

ГЕЛИКОННЫЙ ИСТОЧНИК ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК

© 2021 г. Е. И. Кузьмин^{а,*}, И. В. Шиховцев^а

^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: e.i.kuzmin.94@mail.ru

Поступила в редакцию 15.10.2020 г.

После доработки 31.01.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2021 г.

Представлены результаты экспериментов на линейной установке с геликонным плазменным источником, работающем на частоте 13.56 МГц при мощности до 15 кВт. В экспериментах использованы различные виды антенн с азимутальным волновым числом $m = 0; \pm 1$ (витковая, NAGOYA TYPE III и геликонная полуволновая антенны). Для указанных типов антенн были измерены радиальные профили плотности и электронной температуры плазмы в зависимости от магнитного поля под антенной и давления газа. Максимальная плотность плазмы, полученная в экспериментах, составила $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, при величине магнитного поля около 200 Гс.

Ключевые слова: геликонный разряд, ВЧ-источники плазмы, плазма в неоднородном магнитном поле, линейные плазменные установки

DOI: 10.31857/S0367292121060111

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений развития термоядерных технологий являются исследования по взаимодействию плазмы с материалами. Важность этих исследований связана с условиями работы первой стенки в реакторе под мощным воздействием потоков плазмы. Как правило, для материаловедческих исследований используются линейные плазменные установки, позволяющие проводить моделирование воздействия на стенки реактора при необходимых характеристиках потока плазмы. Источник плазмы для таких установок должен удовлетворять ряду требований, а именно: высокая плотность и однородность плазмы, отсутствие примесей и возможность стационарного режима работы [1].

Безэлектродные ВЧ-генераторы плазмы позволяют работать в стационарном режиме, давая при этом чистую плазму без примесей. В индукционном ВЧ-разряде плазма создается за счет передачи энергии электронам высокочастотными электрическими полями. При определенных условиях, возбуждаемые антенной на периферии волны с частотой $\omega \ll \omega_p$, распространяются внутрь, и их поглощение дает возможность генерировать плотную плазму во всем объеме разряда, увеличивая его эффективность. Этими свойствами обладают геликонные источники плазмы. Вместе с тем, они являются весьма чувствитель-

ными к таким параметрам, как давление газа, величина внешнего магнитного поля и его однородность, так что требуется оптимизация этих параметров для получения требуемых параметров плазменного потока.

Эксперименты проводились на линейной плазменной установке с геликонным источником плазмы [2]. Предполагается, что разрабатываемый геликонный источник может служить прототипом источника плазмы для линейной плазменной установки по исследованию материалов JULE-PSI [3]. Соответственно, основные требования к нему — это однородность плотности плазмы на размере 3–4 см, плотность плазмы $\geq 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и возможность работы в стационарном режиме.

В данной статье представлены первые результаты по созданию и исследованию плазмы на установке с геликонным источником в ИЯФ СО РАН. В разд. 2 представлено описание плазменного источника, магнитной системы и применяемых методов диагностики. В разд. 3 представлены основные экспериментальные данные, которые обсуждаются в разд. 4.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Параметры установки и получаемой плазмы указаны в табл. 1, схема установки изображена на рис. 1. Геликонный источник представляет собой кварцевую вакуумную камеру ($\varnothing 110$ мм, длина

Таблица 1. Параметры геликонного источника и плазмы

Параметры	Значение
Частота, МГц	13.56
Мощность, кВт	≤15
Давление газа (H ₂), мТорр	10–45
Магнитное поле, Гс	≤1000
Длительность разряда, с	0.5–2
Плотность, см ⁻³	10 ¹¹ –10 ¹³
Электронная температура, эВ	5–12
Диаметр плазмы, см	~8–10

400 мм), на которой устанавливается ВЧ-антенна с возможностью водяного охлаждения. На установке используется ВЧ-генератор COMDEL CX25000-S мощностью до 25 кВт. Для заданной мощности ожидаемая плотность плазмы $>10^{13}$ см⁻³, температура электронов ~5 эВ, что обусловлено экспериментальными результатами работ [4, 5]. Для согласования импеданса системы с нагрузкой генератора (50 Ом) между антенной и генератором установлено согласующее устройство с L-схемой согласования. Камера находится в постоянном магнитном поле, создаваемом четырьмя соленоидами (490 витков) и пробочной катушкой (976 витков). Данный геликонный источник имеет ряд важных технических особенностей. Геометрия магнитных полей за счет ослабления

поля в области ВЧ-антенны повторяет конфигурацию пробкотрона, что улучшает удержание плазмы, а также эффективную передачу энергии ВЧ-полей вглубь плазмы [6]. Магнитное поле имеет минимум в области антенны с пробочным отношением ~2. Эта конструкция основана на успешном опыте открытых плазменных ловушек по генерации и удержанию плазмы в пробочной конфигурации [7], теория геликонного разряда в неоднородном магнитном поле представлена в работе [8]. Поскольку распределение магнитного поля в камере неоднородно (рис. 2), всюду, где особо не оговорено, указано усредненное магнитное поле вдоль антенны. Для изоляции плазмы от стенок источника и диэлектрической цилиндрической плазменной камеры предусмотрены три охлаждаемых медных лимитера. На установке имеется расширительный объем, который можно использовать для экспериментов по изменению коэффициента расширения плазменного потока и температуры электронов, а также для систем диагностики и откачки газа.

Вакуум в камере ($\sim 10^{-6}$ мТорр) создавался турбомолекулярным и форвакуумным насосами, откачка производилась со стороны вакуумного объема. Водород в камеру напускался в непрерывном режиме в течение импульса, при измерениях везде указано давление в камере в момент установления квазистационарного разряда. Для измерения плотности и электронной температуры плазмы в 340 мм от центра ВЧ-антенны расположен трой-

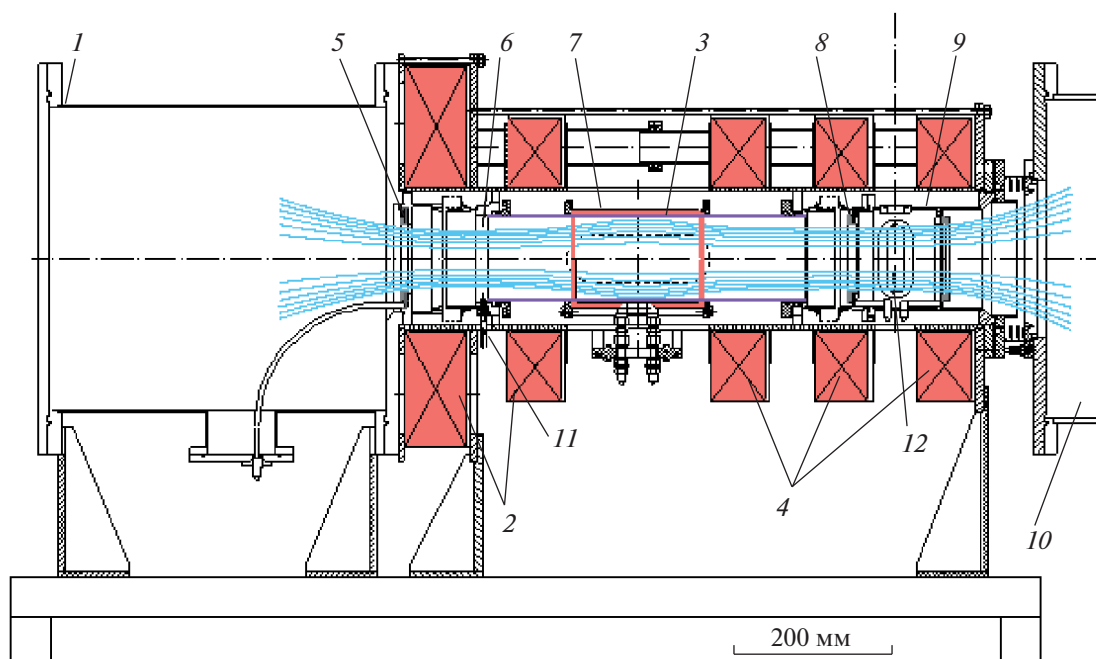


Рис. 1. Геликонный источник плазмы: 1 – расширительный объем; 2, 4 – катушки магнитного поля; 3 – кварцевая камера; 5, 8 – лимитеры; 6 – подача газа; 7 – ВЧ-антенна; 9 – диагностическая камера; 10 – вакуумный объем стенда; 11 – поджиг; 12 – ось движения тройного зонда Ленгюра.

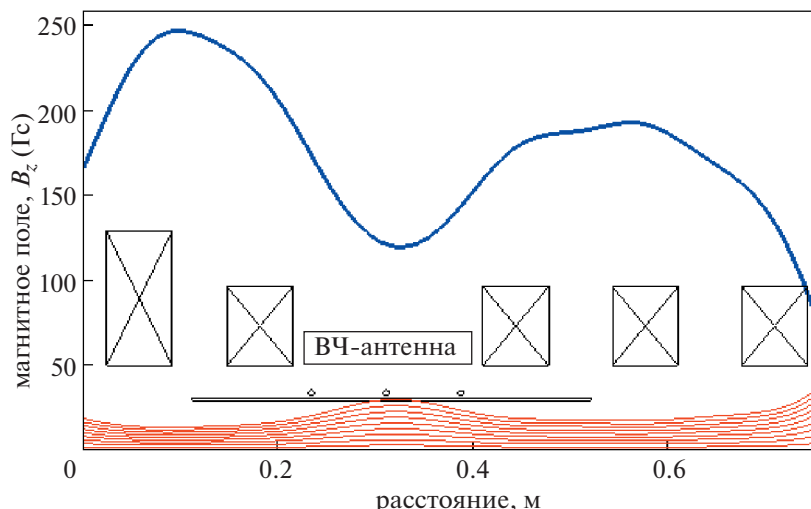


Рис. 2. Продольное магнитное поле и магнитные силовые линии при токе в магнитных катушках 5 А.

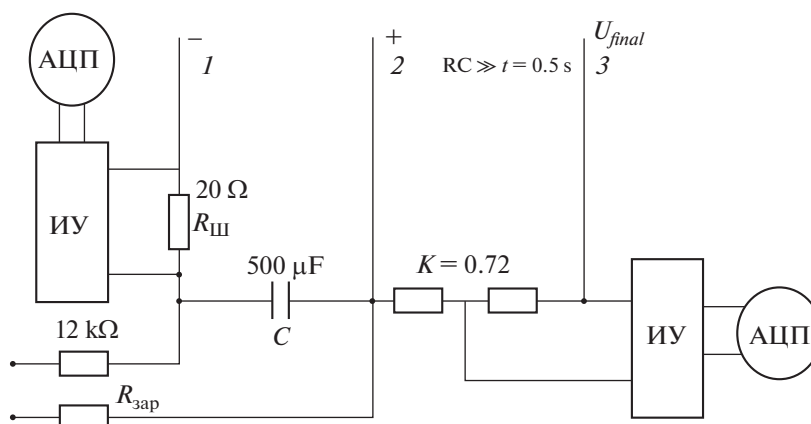


Рис. 3. Схема тройного ленгмюровского зонда. ИУ – изолирующий усилитель (гальваническая развязка).

ной ленгмюровский зонд на вертикальной подвижке. Данный зонд (рис. 3) состоит из трех электродов: электроды 1, 2 подключаются по схеме двойного зонда, между ними прикладывается напряжение -100 В, таким образом, они находятся в режиме ионного тока насыщения, электрод 3 находится в режиме плавающего потенциала. Электронная температура определяется с помощью напряжения между 2 и 3 электродами, а плотность с помощью ионного тока с электрода 1. Емкость C с помощью зарядных резисторов $R_{зар}$ заряжается до напряжения 100 В, номиналы резисторов подбираются так, чтобы длительность измеряемого сигнала была меньше времени разрядки емкости. Полная длительность разряда ~ 0.7 с, длительность квазистационарного режима ~ 0.5 с, $R_{зар} = 12$ кОм, $C = 500$ мкФ. Гальваническая развязка между зондом и измерительной схемой реализована с помощью оптронных преобразовате-

лей с малой емкостью связи между передатчиком и приемником, что позволяет избежать влияния емкостных помех, вызванных колебаниями потенциала плазмы.

В эксперименте были исследованы ВЧ-антенны, изображенные на рис. 4: NAGOYA TYPE III (NIII) и геликонная полуволновая (Н–Н) антенны с $m = \pm 1$ симметрией, а также витковая антенна с $m = 0$ симметрией, поскольку данный тип антенн широко распространен в экспериментальной физике индукционного разряда [9], и существуют весьма успешные результаты ($n_e \sim 10^{12}$ см $^{-3}$) по использованию витковой антенны на установках с магнитным полем и низкой ВЧ-мощностью (до 1 кВт) [10]. Оптимальная длина ВЧ-антенн с $m = \pm 1$ определяется на основании рассуждений в работе Чена, где предложен механизм ионизации газа электронами с резонансным сечением [11]. Выбирая фазовую ско-



Рис. 4. Типы использованных ВЧ-антенн: витковая ($l = 3.6$ см, $m = 0$); NPP ($l = 16$ см, $m = \pm 1$); Н–Н ($l = 15$ см, $m = \pm 1$); диаметр медной трубки $d = 6$ мм.

рость волн равной скорости электронов с энергией ионизации E_f , получаем

$$\frac{\omega}{k_z} = \sqrt{\frac{2E_f}{m_e}} = 5.93 \times 10^5 \sqrt{E_f} \text{ [м} \cdot \text{с}^{-1}\text{]}. \quad (1)$$

Отсюда, для водорода, принимая энергию электронов равной 50 эВ, имеем продольную длину волны $\lambda_z \sim 32$ см. Поскольку работы по оптимизации длины антенны [12, 13] показали наибольшую эффективность полуволновых антенн ($l_a = \lambda_z/2$), длина азимутально-несимметричных антенн в эксперименте ~ 15 см.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. ВЧ-мощность

В эксперименте была исследована зависимость плотности и электронной температуры плазмы на оси от вводимой в разряд мощности. Поскольку ВЧ-мощность, магнитное поле и давление рабочего газа значительным образом влияют на плотность плазмы, при их изменении изменяется и плазменная нагрузка, поэтому необходима постоянная подстройка согласующих емкостей для оптимального поглощения мощности плазмой. При измерениях подстройкой контура допускалась отраженная мощность не более 10% от вводимой в разряд мощности.

Следует отметить, что для каждой антенны измерения по мощности выполнены при фиксированном магнитном поле и давлении газа, но оптимальные значения поля и давления зависят от величины мощности (разделы 3.2, 3.3) и существенно изменяют плотность и электронную температуру. Плотность плазмы равномерно увели-

чивается с ростом мощности для витковой антенны (рис. 5). При 15 кВт достигается плотность плазмы 4.4×10^{11} см $^{-3}$. Электронная температура быстро растет в диапазоне от 0.5 до 3.5 кВт, далее температура электронов остается на уровне 8–10 эВ. Наибольший рост плотности плазмы наблюдается в диапазоне от 6 до 8 кВт. NPP антенна показывает более высокую эффективность ионизации почти на порядок: $n_e = 3 \times 10^{12}$ см $^{-3}$ при 15 кВт, также наблюдается резкий рост плотности от 5.5 до 7 кВт. Электронная температура имеет схожее распределение и температуру ~ 8 –9 эВ. В экспериментах с полуволновой геликонной антенной удалось получить самые высокие значения плотности: $n_e = 5.5 \times 10^{12}$ см $^{-3}$ при 15 кВт. На интервалах от 2 до 3.5, от 5.5 до 7.5 и от 8.5 до 10 кВт наблюдаются скачки темпа роста плотности плазмы. Электронная температура в случае геликонной антенны несколько ниже, чем для витковой и NPP антенн, и составляет ~ 7 –8 эВ.

3.2. Магнитное поле

Одной из целей данной работы было исследование влияния величины магнитного поля на генерацию разряда. Конструкция геликонного источника, используемого в эксперименте, предполагает возможность создания неоднородных магнитных полей, а увеличенное расстояние между катушками в районе ВЧ-антенны позволяет реализовать в источнике принцип открытых ловушек и увеличить градиент магнитного поля в области генерации плазмы. В ходе эксперимента были измерены зависимости плотности и электронной температуры от тока в катушках при различной мощности ВЧ-генератора.

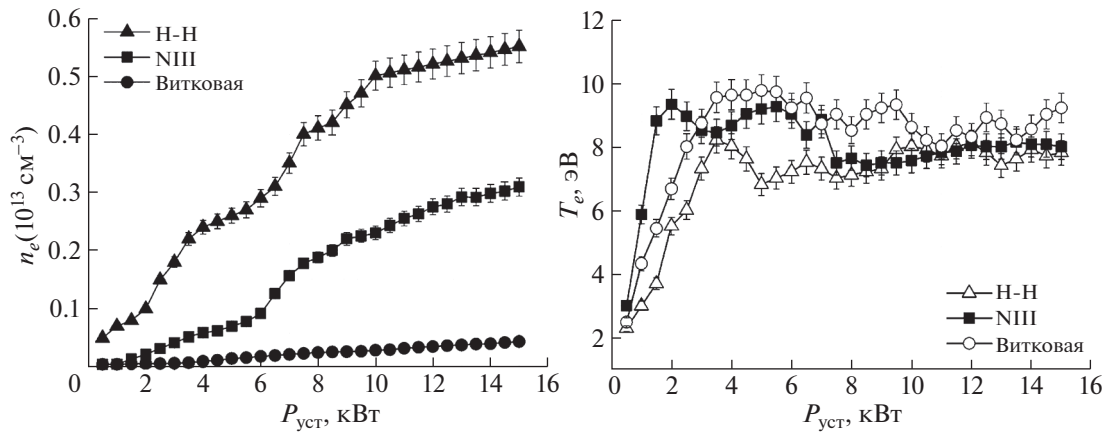


Рис. 5. Зависимость плотности плазмы и электронной температуры от ВЧ-мощности для витковой (магнитное поле 600 Гс, давление газа 25 мТорр), NIII (магнитное поле 240 Гс, давление газа 24 мТорр) и Н–Н (магнитное поле 180 Гс, давление газа 18 мТорр) антенн.

В случае витковой антенны не наблюдается ярко выраженных максимумов плотности по магнитному полю. Максимальная плотность плазмы $2.1 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ достигается при магнитном поле 620 Гс при мощности 5 кВт. С ростом мощности оптимальное поле изменяется в пределах 40–70 Гс, а плотность плазмы равномерно, без скачков, достигая в максимуме $4.4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ при магнитном поле 580 Гс и мощности 15 кВт. Температура электронов слабо зависит от магнитного поля, выше 100 Гс электронная температура $\sim 8\text{--}10$ эВ. В эксперименте измерялись радиальные профили плотности и температуры. Данные для витковой антенны, соответствующие оптимальному магнитному полю для различной ВЧ-мощности, представлены на рис. 6. Плотность плазмы имеет колоколообразный профиль с максимумом на оси камеры. Электронная температура имеет максимумы в 3 см от оси источника ($\sim 10\text{--}12$ эВ), минимум на оси ($\sim 7\text{--}8$ эВ). С ростом мощности форма профилей плотности и электронной температуры не изменяется.

NIII антенна позволяет получить более высокую плотность плазмы по сравнению с витковой антенной. Для всех значений мощности оптимальное магнитное поле совпадает и равно 240 Гс (рис. 7). Разряд характеризуется быстрым нарастанием плотности плазмы в области низких полей до 250 Гс, при дальнейшем увеличении магнитного поля плотность равномерно спадает. При повышении мощности с 5 до 15 кВт плотность растет с $0.6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ до $3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Электронная температура для 7.5, 10 и 15 кВт имеет минимум $\sim 6\text{--}9$ эВ в области наибольшей плотности, затем начинает линейно расти с магнитным полем до 12 эВ, для 5 кВт электронная температура имеет максимум $T_e = 13$ эВ при 450 Гс. Радиальные профили n_e (рис. 8) также имеют колоколооб-

разное распределение, но плазма более однородна на радиусе меньше 3 см, при большем радиусе плотность резко уменьшается. Значение электронной температуры $\sim 7\text{--}8$ эВ на оси, в максимумах ~ 13 эВ на радиусе 3.5–4 см.

В экспериментах с Н–Н антенной наблюдается резкое увеличение плотности при оптимальных значениях поля (рис. 9). При увеличении подводимой мощности наблюдается изменение оптимальных значений B_z : максимум плотности $0.4 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ был получен при 205 Гс для 5 кВт, для мощностей 7.5, 10 и 15 кВт оптимальное поле равно 140 Гс, а достигаемые плотности соответственно 0.5×10^{13} , 0.7×10^{13} и $1.2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. При $B_z > 250$ Гс плотность плазмы постепенно снижается. Распределение температуры аналогично случаю NIII антенны, при этом минимальная температура (~ 6 эВ) соответствует резкому скачку плотности при 15 кВт. Радиальные профили плотности плазмы и электронной температуры (рис. 10) обнаруживают ряд особенностей, не наблюдавшихся в экспериментах с витковой и NIII антенной. Форма радиального профиля плотности становится более пикированной с ростом ВЧ-мощности и при 15 кВт падает в два раза на расстоянии 1 см от оси. При 5 кВт наблюдаются пики 10 и 13 эВ в точках $R = -4$ и $R = 4$ см, с минимумом при $R = -2$ см (~ 6.5 эВ). При 7.5 кВт максимум электронной температуры 8.5 эВ находится на оси, с сохранением пиков в точках $R = \pm 4$ см. Подобную форму профиль температуры имеет место только при мощности 7–8 кВт и магнитном поле ~ 140 Гс, объяснение данного эффекта требует изучения волновой структуры магнитных полей в плазме. При дальнейшем повышении мощности распределение температуры вновь имеет “седловидный” характер. В целом, разряд характеризуется более низкой температу-

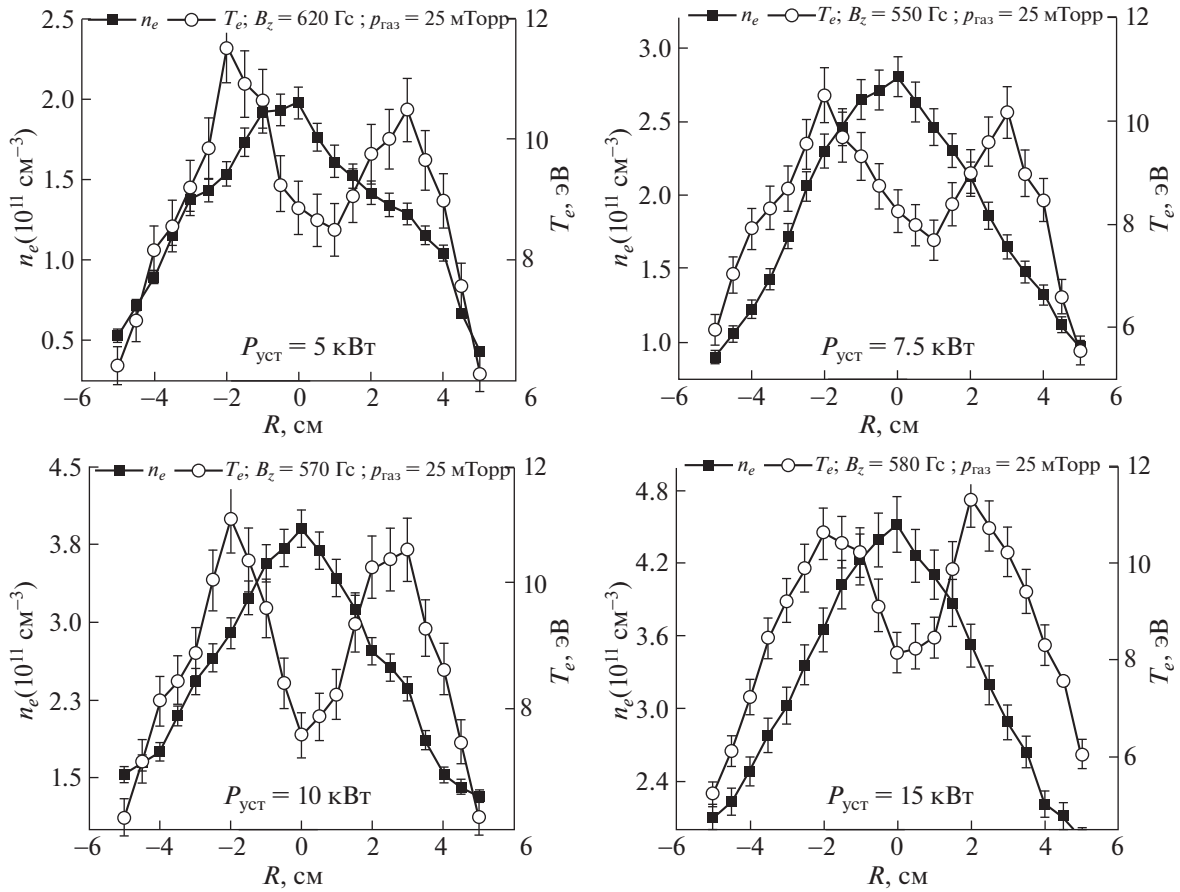


Рис. 6. Радиальные профили плотности плазмы и электронной температуры для витковой антенны.

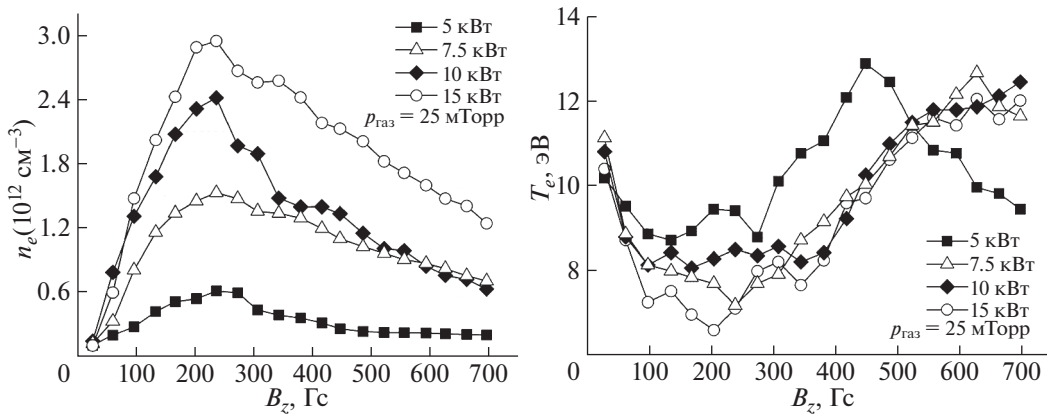


Рис. 7. Плотность плазмы и электронная температура при различном магнитном поле в области NIII антенны.

рой плазмы по сравнению с витковой и NIII антеннами.

Для данной работы все измерения проводились в условиях распространения $m = 1$ моды и $k_z > 0$, но также были проведены измерения плот-

ности плазмы при смене направления магнитного поля при сохранении ориентации электродов ВЧ-антенн, что соответствует случаю $m = -1$ и $k_z < 0$. Поскольку форма витковой антенны соответствует $m = 0$ моде, а NIII антенна является

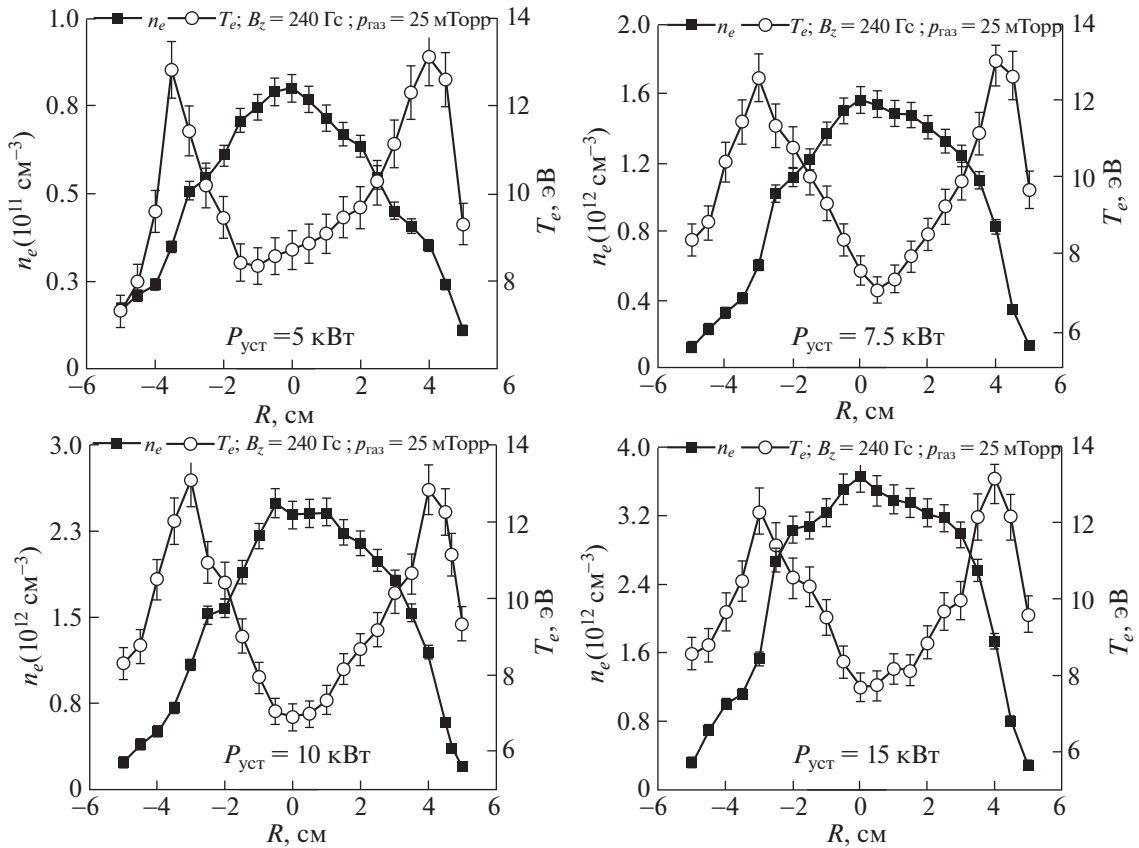


Рис. 8. Радиальные профили плотности плазмы и электронной температуры для НИИ антенны.

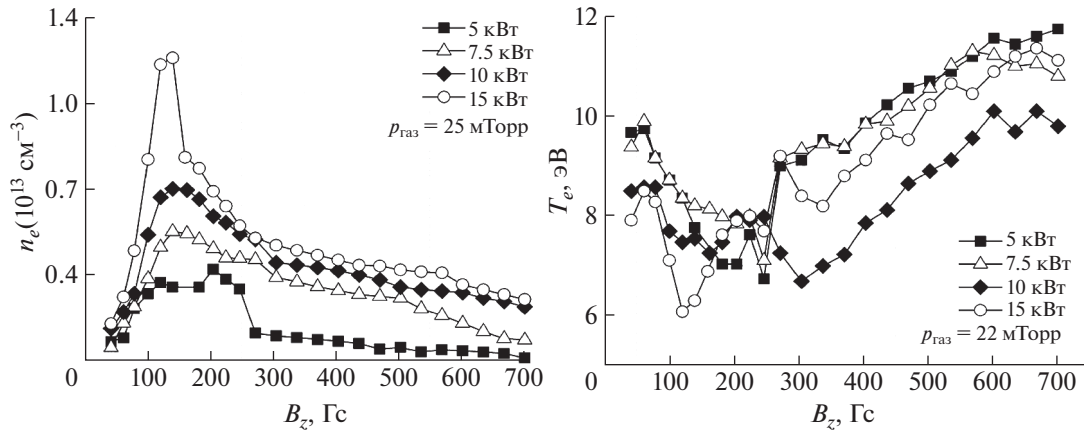


Рис. 9. Плотность плазмы и электронная температура при различном магнитном поле в области Н–Н антенны.

симметричной, смена направления B_z не влияет на измеряемые n_e и T_e . Результаты для Н–Н антенны показаны на рис. 11. Магнитное поле со знаком “плюс” соответствует распространению в камере преимущественно моды $m = 1$ и положительным волновым числам (направление k_z совпадает с направлением B_z , а электрическое поле

волны вращается по часовой стрелке, если смотреть вдоль магнитного поля), и наоборот для знака “минус”. Как видно, плазма в случае $B_z > 0$ имеет плотность на порядок выше ($n_{e,\text{max}} \sim 3.6 \times 10^{12}$ см $^{-3}$), чем для отрицательного поля ($n_{e,\text{max}} \sim 0.4 \times 10^{11}$ см $^{-3}$).

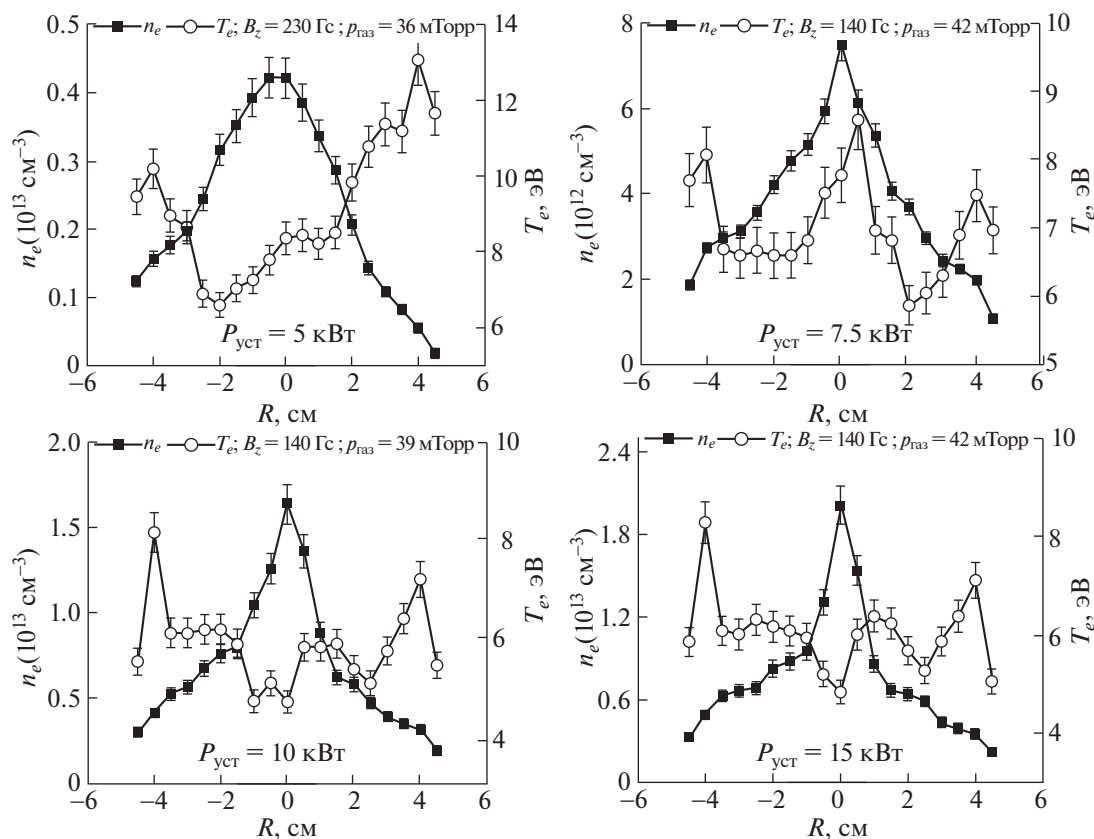


Рис. 10. Радиальные профили плотности плазмы и электронной температуры для Н–Н антенны.

3.3. Давление водорода

Для резонансных значений магнитного поля, представленных в разд. 3.2, были измерены зависимости плотности и электронной температуры от давления нейтрального газа в плазменной камере в диапазоне от 10 до 47 мТорр. Распределение плотности по давлению нейтрального газа для витковой антенны (при мощности 5, 7.5, 10 и 15 кВт) показаны на рис. 12. При 5 кВт оптимальное давление газа в камере 23 мТорр, а плотность плазмы $\sim 1.9 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$; при повышении мощности до 15 кВт плотность достигает значения $4.4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$, а оптимальное давление почти не меняется. Минимум электронной температуры ($\sim 8 \text{ эВ}$) соответствует максимальным значениям плотности, максимум температуры наблюдается в диапазоне от 12 до 15 мТорр.

Распределения плотности плазмы и электронной температуры НИИ по давлению в камере при 240 Гс представлены на рис. 13. При 5 кВт оптимальное давление в камере 32 мТорр, а плотность равна $0.9 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, с увеличением мощности оптимальное давление газа уменьшается незначительно – 21 мТорр для 15 кВт ($n_e = 3.6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$). Температура электронов имеет минимум в области наибольшей плотности ($T_e \sim 7 \text{ эВ}$), и растет

при уменьшении и увеличении давления (кроме случая $P_{\text{уст}} = 5 \text{ кВт}$, для которого T_e , как и n_e , почти не меняются по давлению).

Н–Н антенна характеризуется повышенным значением оптимального давления по сравнению с витковой и НИИ антеннами (рис. 14). При мощности 5 кВт оптимальное давление в камере $\sim 36 \text{ мТорр}$, плотность $\sim 0.4 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, с ростом мощности оптимальное давление газа увеличивается: при 15 кВт оптимальное давление составляет 42 мТорр, ($n_e = 2.05 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$). При мощности 10 кВт наблюдается резкий скачок по плотности в диапазоне от 30 до 40 мТорр. Температура электронов имеет минимум в области максимальной плотности при мощности 7.5, 10 и 15 кВт.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте достигнуто согласование ВЧ-мощности с плазменной нагрузкой при 15 кВт, и получены распределения плотности по магнитному полю и давлению газа для мощности 5–15 кВт. Также изучены режимы генерации плазмы с использованием трех видов антенн с азимутальным числом $m = 0; \pm 1$ в пробкотронной конфигурации магнитного поля. Витковая антен-

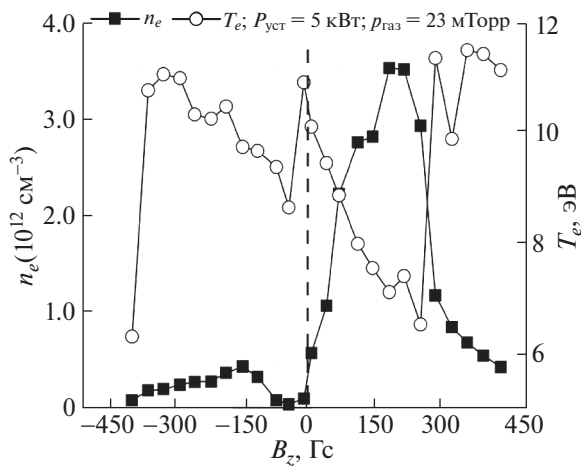


Рис. 11. Зависимость плотности плазмы и электронной температуры от величины и направления магнитного поля при мощности 5 кВт и давлении 23 мТорр; $B_z < 0$ соответствует $m = -1$ моде и отрицательным волновым числам, $B_z > 0$ соответствует $m = 1$ моде и $k_z > 0$.

на продемонстрировала самые низкие результаты по созданию плотной плазмы ($\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$), что делает ее неподходящей для предполагаемых реализаций разрабатываемого источника в материаловедческих исследованиях. Причина может заключаться в отсутствии геликонной моды в разряде, и ионизация идет за счет емкостного и индукционного разрядов с характерной низкой плотностью плазмы. Недостатком этой антенны является более высокое ВЧ-напряжение, что накладывает определенные технические ограничения, однако профиль получаемой плазмы обладает высокой однородностью, а при повышении мощности не наблюдается скачков нагрузки плазмы (как в случае $m = \pm 1$ антеннами), осложняющих согласование. NAGOYA TYPE III антенна дает более высокие значения плотности ($\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$), обладая довольно однородными профилями плотности. Также преимуществом НИИ антенны можно считать более плавные зависимости по магнитному полю и меньшее давление нейтрального газа по сравнению с Н–Н антенной, что упрощает режим работы и технические требования к установке. Среди изученных антенн Н–Н антенна демонстрирует лучшие значения плотности плазмы ($\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$), что уже наблюдалось в ряде экспериментов [10, 14]. Этот факт можно объяснить более высокими значениями азимутального тока, возбуждаемого геликонной антенной [15]. Кроме того, поскольку геликонные волны обладают круговой поляризацией, спиральная форма геликонной антенны позволяет полю волны эффективнее взаимодействовать с электронами. Оптимальные

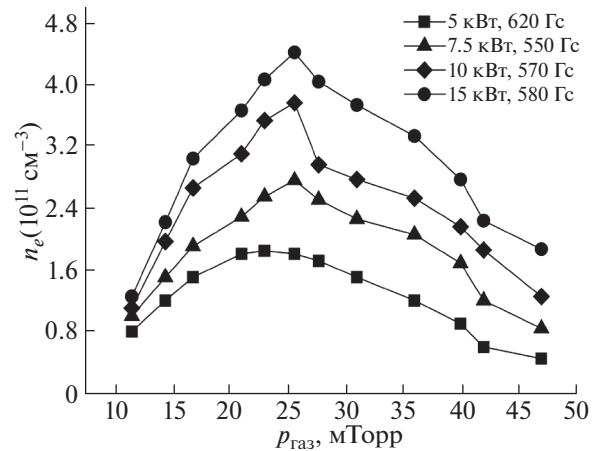


Рис. 12. Зависимость плотности плазмы от давления в газоразрядной камере при различной ВЧ-мощности (витковая антенна).

магнитные поля для НИИ и Н–Н антенн близки к теоретической оценке (208 Гс), полученной для водородной плазмы в работе [16]. Данная оценка поля соответствует частоте нижнегибридного резонанса для конкретного геликонного источника, что совпадает с результатами работы [17], в которой величина оптимального поля в случае неоднородного распределения также соответствовала зоне нижнегибридного резонанса.

В работе [13] Ф. Ченом показано, что поляризация геликонной антенны значительно влияет на эффективность разряда, поскольку спектр азимутального тока геликонной антенны несимметричен по k_z , а левополяризованные волны (мода $m = -1$) плохо распространяются в плазме и быстро затухают по сравнению с правополяризованными ($m = 1$). Наибольшая плотность плазмы соответствует азимутальной моде $m = 1$ и $k_z > 0$, а наименьшая – $m = -1$ и $k_z > 0$. Эксперименты по смене направления демонстрируют сильную зависимость плотности от взаимной ориентации Н–Н антенны и магнитного поля, совпадая с результатами, полученными Ченом, что является весомым аргументом в пользу наличия и распространения в разряде геликонных волн с $m = \pm 1$ в случае Н–Н антенны. Радиальное распределение плотности сохраняет максимум на оси для всех антенн, также как сохраняется и “седловидное” распределение электронной температуры с минимумом на оси и максимумами на периферии плазмы. Предположительно, это связано с нагревом наружного слоя плазмы быстро затухающими электростатическими волнами Трайвелписа–Голланда [18], дающими значительный вклад в поглощение мощности. В эксперименте с Н–Н антенной обнаружено повышение концентрации плотности на оси с увеличением ВЧ-мощности с

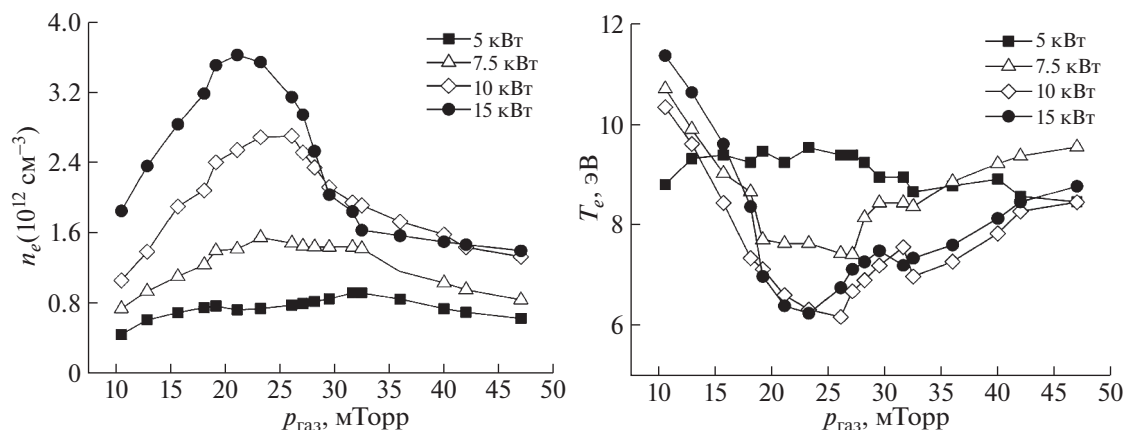


Рис. 13. Зависимости плотности плазмы и электронной температуры от давления в газоразрядной камере при магнитном поле 240 Гс и различной ВЧ-мощности (НИИ антенна).

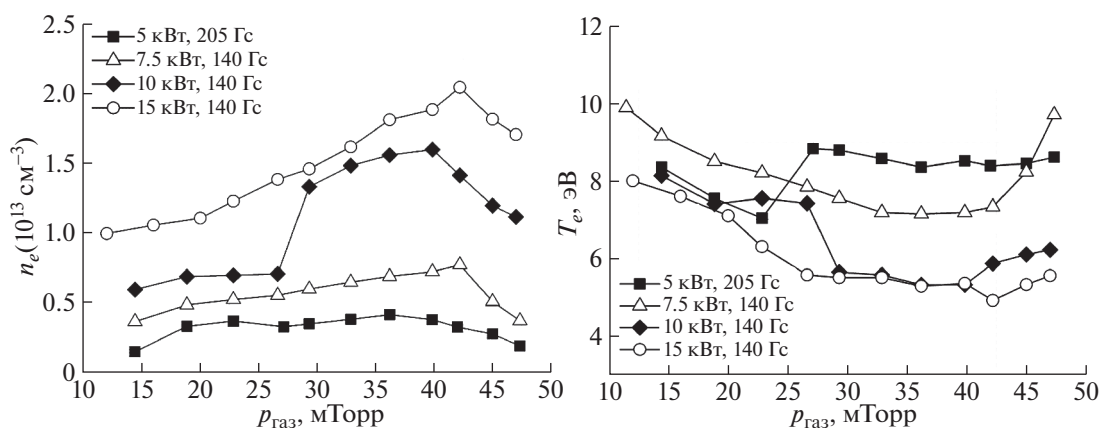


Рис. 14. Зависимости плотности плазмы и электронной температуры от давления в газоразрядной камере при различной ВЧ-мощности (Н–Н антенна).

формированием выраженного пика размером ~ 1 см. При повышении мощности наблюдается уменьшение области оптимального для n_e магнитного поля, что является важным результатом в рамках разрабатываемой концепции магнитного пробкотрона. По этим причинам в последующих экспериментах планируется сосредоточиться на ВЧ-антеннах геликонного типа, в частности на измерении электромагнитных полей в создаваемом разряде и оптимизации профиля плазмы для целей материаловедческих исследований, а также дальнейшее повышение ВЧ-мощности, вводимой в разряд.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90117 “ВЧ источник плотной плазмы на основе геликонного разряда в неоднородном внешнем магнитном поле для материаловедческих исследований”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kreter A., Brandt C., Huber A., Kraus S., Möller S., Reinhardt M., Schweer B., Sergienko G., Unterberg B. // Fusion Sci. Technol. 2015. V. 68. P. 8. <https://doi.org/10.13182/FST14-906>
2. Ivanov A.A., Davydenko V.I., Kotelnikov I.A., Kreter A., Mishagin V.V., Prokhorov I.A., Shikhovtsev I.V., Unterberg B. // Trans. Fusion Sci. Technol. 2013. V. 63.
3. Linsmeier Ch., Unterberg B., Coenen J.W., Doerner R.P., Greuner H., Kreter A., Linke J., Maier H. // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. P. 092012. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa4feb>
4. Blackwell B.D., Caneses J.F., Samuell C.M., Wach J., Howard J., Corr C. // Plasma Sources Sci. Technol. 2012. V. 21. P. 055033. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/21/5/055033>
5. Thakur S.C., Simmonds M.J., Caneses J.F., Chang F., Doerner R.P., Goulding R., Lumsdaine A., Rapp J., Tynan G.R. // arxiv.org/abs/2005.11214.

6. *Virko V.F., Shamrai K.P., Virko Yu.V., Kirichenko G.S.* // Phys. Plasmas. 2004. V. 11. P. 3888.
<https://doi.org/10.1063/1.1764830>
7. *Иванов А.А., Приходько В.В.* // УФН. 2017. Т. 187. С. 547.
8. *Тимофеев А. В.* // Физика плазмы. 2002. Т. 28. С. 984.
9. *Иванов А.А., Шиховцев И.В., Подыминогин А.А., Авербух И.И., Ахметов Т.Д., Давыденко В.И., Дейчули П.П.* // Физика плазмы. 2002. Т. 28. С. 221.
10. *Virko V.F., Kirichenko G.S., Shamrai K.P.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2002. V. 11. P. 10.
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/11/1/302>
11. *Chen F.F.* // Plasma Phys. Controlled Fusion. 1991. V. 33. P. 339.
12. *Porte L., Yun S.M., Arnush D., Chen F.F.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2003. V. 12. P. 287.
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/12/2/320>
13. *Miljak D.G., Chen F.F.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1998. V. 7. P. 61.
14. *Blackwell D.D., Chen F.F.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1997. V. 6. P. 569.
15. *Arnush D., Chen F.F.* // Phys. Plasmas. 1998. V. 5. P. 1239.
<https://doi.org/10.1063/1.872782>
16. *Kotelnikov I. A.* // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. P. 122101.
<https://doi.org/10.1063/1.4903329>
17. *Yoshitaka M., Nakashima H., Baity F.W., Goulding R.H., Carter M.D., Sparks D.O.* // Thin Solid Films. 2006. V. 506–507. P. 583.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.08.063>
18. *Arnush D.* // Phys. Plasmas. 2000. V. 7. P. 3042.