

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН С ПЛАЗМОЙ

УДК 533.951.15

МНОГОМОДОВЫЙ РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЫ СВЧ-РАЗРЯДА В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

© 2022 г. С. Г. Асанина^{а, *}, М. А. Корнеева^{б, **}

^а ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”, Москва, Россия

^б Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

*e-mail: asanina.sofia@gmail.com

**e-mail: korneevama@mail.ru

Поступила в редакцию 04.06.2021 г.

После доработки 26.07.2021 г.

Принята к публикации 26.08.2021 г.

Большинство параметров СВЧ-устройств, работающих на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), определяются характеристиками создаваемой плазмы. Применение для поддержания разряда хорошо изученных одномодовых резонаторов во многих случаях оказывается недостаточно эффективным, т.к. условие одномодовости налагает жесткие ограничения на максимальные линейные размеры используемого резонатора при заданной частоте СВЧ-волн. Из-за этого в последние годы активно изучаются особенности поддержания разрядов при одновременном возбуждении нескольких мод колебаний. В данной работе исследуется СВЧ-разряд (2.45 ГГц) в многомодовом резонаторе, помещенном в зеркальную магнитную ловушку пробочного типа, в которой генерируется сильно неравновесная анизотропная низкотемпературная плазма. Показано, что структура электромагнитного поля в резонаторе изменяется с ростом давления плазмообразующего газа, что сопровождается изменением концентрации и температуры электронов.

Ключевые слова: ЭЦР-разряд, открытая магнитная ловушка, оптическая эмиссионная спектроскопия, зонд Ленгмюра, критическая концентрация, трансформация волн

DOI: 10.31857/S0367292122020032

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование механизма ЭЦР позволяет получить плотную плазму с высокой степенью ионизации при низком давлении, обеспечивая при этом высокий коэффициент передачи СВЧ-энергии в рабочий объем. ЭЦР-разряды возбуждаются и поддерживаются без использования внутренних электродов, а потому находят широкое применение в различных технологиях плазменной обработки материалов [1–4] и источниках ионов [5, 6]. Поскольку максимальный энерговклад обеспечивается электродинамикой выбранного типа колебаний, необходимо точное понимание структуры образующихся в СВЧ-резонаторе электромагнитных полей, которая определяется, в первую очередь, линейными размерами резонатора. В некоторых случаях конструкции резонаторов позволяют реализовать одновременное возбуждение нескольких мод колебаний [5, 7]. Возникновение плазмы приводит к изменению электромагнитных свойств резонатора, что может проявляться в сдвиге резонансной частоты, исчезновении некоторых мод, присутствующих в ненагруженном резонаторе, или, наоборот,

появлении мод, существующих исключительно при наличии плазмы [8]. Кроме того, на параметры разряда существенно влияет давление плазмообразующего газа: при реализации режима с закритическим значением плотности электронов, который активно исследуется в рамках задач по повышению плотности выходного тока источников ионов [9], может происходить отсечка падающей волны и изменение механизма нагрева плазмы.

В исследуемом разряде в зеркальной магнитной ловушке пробочного типа генерируется сильно неравновесная анизотропная низкотемпературная плазма [10]. Линейные размеры резонатора предполагают в ненагруженном состоянии возможность появления двух мод: E_{010} и H_{111} . Наличие градиента плотности и неоднородного магнитного поля делают распространение СВЧ-волны и поглощение ее энергии в разрядах такого типа непредсказуемым. При этом взаимодействие падающей волны с плазмой главным образом определяется концентрацией электронов в разряде.

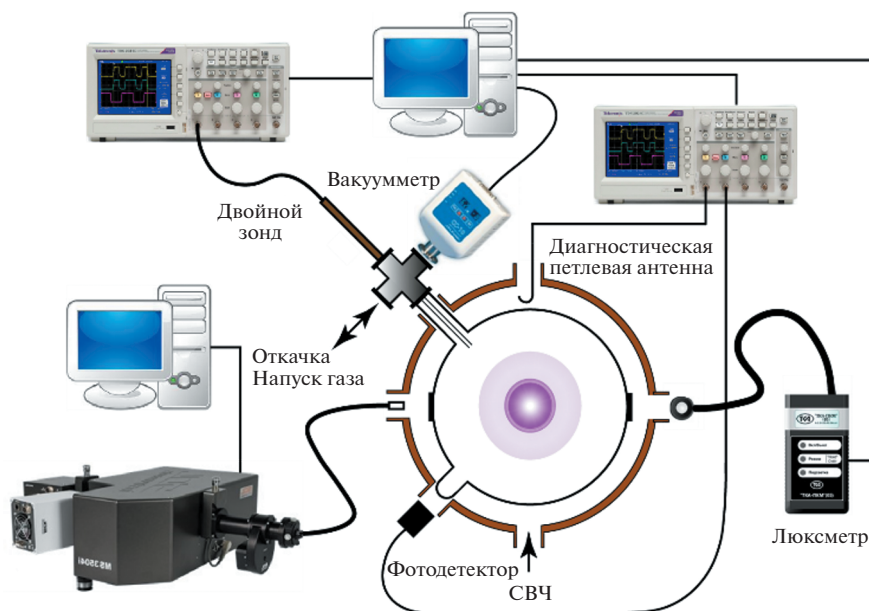


Рис. 1. Экспериментальная установка и системы диагностики.

При концентрациях электронов ниже критических основным механизмом передачи энергии СВЧ-волны к электронам разряда исследуемой конфигурации будет ЭЦР. Размер и положение области ЭЦР при фиксированном значении частоты падающей СВЧ-волны определяется распределением магнитного поля. В силу конструкции резонатора подводимая СВЧ-волна распространяется поперек магнитного поля и, соответственно, может быть классифицирована по типу поляризации. Если вектор электрического поля падающей волны будет перпендикулярен линиям магнитной индукции ($\vec{E} \perp \vec{B}$), волна называется необыкновенной. Данному условию в исследуемом резонаторе удовлетворяет мода H_{111} . Если линии напряженности электрического поля параллельны линиям магнитного поля ($\vec{E} \parallel \vec{B}$), что соответствует моде E_{010} , то волна будет обыкновенной. В силу своей поляризации необыкновенная волна может взаимодействовать лишь с поперечной компонентой импульса электронов, а обыкновенная – с продольной.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой осесимметричную систему, в которой цилиндрический резонатор высотой 8.5 см и радиусом 6.5 см помещен в магнитное поле классического пробкотрона. Плазма формируется в кварцевой колбе, установленной в резонаторе соосно. Резонатор возбуждается в импульсном режиме на частоте 2.45 ГГц от магнетронного ге-

нератора посредством дифракционной связи. СВЧ-мощность подводится через прямоугольный одномодовый (H_{10}) волновод, соединенный с боковой стенкой резонатора через вертикальное щелевое отверстие связи, что обеспечивает распространение подводимой СВЧ-волны линейной поляризации поперек линий магнитного поля. Используемые в экспериментах длительность импульса 2 мс и период 10 мс являются достаточными для восстановления электрической прочности разрядного промежутка за время паузы [11, 12]. СВЧ-тракт снабжен направленным ответвителем и циркулятором с детекторными головками с квадратичными детекторами для мониторинга подводимой и отраженной мощности. Стационарное магнитное поле пробочной конфигурации создается постоянными магнитами ($SmCo_6$) с системой магнитного замыкания. Условиям ЭЦР соответствует поле 875 Гс, при этом величина магнитной индукции в геометрическом центре ловушки изменяется в пределах 660–1050 Гс. ЭЦР-поверхности при этом либо принимают форму двухполосного гиперboloида и смещаются к пробочной ловушке, либо в форме параболоидов двигаются к боковой поверхности СВЧ-резонатора. Пробочное отношение в пределах кварцевой колбы изменялось в диапазоне $R = 1.24–1.41$. Система откачки состоит из двух форвакуумных и одного диффузионного насоса и позволяет поддерживать фоновое давление не хуже 1×10^{-5} Торр. Плазмообразующий газ – аргон.

Экспериментальный стенд оснащен приборами для применения следующих типов диагностики – оптической эмиссионной спектроско-

Таблица 1. Резонансные частоты в диапазоне до 3 ГГц

	Мода	Частота, ГГц
1	E_{010}	1.7675
2	H_{111}	2.2237
3	E_{011}	2.4977
4	E_{110}	2.8148
5	H_{211}	2.8552

пии: монохроматор-спектрограф MS3504i; интегральных измерений светового потока: люксметр ТКА-ПКМ С051 (380–760 нм, погрешность $\pm 8.0\%$); зондовой диагностики по методу двойного зонда Ленгмюра: молибденовая проволока диаметром 0.4 мм, длина открытой поверхности – 3.5 мм, расстояние между зондами – 1.6 мм [12]. Световод монохроматора и детекторы интегрального светового потока пристыковываются к вакуумно-плотным окнам с увиолевыми стеклами и регистрируют излучение в направлении, перпендикулярном боковой поверхности резонатора с расстояния 5 см соответственно.

В боковой стенке резонатора на глубину ~ 0.5 см введена диагностическая петлевая антенна. При проведении экспериментов плоскость петли устанавливается либо перпендикулярно линиям магнитной индукции мод типа E, либо мод H-типа. Линейные размеры резонатора, используемого для генерации плазмы, предполагают в ненагруженном режиме существование только двух мод E_{010} и H_{111} (табл. 1). Как показано в [8], при генерации плазмы резонансная частота мод может смещаться. Поскольку резонансная частота следующих после H_{111} мод (особенно E_{011}) близка рабочей частоте магнетрона, нельзя исключать возможность их возникновения. Таким образом, в резонаторе при поддержании разряда возможно существование как мод H-типа, так и E-типа. Для однозначного определения типа мод, существующих в резонаторе при наличии разряда, требуются дополнительные измерения.

Таблица 2. Параметры микроволнового разряда в различных диапазонах давления: P – давление, T_e – температура электронов, n_e – концентрация электронов, v_{ee} – частота электрон-электронных столкновений, v_{ea} – частота электрон-нейтральных столкновений, l_e – длина свободного пробега электрона, E – освещенность, генерируемая разрядом, P – поглощенная мощность

P , Торр	T_e , эВ	n_e , см^{-3}	v_{ee} , с^{-1}	v_{ea} , с^{-1}	l_e , см	E , лк	P , %
$8 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-4}$	~ 20 эВ	–	–	–	–	нет сигнала	80
$4 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	5 эВ	1×10^{10}	4×10^4	$2.4 - 5 \times 10^6$	83–33	<8 лк	65
$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-3}$	5 эВ	5×10^{10}	1.8×10^5	$1 - 2.5 \times 10^7$	33–7	15 лк	80
$5 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$	2 эВ	3×10^{11}	3×10^6	$6.5 \times 10^6 - 1 \times 10^8$	19–1	400 лк	90

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные ранее [10] исследования позволили выделить несколько характерных режимов генерации разряда в зависимости от давления плазмообразующего газа, которые отличаются световым потоком, спектральным составом излучения, температурой и концентрацией электронов. Основные характеристики данных режимов представлены в табл. 2.

Выделенные ранее режимы хорошо прослеживаются на сигнале с диагностической петлевой антенны (рис. 2, диапазоны давлений, соответствующие табл. 2 выделены пунктиром). При фоновом давлении в отсутствие разряда антенна регистрирует сигнал, соответствующий моде H_{111} . При повороте петли в перпендикулярное положение, соответствующее моде типа E, сигнал на антенне полностью отсутствует. При изменении давления в широком диапазоне значений, наблюдаются существенные изменения в сигнале петлевой антенны как в положении, соответствующем сигналу мод типа H, так и при регистрации в строго перпендикулярном положении, соответствующем мод типа E. Таким образом, появление плазмы изменяет электромагнитные свойства резонатора и в широком диапазоне давлений картина электромагнитного поля на рабочей частоте не сохраняется.

Первоначальный пробой газа происходит на давлении $\sim 8 \times 10^{-5}$ Торр. Пробой фиксируется визуально, но в регистрируемых параметрах разряда (падающей и отраженной мощности, сигнала с антенны) изменений не происходит. Яркости разряда при этом недостаточно для получения сигнала на люксметре или фотодиоде. Измерение температуры и концентрации электронов по методу двойного зонда так же затруднено низким уровнем сигнала. Как было показано в [10], в спектре разряда в данном диапазоне давлений преобладают линии ионной компоненты. Грубая оценка по интенсивностям ионных линий 488.0 и 476.5 нм [13] дает температуру электронов ~ 20 эВ, что соответствует длине свободного пробега электрона на порядок большей линейных размеров резонатора. Стабильный уровень сигнала на

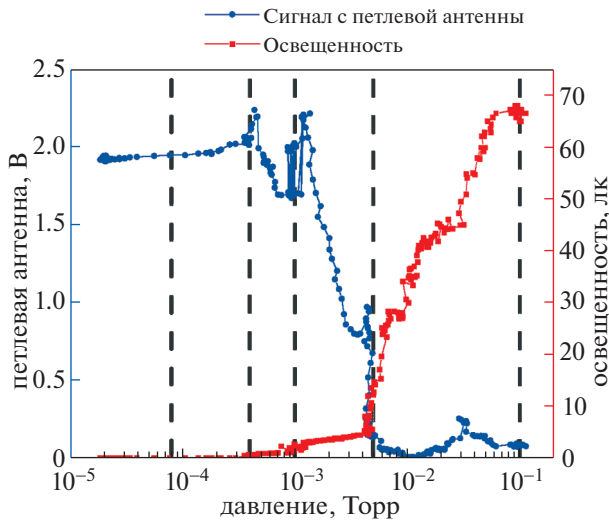


Рис. 2. Освещенность и сигнал петлевой антенны характерный для мод типа Н от давления плазмообразующего газа.

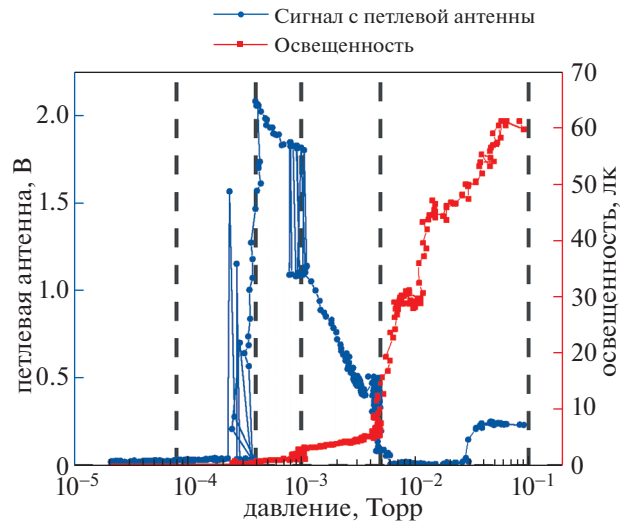


Рис. 3. Освещенность и сигнал петлевой антенны характерный для мод типа Е от давления плазмообразующего газа.

антенне для моды H_{111} (рис. 2), полное отсутствие сигнала, характерного для моды типа Е (рис. 3), высокая температура электронов и большая длина свободного пробега свидетельствует о реализации классического ЭЦР-разряда.

На давлении 2×10^{-4} Торр возникает сигнал, характерный для моды Е-типа и быстро достигает уровня сигнала моды H_{111} . В данном диапазоне давлений визуально наблюдается мерцание разряда, которое хорошо отображено на сигнале петлевой антенны (на сигнале люксметра данный эффект не проявляется из-за усреднения сигнала по множеству импульсов). При достижении давления 4×10^{-4} Торр, происходит резкое, скачкообразное возрастание светового потока. При этом уменьшается температура электронов – при появлении второй моды температура электронов снижается до 5 эВ.

На давлении 1×10^{-3} Торр сигнал, соответствующий моде типа Е снижается, а характерный для мод Н-типа, вновь начинает преобладать, что сопровождается ростом концентрации электронов до $5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

После достижения давления 5×10^{-3} Торр сигнал с антенны пропадает, что согласуется с полученным ранее закритическим значением концентрации электронов ($7.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$) для рабочей частоты магнетрона [10]. На давлении 3×10^{-2} Торр на петлевой антенне вновь регистрируется сигнал, характерный для моды типа Е и Н, но он в 8 раз меньше, чем регистрируемый на низких давлениях. Температура электронов при давлении больше 5×10^{-3} Торр снижается до 2 эВ, а в

спектре разряда ионные линии становятся не различимы на уровне шума.

Для оценки влияния расположения ЭЦР-поверхностей на поддержание разряда были проведены исследования влияния изменения индукции магнитного поля на генерируемую разрядом освещенность в широком диапазоне значений в центре резонатора: от 660 до 1000 Гс (рис. 4). Видно, что на давлении $< 5 \times 10^{-3}$ Торр при минимальной величине магнитного поля в отсутствие ЭЦР-поверхностей внутри кварцевой колбы, разряд не поддерживается, что подтверждает реализацию в нижнем диапазоне давлений механизма ЭЦР.

При достижении концентрации электронов, критической для обыкновенной волны, на давлении 5×10^{-3} Торр и до давления 2×10^{-2} Торр расположение ЭЦР-поверхностей перестает влиять на величину генерируемой разрядом освещенности. Даже при минимальном значении индукции магнитного поля 660 Гс, при котором внутри кварцевой колбы отсутствуют ЭЦР-поверхности, значение освещенности не отличается от сигнала при резонансном значении магнитного поля (875 Гс). При этом не меняется и процент поглощенной мощности. Учитывая отсутствие влияния магнитного поля на характеристики разряда на давлении от 5×10^{-3} Торр до 2×10^{-2} Торр, низкую температуру электронов, а также близость частот электрон-электронных и электрон-нейтральных столкновений, можно сделать вывод, что в данном диапазоне давлений механизм ЭЦР не является основным способом нагрева, а происходит линейная трансформация падающих

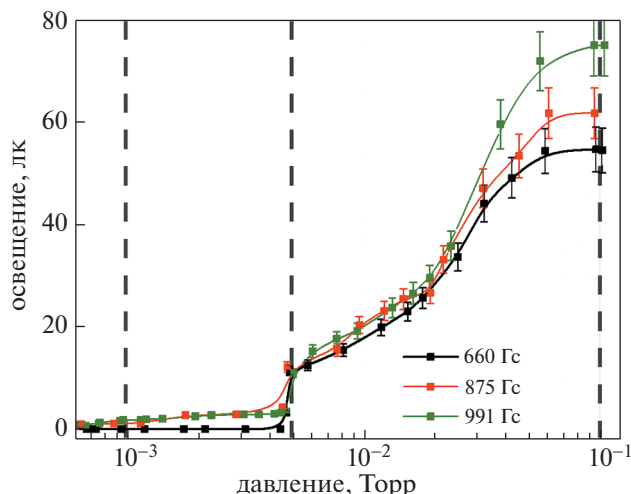


Рис. 4. Зависимость освещенности, генерируемой плазмой разряда, от давления плазмообразующего газа при различных значениях магнитной индукции в центре ловушки.

извне СВЧ-волн в плазменные, которые затем поглощаются [14].

При давлении $> 2 \times 10^{-2}$ Торр расположение ЭЦР-поверхностей вновь начинает оказывать влияние на изменение светового потока. Разница в величине освещенности в случае отсутствия ЭЦР-поверхностей внутри области поддержания разряда и их наличием составляет $\sim 15\%$. При этом на петлевой антенне отчетливо фиксируется сигнал, характерный для мод типа E и H. Регистрируемое влияние магнитного поля на параметры разряда позволяет предположить, что изменение в генерируемом световом потоке связано с резонансным характером взаимодействия данной волны с плазмой.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование многомодового резонатора для поддержания ЭЦР-разряда приводит к нелинейному изменению параметров плазмы от давления плазмообразующего газа. На низких давлениях в резонаторе регистрируется мода H_{111} и поддерживается классический режим ЭЦР. При возникновении дополнительной моды, имеющей компоненту электрического поля, направленную параллельно линиям магнитной индукции, освещенность, генерируемая разрядом, скачкообразно изменяется, а температура электронов и процент поглощенной мощности снижаются. При достижении критического значения concentra-

ции электронов на давлении 5×10^{-3} Торр электромагнитная волна перестает проникать в плазму, но тем не менее на давлении $> 2 \times 10^{-2}$ Торр вновь фиксируется электромагнитное поле падающей СВЧ-волны, а параметры разряда начинают реагировать на перестройку магнитного поля.

Таким образом, при генерации плазмы в многомодовом резонаторе, помещенном в зеркальную магнитную ловушку пробочного типа, существуют характерные значения давления, на которых параметры разряда изменяются резко, и диапазоны давлений, для которых характерно плавное изменение параметров разряда, что необходимо учитывать при разработке СВЧ-устройств, работающих на основе электронно-циклотронного резонанса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
2. Ferreira C.M., Moisan M. Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. Boston: Springer, 1993. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1130-8>
3. Достанко А.П., Бордусов С.В. // Физическая инженерия поверхности. 2003. № 1. С. 7–18.
4. Диденко А.Н., Прокопенко А.В., Смирнов К.Д. // Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 3. С. 144.
5. Geller R. Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas. Philadelphia, Inst. Phys., 1996. <https://doi.org/10.1201/9780203758663>
6. Скальга В.А., Голубев С.В., Изотов И.В., Ланин Р.Л., Разин С.В., Сидоров А.В., Шапошников Р.А. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 17–24.
7. Блинов Л.М., Гуляев Ю.В., Черепенин В.А., Герасименко А.П. // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 12. С. 26.
8. Celonaa L., Gammino S., Maimone F., Mascali D., Gambino N., Miracoli R., Ciavola G. The European Physical Journal D. 2011. № 61. P. 107–115. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2010-00244-y>
9. Castro G., Mascali D., Gammino S., Torrisi G., Romano F.P., Celona L., Altana C., Caliri C., Gambino N., Neri L., Sorbello G., Lanaia D., Miracoli R. // Plasma Sources Science and Technology. 2017. V. 26. P. 055019. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa61c4>
10. Андреев В.В., Волдинер И.А., Корнеева М.А. // Физика плазмы и плазменные методы. 2016. № 2. С. 42.
11. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
12. Андреев В.В., Василеска И., Каряка В.И., Корнеева М.А. // Прикладная физика. 2018. № 5.
13. Latimer I.D., John R.M. // Physical Review. 1970. V. 6. P. 1612–1615.
14. Голант В.Е., Пилюя А.Д. // УФН. 1971. Т 104. С. 413–457.