

04

Неоднородная структура крупномасштабного высокочастотного индукционного разряда низкого давления в магнитном поле

© И.Ю. Зудин, С.В. Коробков, А.В. Стриковский, А.А. Истомин, В.В. Кочедыков,
А.Н. Катков, Д.С. Плешков, И.А. Петрова, К.Н. Лоскутов, М.Е. Гуцин

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, Россия
E-mail: zudiniy@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 9 декабря 2024 г.

В окончательной редакции 7 февраля 2025 г.

Принято к публикации 16 февраля 2025 г.

Установлено, что импульсный высокочастотный индукционный разряд низкого давления, зажигаемый в большом объеме во внешнем магнитном поле, имеет неоднородную (или филаментированную) структуру. При магнитных полях в несколько сотен гауссов развивающиеся неоднородности разряда, поперечный масштаб которых порядка 10 см, не сглаживаются диффузией и сохраняются на стадии распада плазмы. Такую неустойчивость плазмы необходимо учитывать при проектировании крупномасштабных импульсных установок с высокочастотным индукционным разрядом различного назначения.

Ключевые слова: магнитоактивная плазма, высокочастотный разряд, неустойчивость.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.11.60478.20216

Крупномасштабные установки с импульсным высокочастотным индукционным (ВЧИ) разрядом низкого давления позволяют при умеренных затратах энергии получать плотную (до 10^{12} – 10^{13} см $^{-3}$), спокойную, квазиоднородную, низкотемпературную плазму в магнитном поле в объеме до нескольких кубических метров. Это дает им ряд преимуществ перед другими системами создания больших столбов замагниченной плазмы, в которых применяются широкоапертурные накаливаемые катоды [1] или тета-пинч [2]. Установки на основе ВЧИ-разряда в магнитном поле используются для проведения фундаментальных исследований, в частности для моделирования явлений в космической плазме (см., например, [3]). В ИПФ РАН в разные годы было создано несколько импульсных установок с ВЧИ-разрядами [4–6], крупнейшей из которых является стенд „Крот“ [7].

Решение таких задач, как, например, моделирование активных радиочастотных экспериментов в ионосфере [8] или генерация поперечных бесстолкновительных ударных волн [9], требует большой протяженности лабораторной плазмы поперек внешнего магнитного поля в сочетании с высокой степенью ее однородности. Если для постановки эксперимента нужно выполнить требования по сильной замагниченности ионов (т.е. ионная циклотронная частота должна превышать частоту столкновений ионов с нейтральными частицами) или малости ионного гирорадиуса относительно поперечных размеров плазмы, то на практике приходится искать способы создания плазмы в магнитных полях с индукцией более 100 Г с плавным на масштабах порядка одного метра поперечным профилем.

Как крупнейшая установка в своем классе, стенд „Крот“ позволяет провести исследование влияния индукции магнитного поля на степень однородности плазмы ВЧИ-разряда и воспроизводимости ее параметров от одного цикла работы установки („выстрела“) к другому. Рабочая секция вакуумной камеры стенда имеет длину 10 м и диаметр 3 м. В камере установлен соленоид длиной 3.5 м и диаметром 1.5 м, создающий магнитное поле с индукцией до 1000 Г, направленное параллельно оси камеры. Внутри соленоида размещены антенны-индукторы для зажигания ВЧИ-разряда: габариты соленоида определяют размер столба замагниченной плазмы. Система генерации плазмы состоит из четырех двухтактных ламповых автогенераторов мощностью до 1 МВт каждый, настроенных на рабочую частоту 5 МГц и нагруженных на индукторы. Индукторы представляют собой круговые витки, выполненные из кабеля РК50-11-13 с полиэтиленовым изолятором, с которого сняты оболочка и медный плетеный экран. Для квазиоднородного заполнения плазмой внутреннего пространства соленоида используются восемь индукторов разного диаметра (от 0.5 до 1 м), размещаемых в различных сечениях соленоида. К каждому из генераторов параллельно подключено по два индуктора.

В условиях описанного в работе эксперимента разряд зажигался один раз в 30 с в атмосфере аргона при давлении $p = 10^{-3}$ Торр. Длительность импульса создания плазмы составляла 1 мс. Мощность, вкладываемая в плазму, рассчитывалась по волновым формам высокочастотных (ВЧ) токов в индукторах и приложенных ВЧ-напряжений, она составляла около 450 кВт. Измерения концентрации плазмы осуществлялись с помощью зонда с СВЧ-резонатором на четвертьволновом отрезке двух-

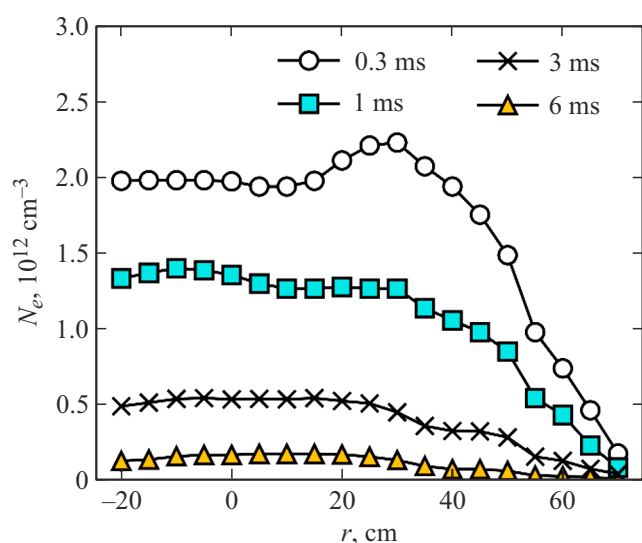


Рис. 1. Поперечные профили концентрации квазиоднородной распадающейся плазмы в магнитном поле $B_0 = 90$ Г в зависимости от времени после окончания ВЧ-импульса.

проводной линии [10], перемещавшегося вдоль радиального направления. Температура электронов измерялась одиночным лэнгмюровским зондом. Для исследования поперечной структуры плазмы в ее динамике на стадиях пробоя и распада был применен наносекундный электронно-оптический преобразователь (ЭОП) СПУ-1, выпускаемый ООО „НПП НАНОСКАН“ (Москва). Оптическая регистрация свечения плазмы осуществлялась вдоль внешнего магнитного поля.

На рис. 1 приводятся поперечные профили концентрации электронов N_e , получаемые после окончания работы ВЧ-генераторов, на стадии диффузионного распада плазмы в умеренном магнитном поле ($B_0 = 90$ Г). Максимальная концентрация плазмы $N_e \sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, достигаемая при работе всех четырех генераторов к концу ВЧ-импульса, при выбранном давлении приблизительно соответствует полной ионизации аргона вблизи индукторов с учетом снижения концентрации атомов нейтрального газа из-за разогрева последнего. К концу ВЧ-импульса температура электронов $T_e \sim 3 \text{ эВ}$, на стадии распада $T_e \sim T_i \sim 0.3 \text{ эВ}$ (T_i — температура ионов). Как видно из рис. 1, к концу ВЧ-импульса удается создать плазму с „плоским“ распределением концентрации, диаметр которой по уровню 0.5 от максимального значения N_e составляет около 1 м. Такая квазиоднородная, спокойная, холодная плазма хорошо подходит для моделирования активных экспериментов в ионосфере, включая генерацию искусственной ионосферной турбулентности [11] и инжекцию бариевых облаков [12].

На рис. 2 приводятся результаты оптической регистрации свечения плазмы в динамике для двух магнитных полей (90 и 450 Г). Перепад яркости свечения разряда на различных стадиях достигает четырех

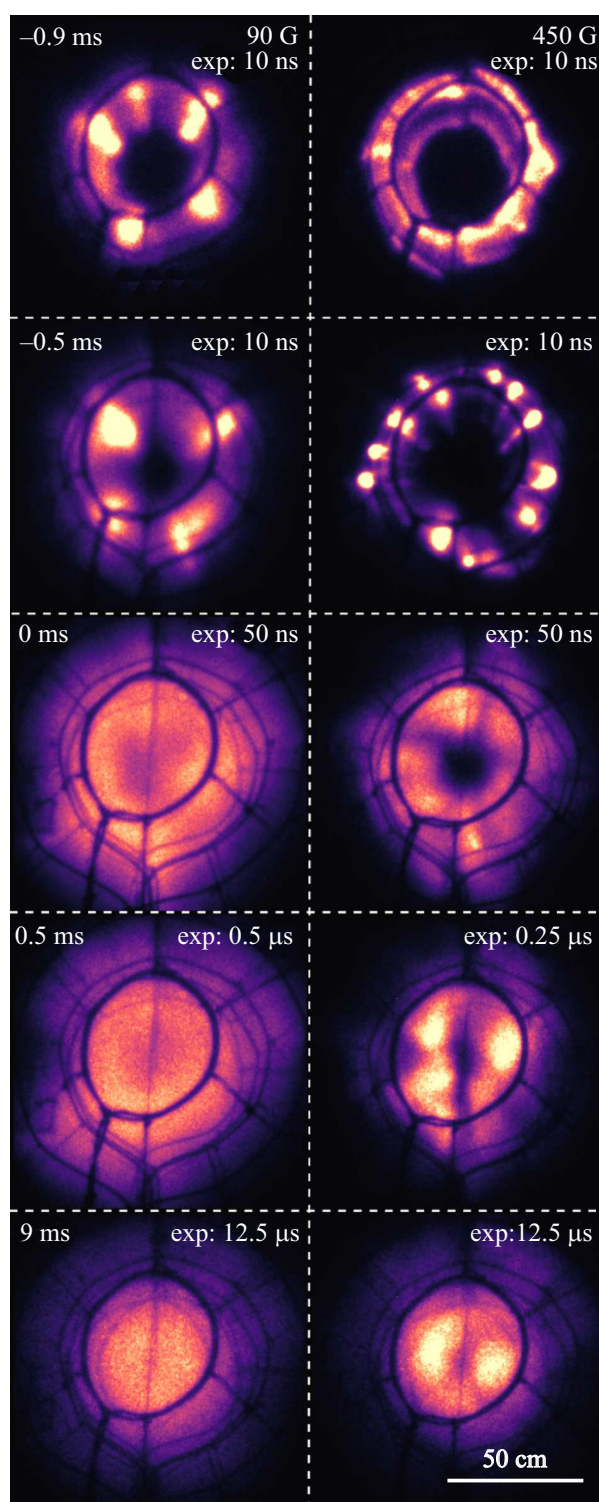


Рис. 2. Изображения свечения плазмы, полученные с помощью ЭОП СПУ-1 на разных стадиях развития разряда и распада плазмы при различных значениях индукции внешнего магнитного поля (представлены в псевдоцвете, цветовая шкала адаптивная). Направление съемки — вдоль внешнего магнитного поля. Метка расстояния приведена для плоскости ближайшего к ЭОП индуктора. На изображениях указаны задержка относительно окончания плазмосоздающего импульса, индукция внешнего магнитного поля и длительность экспозиции.

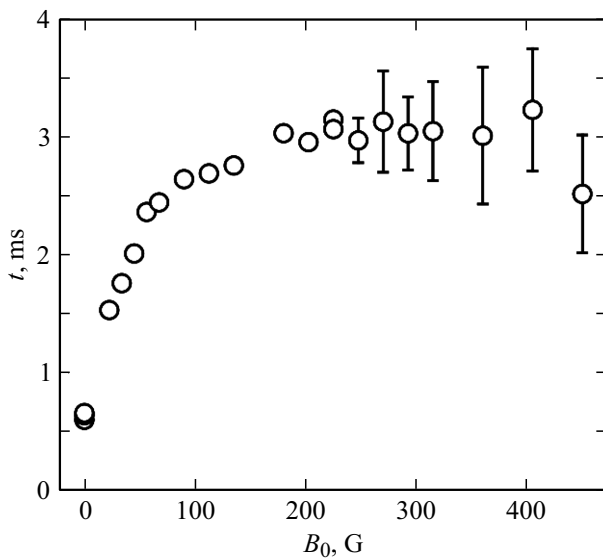


Рис. 3. Период полураспада плазмы в зависимости от индукции внешнего магнитного поля.

порядков величины, поэтому оптическая регистрация в разные моменты времени производилась с временем экспозиции, изменявшимся от 10 ns (во время пробоя) до $\sim 10 \mu\text{s}$ на стадии позднего распада. Из рис. 2 видно, что плазма сильно неоднородна, особенно в процессе развития ВЧИ-разряда. Через 100 μs после начала ВЧИ-импульса при всех значениях B_0 наблюдается свечение в форме кольца, сосредоточенное вблизи индукторов минимального диаметра (0.5 м): именно у этих индукторов индукционное электрическое поле имеет максимальную напряженность. Практически сразу (в интервале времени от 100 до 200 μs) развивается неустойчивость: разряд трансформируется в яркие волокна (очевидно, вытянутые вдоль магнитного поля), распределенные по магнитной поверхности, проходящей через индукторы малого диаметра. Чем выше индукция поля B_0 , тем меньше масштаб волокон по азимуту. Для полей уровня 90 Г азимутальный размер неоднородностей от 10 до 15 см, для поля 450 Г — не более 5 см. В каждом „выстреле“ волокна возникают в одних и тех же местах, определяемых, вероятно, геометрией и деталями конструкции индукторов, погруженных в плазму. Далее в процессе нарастания концентрации N_e свечение становится ярче и расширяется, неоднородности сливаются и укрупняются. К окончанию ВЧИ-импульса плазма заполняет весь объем соленоида, но при этом наибольшая яркость свечения фиксируется на магнитных линиях, проходящих через индукторы диаметром 0.5 м, что согласуется и с измерениями поперечного профиля концентрации (рис. 1).

С точки зрения назначения таких установок, как „Крот“, наибольший интерес представляет стадия распада плазмы, на которой проводится большинство измерений. При малых магнитных полях неоднородности концентрации, сохраняющиеся к окончанию ВЧИ-

импульса, быстро рассасываются из-за диффузии. Для магнитного поля $B_0 = 90 \text{ Г}$ профиль свечения (и концентрации) имеет плавную колоколообразную форму уже через 0.5 ms после начала распада. Этот профиль, приблизительно соответствующий основной диффузионной моде [13], и далее остается без существенных изменений. Такая же динамика характерна и для более высоких значений индукции, приблизительно до 200 Г. Хотя к окончанию ВЧИ-импульса профиль свечения плазмы неоднороден по радиусу и по азимуту, через 0.5–0.7 ms распределение плазмы становится квазиоднородным и сохраняется таким в процессе дальнейшего распада.

В магнитных полях уровня 250 Г и выше картина меняется: диффузия не размывает неоднородности. Вытянутые вдоль магнитного поля плазменные волокна, образовавшиеся к окончанию ВЧИ-импульса, не исчезают на стадии распада. Распадающаяся плазма состоит из нескольких филаментов, поперечные размеры которых порядка 10–20 см. Неоднородный профиль плазмы с провалом концентрации вблизи оси камеры сохраняется через 10–15 ms после окончания ВЧИ-импульса (рис. 2) и даже позже, т. е. на протяженном отрезке времени, на котором концентрация n_e уменьшается на три порядка величины (от 10^{12} до 10^9 см^{-3}).

Анализ результатов оптической регистрации показывает, что в отличие от мелкомасштабных структур, развивающихся в начале ВЧИ-разряда, профиль концентрации распадающейся плазмы не воспроизводится от одного „выстрела“ установки к другому. Переход к неустойчивому режиму распада плазмы в сильных магнитных полях хорошо виден из зависимости периода полураспада, построенной на основе большой статистики измерений зондом с СВЧ-резонатором, от величины B_0 (рис. 3). При $B_0 < 200 \text{ Г}$ разброс параметров плазмы на оси камеры от „выстрела“ к „выстрелу“ составляет величину порядка 1 % [14]. Начиная с магнитных полей уровня $B_0 \sim 250 \text{ Г}$ распад плазмы происходит в каждом цикле работы установки по-разному; время жизни плазмы изменяется в пределах $\pm 20 \%$.

Предположительно размеры филаментов и экспериментально определенное критическое значение индукции магнитного поля определяются сортом и давлением фоновго газа, а также температурами, до которых нагреваются различные сорта частиц во время разряда. Для разработки модели неустойчивости кажется важным то обстоятельство, что индукция магнитного поля $B_0 \sim 200 \text{ Г}$, при которой столб распадающейся плазмы теряет однородную структуру, с хорошей точностью соответствует условию $\omega_{ci} \approx \nu_{in} \approx 6 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ (где ω_{ci} — гирочастота ионов, ν_{in} — частота столкновений ионов с нейтральными атомами), соответствующему переходу в режим с замагниченными ионами. При полях уровня 450 Г, в которых отчетливо наблюдается филаментация распадающейся плазмы, параметр замагниченности ионов $\omega_{ci}/\nu_{in} \sim 2$, а гирорадиус ионов $\rho_{ci} \sim 1 \text{ см}$ как минимум на порядок меньше поперечных масштабов наблюдаемых неоднородных структур ($D > 10 \text{ см}$).

В заключение заметим, что поперечный масштаб неоднородностей распадающейся плазмы, исследуемых в экспериментах на стенде „Крот“, сопоставим с диаметром всего плазменного столба на ряде крупнейших установок мира при близких значениях B_0 (см., например, стенд LAPD [1]). Мы предполагаем, что при весьма типичных для лабораторных установок параметрах плазмы (N_e , T_e , T_i) и значениях B_0 описанная в работе неустойчивость проявляется только при больших масштабах области ионизации поперек магнитного поля: в нашем случае наблюдать неустойчивость удастся исключительно благодаря рекордному (порядка 1 м) поперечному размеру ВЧИ-разряда в камере стенда „Крот“. Вместе с тем решение ряда задач экспериментального моделирования космических явлений требует создания лабораторных источников плазмы в больших объемах (см., например, [15]), в том числе с максимально возможными размерами плазмы в направлении поперек внешнего магнитного поля. ВЧИ-разряд является перспективным способом создания плотной низкотемпературной плазмы, поэтому описанную в работе неустойчивость следует учитывать как возможный нежелательный фактор при проектировании новых крупномасштабных установок, включая стенды для моделирования космических явлений, плазмохимические реакторы и пр.

Финансирование работы

Работа выполнена с использованием уникальной научной установки „Комплекс крупномасштабных геофизических стендов ИПФ РАН“ в рамках государственного задания FFUF-2024-0044.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W. Gekelman, P. Pribyl, Z. Lucky, M. Drandell, D. Leneman, J. Maggs, S. Vincena, B. Van Compernelle, S.K.P. Tripathi, G. Morales, T.A. Carter, Y. Wang, T. DeHaas, *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 025105 (2016). DOI: 10.1063/1.4941079
- [2] М.С. Руменских, А.А. Чибранов, М.А. Ефимов, А.Г. Березуцкий, В.Г. Посух, П.А. Трушин, Ю.П. Захаров, Э.Л. Бояринцев, И.Б. Мирошниченко, А.В. Дивин, И.Ф. Шайхисламов, *Астрон. журн.*, **100** (1), 89 (2023). DOI: 10.31857/S0004629923010073 [M.S. Rumenskikh, A.A. Chibranov, M.A. Efimov, A.G. Berezutsky, V.G. Posukh, Yu.P. Zakharov, E.L. Boyarintsev, I.B. Miroshnichenko, P.A. Trushin, A.V. Divin, I.F. Shaikhislamov, *Astron. Rep.*, **67** (1), 78 (2023). DOI: 10.1134/S1063772923010079].
- [3] W. Gekelman, P. Pribyl, Z. Lucky, S.W. Tang, J. Han, Y. Qian, *J. Plasma Phys.*, **86**, 925860301 (2020). DOI: 10.1017/S002237782000063X
- [4] М.П. Брижинева, В.П. Гавриленко, С.В. Егоров, Б.Г. Еремин, А.В. Костров, Е.А. Окс, Ю.М. Шагиев, *ЖЭТФ*, **85** (3), 893 (1983). [M.P. Brizhinev, V.P. Gavrilenko, S.V. Egorov, B.G. Eremin, A.V. Kostrov, E.A. Oks, Yu.M. Shagiev, *Sov. Phys. JETP*, **58** (3), 517 (1983)].
- [5] В.П. Денисов, Н.И. Зайцев, Е.В. Иляков, В.А. Исаев, Г.С. Кораблев, И.С. Кулагин, Н.В. Лукин, Г.В. Пермитин, *Физика плазмы*, **16** (3), 296 (1999).
- [6] А.В. Костров, В.В. Назаров, М.В. Стародубцев, *Изв. вузов. Радиофизика*, **50** (8), 731 (2007). [A.V. Kostrov, V.V. Nazarov, M.V. Starodubtsev, *Radiophys. Quantum Electron.*, **50** (8), 665 (2007). DOI: 10.1007/s11141-007-0058-0].
- [7] Н.А. Айдакина, А.Г. Галка, В.И. Гундорин, М.Е. Гущин, И.Ю. Зудин, С.В. Коробков, А.В. Костров, К.Н. Лоскутов, М.М. Могилевский, С.Э. Привер, А.В. Стриковский, Д.В. Чугунин, Д.В. Янин, *Геомагнетизм и аэронавтика*, **58** (3), 331 (2018). DOI: 10.7868/S0016794018030033 [N.A. Aidakina, A.G. Galka, V.I. Gundorin, M.E. Gushchin, I.Yu. Zudin, S.V. Korobkov, A.V. Kostrov, K.N. Loskutov, M.M. Mogilevskiy, S.E. Priver, A.V. Strikovskiy, D.V. Chugunin, D.V. Yanin, *Geomag. Aeron.*, **58** (3), 314 (2018). DOI: 10.1134/S0016793218030027].
- [8] A.V. Streltsov, J.-J. Berthelier, A.A. Chernyshov, V.L. Frolov, F. Honary, M.J. Kosch, R.P. McCoy, E.V. Mishin, M.T. Rietveld, *Space Sci. Rev.*, **214**, 118 (2018). DOI: 10.1007/s11214-018-0549-7
- [9] C. Niemann, W. Gekelman, C.G. Constantin, E.T. Everson, D.B. Schaeffer, A.S. Bondarenko, S.E. Clark, D. Winske, S. Vincena, B. Van Compernelle, P. Pribyl, *Geophys. Res. Lett.*, **41** (21), 7413 (2014). DOI: 10.1002/2014GL061820
- [10] R.L. Stenzel, *Rev. Sci. Instrum.*, **47** (5), 603 (1976). DOI: 10.1063/1.1134697
- [11] И.Ю. Зудин, М.Е. Гущин, А.В. Стриковский, С.В. Коробков, И.А. Петрова, А.Н. Катков, В.В. Кочедыков, *Письма в ЖЭТФ*, **116** (1-2), 46 (2022). DOI: 10.31857/S1234567822130079 [I.Yu. Zudin, M.E. Gushchin, A.V. Strikovskiy, S.V. Korobkov, I.A. Petrova, A.N. Katkov, V.V. Kochedykov, *JETP Lett.*, **116** (1), 41 (2022). DOI: 10.1134/S0021364022601051].
- [12] А.С. Николенко, М.Е. Гущин, С.В. Коробков, И.Ю. Зудин, Н.А. Айдакина, А.В. Стриковский, К.Н. Лоскутов, *Физика плазмы*, **49** (11), 1101 (2023). DOI: 10.31857/S0367292123600723 [A.S. Nikolenko, M.E. Gushchin, S.V. Korobkov, I.Yu. Zudin, N.A. Aidakina, A.V. Strikovskiy, K.N. Loskutov, *Plasma Phys. Rep.*, **49** (11), 1284 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23601141].
- [13] В.Е. Голант, А.П. Жилинский, И.Е. Сахаров, *Основы физики плазмы* (Атомиздат, М., 1977).
- [14] N. Aidakina, M. Gushchin, I. Zudin, S. Korobkov, A. Strikovskiy, *Phys. Plasmas*, **25** (7), 072114 (2018). DOI: 10.1063/1.5012554
- [15] Q. Xiao, Z. Wang, X. Wang, C. Xiao, X. Yang, J. Zheng, *Plasma Sci. Technol.*, **19**, 035301 (2017). DOI: 10.1088/2058-6272/19/3/035301