

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9

ДИАГНОСТИКА ГОРЯЧЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ, ВЫЛЕТАЮЩЕЙ ИЗ ПЛОТНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЭЦР-РАЗРЯДА

© 2023 г. Е. М. Киселёва^{a,b,*}, М. Е. Викторов^{a,b}, В. А. Скалыга^{a,b}, И. В. Изотов^{a,b},
С. С. Выбин^{a,b}, А. В. Поляков^{a,b}, А. Ф. Боханов^a

^a Федеральный исследовательский центр “Институт прикладной физики РАН”,
Нижний Новгород, Россия

^b Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

*e-mail: kiseleva@ipfran.ru

Поступила в редакцию 07.10.2022 г.

После доработки 23.01.2023 г.

Принята к публикации 24.01.2023 г.

Экспериментально исследовано энергетическое распределение горячих электронов, вылетающих из плазмы ионного источника на основе разряда в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Измерения были проведены в широком диапазоне значимых параметров мощности греющего СВЧ-излучения и давления нейтрального газа. Уникальность исследуемой установки состоит в высоком удельном энерговкладе в плазму, удерживаемую в квазигазодинамическом (столкновительном) режиме. Также в ходе экспериментов была произведена диагностика излучения в микроволновом диапазоне, порождаемого исследуемой горячей фракцией электронов. Были найдены режимы, при которых выполняются условия для развития кинетических неустойчивостей в плазме ЭЦР-разряда. Установлены энергии электронов, вызывающих развитие неустойчивостей такого типа, и характеризующихся всплесками СВЧ-излучения.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, электронный циклотронный резонанс (ЭЦР), ЭЦР ионные источники, функция распределения электронов по энергиям, диагностика плазмы, кинетические неустойчивости

DOI: 10.31857/S0367292122601266, **EDN:** FKKUTC

1. ВВЕДЕНИЕ

Источники плазмы на основе разряда, поддерживаемого в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), применяются во многих областях. Одну из важнейших ролей установки такого типа играют в ускорительных приложениях. Источники ионов, основанные на плазме ЭЦР-разряда, удерживаемой в открытых магнитных ловушках, стали превалировать среди других подобных устройств благодаря возможности получать пучки заряженных частиц с большим зарядом ионов и высокими значениями полного тока. По мере развития ускорительных систем требования к параметрам пучков значительно повышаются. Увеличение эффективности таких источников осуществляется, в первую очередь, в соответствии с правилами подобия, предложенными Р. Желлером [1]. Следуя им, можно предсказать кратное увеличение тока извлекаемого пучка, увеличивая частоту и мощность греющего СВЧ-излучения, поддерживающего разряд, и совер-

шая систему магнитного удержания, путем изменения соотношения магнитных полей в ловушке. Однако эти правила подобия имеют как фундаментальные, так и физические ограничения. Так, увеличение частоты нагрева до 45 ГГц требует применения наиболее современных сверхпроводящих магнитов для создания необходимой конфигурации магнитного поля [2], и это является, по-видимому, технологическим пределом греющей частоты на сегодняшний день. Поэтому поиски альтернативных путей увеличения производительности ионного источника и получения потока ионов более высоких зарядов без необходимости принципиальной модернизации системы являются актуальными. Для этого необходимо более детально исследовать процессы, происходящие в плазме ЭЦР-разряда.

Среди важнейших параметров, характеризующих плазму, особо выделяется функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ), которой определяется максимальный заряд ионов в

плазме. Знание ФРЭЭ позволяет оценить константы ионизации и предсказать параметры плазмы. Кроме того, форма ФРЭЭ, а именно наличие участков ее возрастания, напрямую связана с развитием кинетических неустойчивостей, существенно влияющих на удержание плазмы [3], а, значит, и на производительность ионных источников.

Несмотря на обширные изучения ФРЭЭ ЭЦР-разряда ([4–7]), форма распределения в широком диапазоне энергий до сих пор неизвестна. Для численного моделирования обычно используют максвелловскую (или бимакселловскую) форму распределения электронов по энергии. Однако существует множество способов косвенной оценки энергий электронов в такой плазме, например, локальные зондовые измерения [5], анализ тормозного излучения, спектрометрии [7] и другие методы диагностики. В 2012 г. в ИПФ РАН был представлен способ измерения энергетического распределения электронов, вылетающих из плазмы [8]. Этот метод идейно аналогичен классической масс-спектрометрии ионов с использованием магнитного анализатора с инвертированной полярностью магнита. Он позволяет исследовать горячую (от единиц кэВ до единиц МэВ) компоненту электронов, покидающих магнитную ловушку. Электроны, вылетающие из плазмы, двигаются вдоль оси системы по вакуумному тракту до поворотного электромагнита. Если ларморовский радиус электрона, напрямую связанный с его энергией, равен радиусу магнита, то он пролетает дальше, где регистрируется с помощью системы умножителей и усилителей. Изменение магнитного поля в катушке позволяет осуществлять разделение электронов по энергиям.

В этой работе были измерены энергетические распределения электронов, покинувших плазму ЭЦР-разряда, с помощью указанного выше метода на экспериментальном стенде GISMO с высоким удельном энерговкладом [9]. Параллельно с этими измерениями была проведена диагностика излучения СВЧ-диапазона из плазмы. Были определены области параметров, для которых характерно развитие кинетических неустойчивостей, проявляющихся в выбросах энергичных частиц, синхронизированных с импульсной генерацией СВЧ-излучения.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Описанные в этой работе эксперименты проводились на установке GISMO (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation) — газодинамическом ЭЦР ионном источнике с высоким удельным энерговкладом, созданном в ИПФ РАН [9, 10].

Удержание плазмы в GISMO осуществляется в простой магнитной ловушке, собранной из постоянных магнитов. Максимальное магнитное поле в пробках ловушки составляет $B_{\max} = 1.5$ Тл, минимальное поле в центре — $B_{\min} = 0.25$ Тл, пробочное соотношение равно 6.

Схема установки представлена на рис. 1. Источником греющего СВЧ-излучения является современный технологический гиротрон, работающий на частоте 28 ГГц с мощностью до 10 кВт в непрерывном режиме. Благодаря высокой мощности СВЧ-излучения, а также небольшому объему плазмы (порядка 40 см³), в установке GISMO достигаются рекордные для ионных источников значения удельного энерговклада в плазму непрерывного ЭЦР-разряда на уровне 50–100 Вт/см³, тогда как в традиционных источниках эта величина не превышает 1–5 Вт/см³ [11]. Энерговклад определяется плотностью СВЧ-мощности, вкладываемой на единицу объема, с учетом экспериментального значения коэффициента поглощения плазмы около 50%.

Другим важным преимуществом установки GISMO является широкий диапазон давлений газа в СВЧ-разряде (от 4×10^{-3} Торр до 10^{-6} Торр), что позволяет проводить исследования как в классическом (бесстолкновительном) [12], так и в квазигазодинамическом (столкновительном) [13] режимах удержания плазмы в магнитной ловушке. В описанных экспериментах был реализован квазигазодинамический режим удержания, характеризующийся выносом плазмы с ионно-звуковой скоростью, не зависящей от ее плотности. Напуск нейтрального газа осуществлялся непрерывно в области ввода СВЧ-излучения. Во время измерений контролировалась величина скорости напуска, которая не менялась во время зажигания ЭЦР-разряда.

Измерение распределения горячих электронов производилось с помощью магнитостатического анализатора на основе поворотного электромагнита. Для детектирования тока электронов после прохождения разделения по энергии в конце вакуумного тракта был расположен вторично-электронный умножитель (ВЭУ), выходной сигнал которого подавался на вход предусилителя тока, позволяющего регистрировать электронный ток величиной до единиц нА. На катод ВЭУ было подано напряжение величиной — 2.5 кВ по отношению к потенциалу камеры, что препятствовало регистрации электронов с энергиями ниже 2.5 кэВ, что было учтено при обработке данных. Ток в электромагните анализатора задавался микроконтроллером, который позволял делать сканирование с маленьким шагом по энергии, что дало возможность иметь энергетическое разрешение около 1 кэВ. Токи электромагнита анализатора и электронов на ВЭУ регистрировались

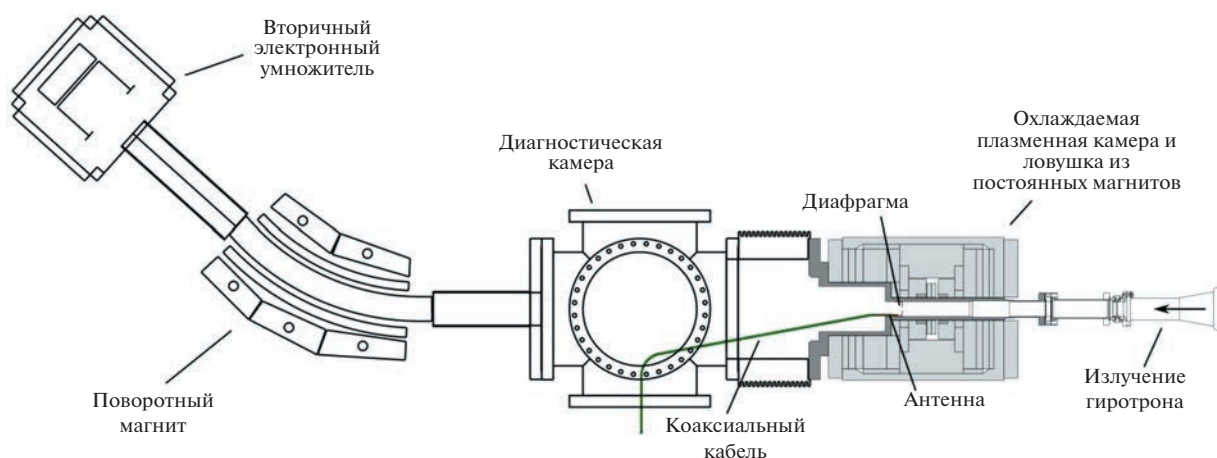


Рис. 1. Схема установки GISMO.

с помощью осциллографа Picoscope (4444B). Важно отметить, что таким способом регистрировались только электроны, летящие близко к оси симметрии магнитной системы установки GISMO.

При обработке данных были учтены такие факторы, как транспортная функция системы (зависимость количества частиц, пролетающих вдоль оси системы на детектор, от энергии), а также коэффициенты вторичной эмиссии и обратного рассеяния катода ВЭУ. Транспортная функция моделировалась следующим образом. Задавалось начальное распределение электронов типа Капчинского–Владимирского в пробке магнитного зеркала. Затем проводилось отслеживание траекторий этих частиц при их движении в магнитном поле вдоль системы до детектора, в том числе при пролете статического магнитного поля анализатора. Коэффициенты вторичной эмиссии и обратного рассеяния катода и их зависимость от энергии были вычислены с помощью данных работ [14, 15].

СВЧ-излучение из плазмы принималось с помощью коаксиальной антенны (разновидность дипольной всенаправленной антенны вертикальной поляризации), расположенной внутри плазменной камеры и вводимой через отверстие диаметром 2 мм в диафрагме, отделяющей плазму от диагностической камеры. Антенна была подключена к СВЧ-детектору и осциллографу Picoscope (4444B) для одновременного измерения всплесков тока электронов и СВЧ-излучения, либо напрямую к осциллографу Keysight DSA-Z 594A с полосой пропускания 60 ГГц для измерения частоты излучения и построения спектра излучения.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерения функции распределения вылетающих электронов по энергиям (ФРВЭЭ) проводились в широком диапазоне СВЧ-мощности гиротрона (от 1.4 до 4.6 кВт) и давлений напускаемого газа (от 0.1 до 4 мТорр). В качестве рабочего газа использовался водород. На рис. 2 приведено суммарное количество электронов в условных единицах, прилетающих на детектор, в зависимости от давления напускаемого газа и мощности СВЧ-излучения гиротрона. Оно было посчитано как интеграл под кривой в распределениях, обретенных на уровне энергии 500 кэВ (при энергиях выше этого значения наблюдалось большое количество шумов, что не позволило считать сигнал достоверным). Из данных, представленных на рис. 2 видно, что чем темнее область в рассматриваемом диапазоне давлений и СВЧ-мощностей, тем выше ток в этом режиме. Величина тока электронов указана в условных единицах, поскольку точный коэффициент усиления умножителя вторичных электронов неизвестен, а диагностикой регистрируется лишь малая часть вылетающих из плазмы электронов, и абсолютная величина тока электронов может быть оценена только по порядку величины.

Можно сделать вывод о существовании нескольких выделенных диапазонов мощностей и давлений со схожими характеристиками распределений. Например, для давлений выше 2 мТорр наблюдается отчетливый порог, характеризующийся резким увеличением тока электронов при превышении некоторого значения СВЧ-мощности, разного для каждой отдельной точки по давлению. Для давлений ниже 0.5 мТорр наблюдается схожая ситуация.

На рис. 3 показана характерная для диапазона высоких давлений и мощностей ФРВЭЭ, полученная при давлении 2.2 мТорр и СВЧ-мощности

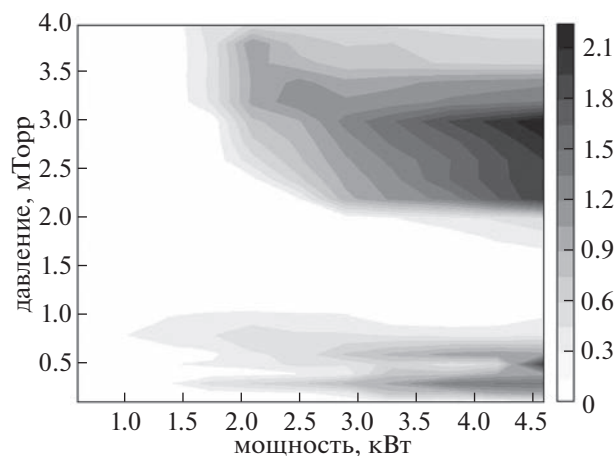


Рис. 2. Диаграмма величины тока электронов в относительных единицах (пропорционально плотности серого цвета, правая шкала) в зависимости от СВЧ-мощности и давления газа.

4.6 кВт. Отчетливо выделяются пики горячих фракций частиц вблизи энергий 100, 200 и 250 кэВ. В этом режиме наблюдалось большое количество всплесков СВЧ-излучения из плазмы в частотном диапазоне 3–6 ГГц, являющихся прямым следствием развития кинетических неустойчивостей в плазме (см. рис. 4). Параллельно с этим были зарегистрированы всплески тока электронов на фоне постоянного электронного сигнала на энергиях, соответствующих некоторым пикам распределения на рис. 3, что также независимо подтверждает развитие кинетических неустойчивостей. Запись осциллограмм осуществлялась в режиме триггера, нацеленного на детектирование всплесков электронов. Следует отметить, что всплески потока электронов на энергиях, отличных от пиков, представленных на рис. 3, не наблюдались. Это позволяет утверждать, что в ходе экспериментов удалось выделить энергичную фракцию покидающих ловушку электронов, непосредственно возникающую в результате развития кинетических неустойчивостей. СВЧ-излучение наблюдалось только при давлениях выше 1.5 мТорр и высокой мощности. При этом на значениях 1.5–2 мТорр наблюдались единичные всплески. При давлении выше 2 мТорр, одновременно с особенностями энергетического распределения, количество всплесков увеличивалось и принимало квазинепрерывный характер. Следующие эксперименты будут посвящены измерению спектров этого излучения и сопоставлению их с характерными частотами, соответствующими энергиям обнаруженных фракций электронов.

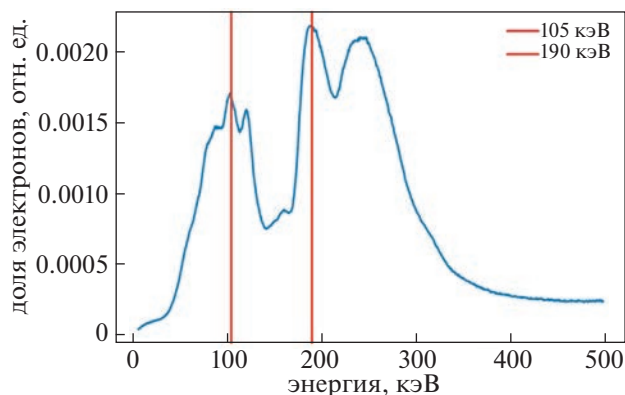


Рис. 3. Характерная функция распределения вылетевших электронов по энергии при давлении 2.2 мТорр и СВЧ-мощности 4.6 кВт.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментального исследования энергетического распределения электронов, покинувших плазму ЭЦР-разряда, был обнаружен диапазон давления рабочего газа и мощности греющего СВЧ-излучения, характеризующийся синхронными всплесками горячих электронов и СВЧ-излучения в полосе 3–6 ГГц. В этом диапазоне параметров наблюдается развитие кинетических неустойчивостей, ухудшающих удержание плазмы и негативно влияющих на работу ионного источника. Обнаружено, что всплески электронов, синхронные с СВЧ-излучением, наблюдаются только на определенных энергиях электронов (105 и 190 кэВ), соответствующих максимумам на измеренной функции распределения вылетающих электронов по энергиям, что позволяет связать эти фракции с развитием кинети-

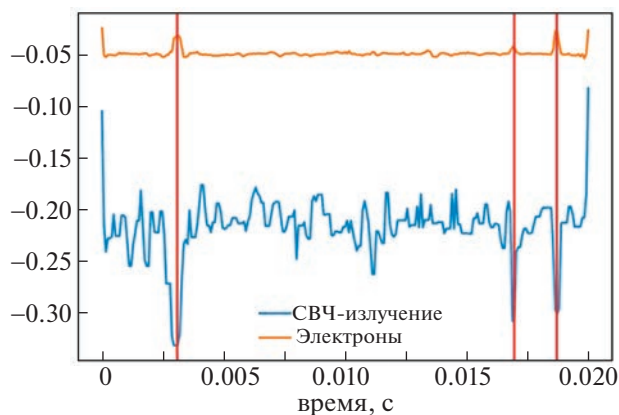


Рис. 4. Характерная осциллограмма СВЧ-излучения из плазмы вместе с всплесками тока электронов с энергией 200 кэВ при давлении 2 мТорр и мощности 3.2 кВт. По вертикальной оси отложена амплитуда регистрируемого сигнала.

ческих неустойчивостей. Дальнейшие исследования будут посвящены изучению спектров СВЧ-излучения и подробному исследованию связи выделенных частот с пиками на ФРВЭЭ. Эти шаги важны для дальнейшего нахождения истинной ФРЭЭ плазмы ЭЦР-разряда.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 21-12-00262).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Geller R.* // Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas . Bristol.: Institute of Physics, 1996.
2. *Zhu L., Wu W., Yu S.R., Sun L.T., Chen Y.Y., Mei E.M., Ni D.S., Du Z.Y.* // *Cryogenics*. 2020. V. 112. 103192. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103192>
3. *Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Izotov I.V., Mansfeld D.A., Skalyga V.A., Tarvainen O.* // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 120. 155001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.155001>
4. *Fischer R., Dose V.* // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 1999. V. 41. P. 1109. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/41/9/304>
5. *Vinogradov I.P.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1999. V. 8. P. 299. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/8/2/311>
6. *Hemmers D., Kempkens H., Uhlenbusch J.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. V. 34. P. 2315. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/15/311>
7. *Lagarde T., Arnal Y., Lacoste A., Pelletier J.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2001. V. 10. P. 181. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/10/2/308>
8. *Golubev S.V., Izotov I.V., Mansfeld D.A., Semenov V.E.* // *Review of Scientific Instruments*. 2012. V. 83. № 2. <https://doi.org/10.1063/1.3673012>
9. *Skalyga V.A., Bokhanov A.F., Golubev S.V., Izotov I.V., Kazakov M.Yu., Kiseleva E.M., Lapin R.L., Razin S.V., Shaposhnikov R.A., Vybin S.S.* // *Review of Scientific Instruments*. 2019. V. 90. № 12. <https://doi.org/10.1063/1.5128489>
10. *Skalyga V.A., Golubev S.V., Izotov I.V. et al.* // *EPJ Web Conf.* 2018. V. 187. 01018 <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818701018>
11. *Alain Lapierre, Janilee Benitez, Masahiro Okamura, Damon Todd, Daniel Xie, Yine Sun* // *arXiv*. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.12873>
12. *Pastukhov V.P.* // *Nucl. Fusion*. 1974. V. 14. № 3. P. 68.
13. *Semenov V.E., Turlapov A.V.* // *Physical Review E*. 1998. V. 57. № 5. P. 5937.
14. *Linand Y., Joy D.C.* // *Surf. Interf. Anal.* 2005. V. 37. P. 895
15. *Tabata T.* // *Proceedings of the Fourteenth EGS Users' Meeting in Japan, KEK, Tsukuba, Japan, 7–9 August 2007*. <https://doi.org/10.13140/2.1.3458.9125>