочное отношение 5. Пробой газа и нагрев плазмы осуществляется в условиях электронного циклотронного резонанса на основной гармонике gyroчастоты ($B_{\text{res}} = 0,85$ Тл для частоты 24 ГГц).

Для диагностики параметров плазмы, вылетающей из разрядной камеры, в центре диагностической камеры размещался ленгмюровский зонд. Площадь зонда составляла 20 см^2 , что позволило измерять токи на уровне микроампер с высокой чувствительностью. Зонд находился под напряжением -30 В для работы в режиме измерения ионного тока насыщения. Сопротивление нагрузки в измерительной цепи равнялось 50 Ом , что позволило измерять импульсы электронного тока с разрешением 10 нс .

Для регистрации электромагнитного излучения плазмы использовалась рупорная антенна, которая устанавливалась напротив окна диагностической камеры. Антенна имеет равномерную полосу пропускания в диапазоне от 2 до 25 ГГц. Сигнал с антенны анализировался в двух частотных каналах: $2 \div 18$ ГГц и на частотах $f > 18$ ГГц. После антенны сигнал детектировался и поступал на осциллограф.

Разряд в условиях электронного циклотронного резонанса зажигался при давлении аргона $2 \cdot 10^{-6}$ Торр и мощности греющего СВЧ излучения 300 Вт. В этих условиях в плазме возникает неустойчивость, которая проявляется в виде квазипериодических импульсных высыпаний горячих электронов и генерации всплесков электромагнитного излучения. На рис. 3а приведена осциллограмма сигнала с ленгмюровского зонда $U_{\text{зонд}}$, на которой на фоне относительно медленных вариаций тока зонда наблюдаются короткие отрицательные импульсы электронного тока. Длительность этих импульсов составляет величину порядка $100 \div 200 \text{ нс}$, период их следования $150 \div 200 \text{ мкс}$. Одновременно с высыпанием электронов были зарегистрированы импульсы СВЧ излучения плазмы на частотах выше 18 ГГц (рис. 3б).

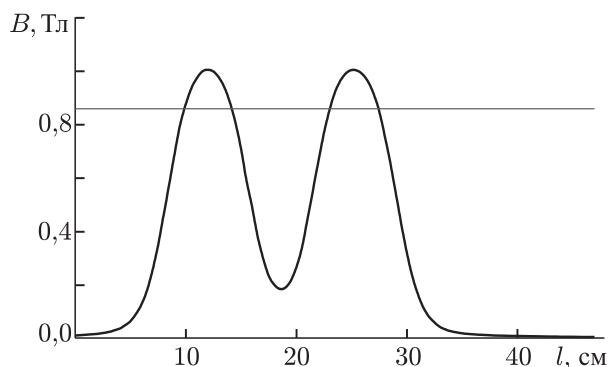


Рис. 2. Распределение магнитного поля в ловушке, l — расстояние от края металлической камеры. Ток через обе катушки 750 А, горизонтальная линия соответствует $B_{\text{res}} = 0,85$ Тл

2. ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдаемые в эксперименте высыпания электронов из ловушки, сопровождаемые генерацией импульсного электромагнитного излучения, наиболее естественно связать с возникновением циклотронной неустойчивости неравновесной плазмы. Одной из характерных особенностей нагрева мощным электромагнитным излучением в условиях электронного циклотронного резонанса является создание в открытых магнитных ловушках плазмы, содержащей, как минимум, две компоненты: плотную холодную (фоновую) фракцию с изотропным распределением частиц по скоростям и менее плотную высокоэнергичную фракцию неравновесных электронов с анизотропной функцией распределения (с преобладанием энергии поперечного по отношению к магнитному полю движения над энергией продольного движения) [7]. Холодная фоновая плазма определяет дисперсионные свойства волн, возбуждение которых обусловлено их резонансным взаимодействием

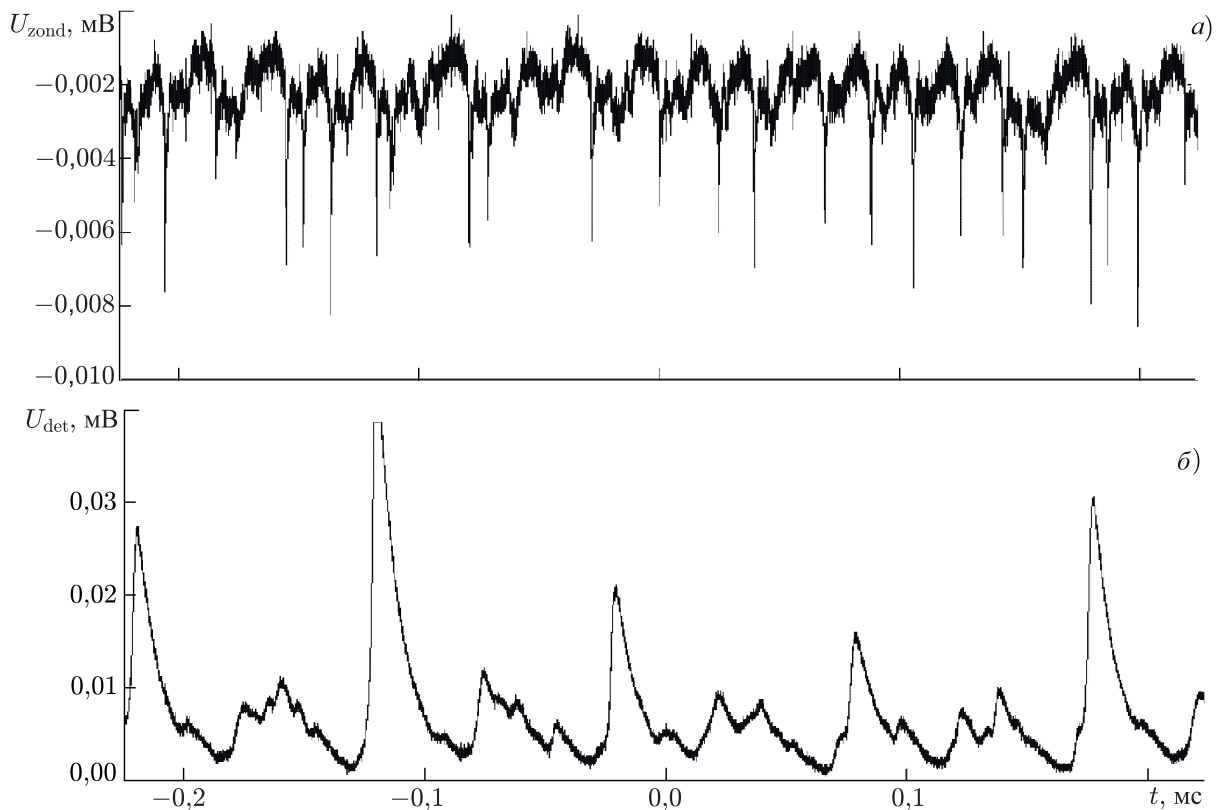


Рис. 3. Квазипериодические высыпания электронов, регистрируемые ленгмюровским зондом (а) и осциллограмма СВЧ излучения плазмы ($f > 18$ ГГц) (б). Концентрация холодной плазмы предполагается равной $n_e = 2,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($f_{pe} \approx 14$ ГГц)

ем с горячей электронной компонентой. В ходе взаимодействия с волнами электроны уменьшают свою энергию, попадают в конус потерь в пространстве скоростей и выносятся из ловушки вдоль силовых линий магнитного поля. Восстановление популяции горячих электронов обеспечивается ЭЦР нагревом плазмы непрерывным СВЧ излучением, выступающим в роли стационарного источника горячих неравновесных частиц.

Наиболее важным параметром, влияющим на дисперсию и поляризацию возбуждаемых волн, является концентрация холодной плазмы, которая оценивалась по результатам зондовых и СВЧ измерений (по прохождению поддерживающего разряд СВЧ излучения через плазму). В обсуждаемом эксперименте для частоты греющего излучения 24 ГГц критическое значение концентрации составляет $7,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Для оценок разумно взять значение концентрации $n_e = 2,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (плазменная частота $f_{pe} \approx 14$ ГГц). Данные оценки согласуются с результатами экспериментального исследования и моделирования ЭЦР-источников многозарядных ионов с СВЧ накачкой на частоте 14–18 ГГц [8–10]. Главный вывод этих работ заключается в том, что концентрация плазмы, как правило, в несколько раз ниже критического значения.

Диапазон электронных гирочастот f_{ce} в магнитной ловушке составляет 5,6–28,0 ГГц. Для оценки возьмём значение частоты излучения $f = 18$ ГГц. Таким образом, можно выделить несколько возможностей распространения волны в умеренно плотной плазме: когда выполняется условие $f_{pe} < f < f_{ce}$ и когда $f > f_{pe} > f_{ce}$. В первом случае наиболее эффективно возбуждаются медленные необыкновенные волны, распространяющиеся под небольшим углом к магнитному полю и взаимодействующие с горячими электронами, распределёнными между зоной ЭЦР нагрева

и центром ловушки. Похожий механизм циклотронной неустойчивости, объясняющий основные свойства динамических спектров импульсов собственного электромагнитного излучения плазмы в магнитогидродинамически стабильной ловушке гексапольного типа «минимум-В», был предложен в работе [11]. Особенностью возбуждения квазипродольной медленной необыкновенной волны является тот факт, что её групповая скорость уменьшается с ростом концентрации плазмы, что приводит к увеличению суммарного инкремента неустойчивости даже при небольших концентрациях горячих частиц.

В случае $f > f_{pe} > f_{ce}$ неустойчивость может быть связана с возбуждением плазменных волн, инкремент которых максимален в условиях двойного плазменного резонанса, когда частота плазменных волн близка ко второй гармонике гирочастоты электронов: $f \approx \sqrt{f_{ce}^2 + f_{pe}^2} \approx 2f_{ce}$. Подобный механизм привлекался для объяснения наблюдавшейся в распадающейся плазме ЭЦР разряда импульсно-периодической генерации мощного электромагнитного излучения, сопровождавшегося синхронными высыпаниями быстрых электронов из ловушки [12]. В условиях двойного плазменного резонанса групповая скорость волн мала, что увеличивает длину усиления и делает возможным многократный рост интенсивности волн даже при малой концентрации горячих частиц.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В плазме ЭЦР разряда, поддерживаемого мощным непрерывным излучением гиротрона с частотой 24 ГГц в прямой магнитной ловушке, впервые экспериментально обнаружена неустойчивость, проявляющаяся в виде импульсно-периодических высыпаний горячих электронов, происходящих синхронно с генерацией всплесков электромагнитного излучения. По всей видимости, наблюдаемая неустойчивость имеет кинетический характер и обусловлена формированием неравновесных функций распределения горячих частиц по скоростям. При выполнении условия $f_{pe} < f < f_{ce}$ возможно возникновение циклотронной неустойчивости медленной необыкновенной волны с квазипродольным направлением распространения, а в случае $f > f_{pe} > f_{ce}$ — неустойчивости плазменной волны в условиях двойного плазменного резонанса. Результаты исследований процессов возбуждения волн в двухкомпонентной плазме со стационарным источником неравновесных частиц представляют интерес для моделирования динамики магнитосферных циклотронных мазеров. В лабораторном эксперименте можно плавно управлять мощностью источника частиц путём изменения мощности ЭЦР нагрева, что даёт возможность исследовать различные режимы возбуждения мазера, в т. ч. переход от нелинейного режима с глубокой модуляцией плотности энергии волн и потоков частиц к линейному режиму генерации квазинепрерывного излучения. Кроме того, изменение положения зоны ЭЦР нагрева в ловушке позволяет исследовать спектры возбуждаемых волн при модификации пичч-углового распределения, выходящих из источника частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15–32–20770), а также при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0007). Работа М. Е. Викторова также поддержана Советом по грантам Президента Российской Федерации (СП–2472.2016.3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tarvainen O., Izotov I., Mansfeld D., et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2014. V. 23, No. 2. Art. no. 025020.

2. Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю. Альфвеновские мазеры. Горький: ИПФ АН СССР, 1986. 190 с.
3. Santolik O., Gurnett D. A., Pickett J. S., et al. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, No. A7. P. 1 278.
4. Трахтенгерц В. Ю., Райкрофт М. Дж. Свистовые и альфвеновские циклотронные мазеры в космосе. М.: Физматлит, 2011. 344 с.
5. Трахтенгерц В. Ю., Шалашов А. Г. // Астрон. журн. 1999. Т. 76, № 8. С. 618.
6. Трахтенгерц В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 6, С. 699.
7. Водопьянов А. В., Голубев С. В., Зорин В. Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, № 14. С. 90.
8. Barue C., Lamoreux M., Briand P., et al. // J. Appl. Phys. 1994. V. 76, No. 5. P. 2 662.
9. Douysset G., Khodja H., Girard A., Briand J. // Phys. Rev. E. 2000. V. 61, No. 3. P. 3 015.
10. Mironov V., Beijers J. P. M. // Phys. Rev. ST Accel. Beams 2009. V. 12, No. 7. Art. no. 073501.
11. Mansfeld D., Izotov I., Skalyga V., et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2016. V. 58, No. 4. Art. no. 045019.
12. Викторов М. Е., Голубев С. В., Зайцев В. В., Мансфельд Д. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 12. С. 946.

Поступила в редакцию 26 апреля 2016 г.; принята в печать 28 июля 2016 г.

**PULSE-PERIODIC REGIMES OF KINETIC INSTABILITIES
IN NON-EQUILIBRIUM PLASMA OF AN ELECTRON CYCLOTRON
RESONANCE DISCHARGE MAINTAINED BY CONTINUOUS-WAVE
RADIATION OF A 24 GHz GYROTRON**

D. A. Mansfeld, M. E. Viktorov, and A. V. Vodopyanov

We have experimentally discovered an instability, which manifests itself as precipitations of hot electrons occurring synchronously with generation of bursts of electromagnetic radiation, in the plasma of an electron cyclotron resonance discharge maintained by a high-power, continuous-wave radiation of a 24 GHz gyrotron, for the first time. The observed instability has the kinetic character and is determined by formation of non-equilibrium velocity distribution of hot particles. Two possible explanations are proposed for the mechanism of wave excitation in two-component plasma with a stationary source of non-equilibrium particles. The results of the studies performed are of interest for modeling of dynamics of magnetospheric cyclotron masers.