

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе

Е.А. Кралькина

Плазменные реакторы и источники ионов, принцип действия которых основан на индуктивном высокочастотном (ВЧ) разряде низкого давления, уже в течение нескольких десятилетий являются важнейшей составляющей современных земных и космических технологий. Однако постоянно возрастающие и изменяющиеся требования плазменных технологий требуют усовершенствования старых моделей устройств и создания их новых перспективных моделей. Большое значение при разработке индуктивных источников плазмы имеет обеспечение условий, при которых плазма эффективно поглощает ВЧ-мощность. В последние годы стало очевидным, что в индуктивном ВЧ-разряде низкого давления мощность ВЧ-генератора распределяется между активным сопротивлением внешней цепи и плазмой, причем в плазму мощность поступает по двум каналам: индуктивному, существующему благодаря току, текущему по индуктору или антенне, и емкостному, обусловленному наличием емкостной связи между антенной и плазмой. Рассмотрены особенности поведения индуктивного ВЧ-разряда, связанные с перераспределением ВЧ-мощности между каналами, проанализированы механизмы поглощения ВЧ-мощности. Обсуждаются возможности оптимизации источников плазмы, работающих на индуктивном ВЧ-разряде.

PACS numbers: 52.40.Fd, 52.50.-b, 52.80.Pi

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200805f.0519

Содержание

- 1. Введение (519).**
- 2. Поглощение мощности плазмой индуктивного высокочастотного разряда (521).**
- 3. Эквивалентное сопротивление плазмы (522).**
 - 3.1. Определение и методы расчета.
 - 3.2. Методы измерения.
- 4. Индуктивный разряд без внешнего магнитного поля.**
- 5. Индуктивный разряд с внешним магнитным полем.**
- 6. Особенности индуктивного высокочастотного разряда низкого давления, горящего в режиме $R_{pl} \leq R_{ant}$ (526).**
 - 4.1. Зависимость параметров плазмы от мощности высокочастотного генератора.
 - 4.2. Зависимость параметров плазмы от внешнего магнитного поля.
- 7. Особенности индуктивного высокочастотного разряда с емкостной компонентой (533).**
 - 5.1. Зависимость параметров плазмы от мощности высокочастотного генератора.
 - 5.2. Зависимость параметров плазмы от внешнего магнитного поля.
 - 5.3. Гибридный разряд.
- 8. О возможности оптимизации индуктивных источников плазмы низкого давления (537).**
- 9. Заключение (538).**
- Список литературы (539).**

1. Введение

Одним из важнейших вопросов организации плазменных технологических процессов является разработка источников плазмы, обладающих свойствами, оптимальными для данной технологии, например: высокой однородностью, заданными плотностью плазмы, энергией заряженных частиц, концентрацией химически активных радикалов. Анализ показывает, что наиболее перспективными для применения в промышленных технологиях являются высокочастотные (ВЧ) источники плазмы, так как, во-первых, с их помощью можно обрабатывать как проводящие, так и диэлектрические материалы, а во-вторых, в качестве рабочих газов можно использовать не только инертные, но и химически активные газы. Сегодня известны источники плазмы, основанные на емкостном и индуктивном ВЧ-разрядах. Особенностью емкостного ВЧ-разряда, наиболее часто используемой в плазменных технологиях, является существование приэлектродных слоев объемного заряда, в которых формируется среднее по времени падение потенциала, ускоряющее ионы в направлении электрода. Это позволяет обрабатывать с помощью ускоренных ионов образцы материалов, расположенные на электродах ВЧ-емкостного разряда. Другой особенностью емкостного разряда, часто используемой в приложениях, является наличие большого количества быстрых электронов в приэлектродных слоях объемного заряда. Наличие быстрых электронов в разряде приводит к эффективной диссоциации сложных молекул и образованию радикалов, которые необходимы для реактивного травления

Е.А. Кралькина. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Воробьевы горы, 119992 Москва, Российская Федерация
Тел. (495) 939-47-73
E-mail: ekralkina@mail.ru

Статья поступила 25 июня 2007 г., после доработки 12 ноября 2007 г.

материалов, плазменной полимеризации и т.д. Недостатком емкостного ВЧ-разряда является относительно низкая концентрация электронов в основном объеме плазмы. Значительно более высокая концентрация электронов при тех же ВЧ-мощностях характерна для индуктивных ВЧ-разрядов.

Индуктивный ВЧ-разряд без магнитного поля известен уже более ста лет [1, 2]. Это разряд, возбуждаемый током, текущим по индуктору, расположенному на боковой или торцевой поверхности, как правило, цилиндрического источника плазмы. Еще в 1891 г. Дж.Дж. Томсон высказал предположение [1] о том, что индуктивный разряд вызывается и поддерживается вихревым электрическим полем, которое создается магнитным полем, в свою очередь, индуцируемым током, текущим по антенне. В 1928–1929 гг., полемизируя с Дж.Дж. Томсоном, Д. Таунсенд и Р. Дональдсон [3, 4] высказали идею о том, что индуктивный ВЧ-разряд поддерживается не вихревыми электрическими полями, а потенциальными, появляющимися благодаря наличию разности потенциалов между витками индуктора. В 1929 г. К. Мак-Кинтон [5] экспериментально показал возможность существования двух режимов горения разряда. При малых амплитудах ВЧ-напряжения разряд действительно возникал под действием электрического поля между витками катушки и носил характер слабого продольного свечения вдоль всей газоразрядной трубы. С увеличением амплитуды ВЧ-напряжения свечение становилось ярче и наконец возникал яркий кольцевой разряд. Свечение, вызванное продольным электрическим полем, при этом исчезало. Впоследствии эти две формы разряда были названы *E*- и *H*-разрядом соответственно.

Области существования индуктивного разряда можно условно разделить на две большие области [6]: это высокие давления (порядка атмосферного давления), при которых генерируемая плазма близка к равновесной, и низкие давления, при которых генерируемая плазма является неравновесной. Предметом настоящей статьи является вторая область существования индуктивного ВЧ-разряда.

Плазменные реакторы и источники ионов, принцип действия которых основан на индуктивном ВЧ-разряде низкого давления, уже в течение нескольких десятилетий представляют собой важнейшую составляющую современных земных и космических технологий. Широкому распространению технических применений индуктивного ВЧ-разряда способствуют его основные достоинства — возможность получения высокой концентрации электронов при относительно невысоком уровне ВЧ-мощности, отсутствие контакта плазмы с металлическими электродами, небольшая температура электронов, а следовательно, невысокий потенциал плазмы относительно стенок, ограничивающих разряд. Последнее помимо минимизации потерь мощности на стенках источника плазмы позволяет избежать повреждения поверхности образцов при их обработке в разряде ионами высоких энергий.

В настоящее время известны источники плазмы низкого давления, принцип действия которых основан на индуктивном ВЧ-разряде в отсутствие магнитного поля, а также на индуктивном ВЧ-разряде, помещенном во внешнее магнитное поле с индукцией, соответствующей условиям электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) и условиям возбуждения геликонов и волн Трай-

велписа – Голда (ТГ) (далее называемых геликонными источниками).

Типичными примерами источников плазмы, работающих на индуктивном ВЧ-разряде без магнитного поля, являются плазменные реакторы, предназначенные для травления подложек [7], источники ионов, предназначенные для реализации земных ионно-пучковых технологий и работы в космосе в качестве двигателей коррекции орбиты космических аппаратов [8], источники света [9]. Общей конструктивной особенностью перечисленных устройств является наличие газоразрядной камеры (ГРК), на внешней поверхности которой или внутри ее расположен индуктор или антенна. С помощью антенны, подключенной к высокочастотному генератору, в объем ГРК вводится ВЧ-мощность и зажигается безэлектродный разряд. Токи, текущие по антенне, индуцируют в плазме вихревое электрическое поле, которое нагревает электроны до энергий, необходимых для эффективной ионизации рабочего газа. Типичные плотности плазмы в плазменных реакторах составляют величину $10^{11} – 3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, а в источниках ионов — $3 \times 10^{10} – 3 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Характерное давление нейтрального газа в плазменных реакторах изменяется от 1 до 30 мторр, в источниках ионов составляет величину 0,1 мторр, в источниках света — 0,1–10 торр.

Известно, что в плазме индуктивного разряда ВЧ-электрические поля сканируются, т.е. нагрев электронов осуществляется в узком пристеночном слое. При приложении к плазме индуктивного ВЧ-разряда внешнего магнитного поля появляются области прозрачности, в которых ВЧ- поля проникают вглубь плазмы и нагрев электронов осуществляется во всем ее объеме. Этот эффект использован в источниках плазмы, принцип действия которых основан на ЭЦР. Такие источники работают главным образом в микроволновом диапазоне (2,45 ГГц) [10]. Микроволновое излучение вводится, как правило, через кварцевое окно в цилиндрическую газоразрядную камеру, в которой с помощью магнитов формируется неоднородное магнитное поле. Магнитное поле характеризуется наличием одной или нескольких резонансных зон, в которых выполняются условия ЭЦР и происходит ввод ВЧ-мощности в плазму. В радиочастотном диапазоне ЭЦР используется в так называемых источниках плазмы с нейтральным контуром [11–16]. Существенную роль в генерации плазмы и формировании структуры разряда играет нейтральный контур, представляющий собой непрерывную последовательность точек с нулевым магнитным полем. Замкнутый магнитный контур формируется с помощью трех электромагнитов. Токи в обмотках верхней и нижней катушек имеют одинаковое направление. Ток средней катушки течет в обратном направлении. ВЧ-индукционный разряд с нейтральным контуром характеризуется высокой плотностью плазмы ($10^{11} – 10^{12} \text{ см}^{-3}$) и низкой температурой электронов (1–4 эВ).

Другим типом источников, использующих индуктивный ВЧ-разряд с внешним магнитным полем, являются геликонные источники плазмы [17, 18], обычно состоящие из двух полых цилиндров, изготовленных из диэлектрического материала. На внешней боковой поверхности цилиндра меньшего диаметра устанавливается антенна, форма которой оптимальна для возбуждения геликонов и ТГ-волн. Волны проходят в камеру с большим диаметром вдоль аксиального магнитного

поля, создаваемого магнитной системой. Типичная концентрация плазмы в геликонных источниках достигает 10^{12} см^{-3} , магнитное поле составляет величину порядка 500–1000 Гс, ВЧ-мощность — 2–3 кВт.

В работах [19, 20] представлены плазменный реактор и источник ионов, работающие при условиях, когда геликон является поверхностью волной, а ТГ-волну проникает вглубь плазмы. Источник ионов [20] позволяет получать плотность ионного тока от 0,5 до 3 мА см^{-2} при уровне ВЧ-мощности, не превышающем 150 Вт. Магнитное поле составляет величину 200–300 Гс.

Обобщим приведенные выше параметры плазмы, типичные для индуктивных источников плазмы. Как правило, радиус ВЧ-источников плазмы r составляет 2–25 см, длина L — от 3 до 50 см. Диапазон изменения плотности плазмы $n_e \sim 1 \times 10^{10} - 3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при температуре электронов $T_e \sim 3 - 8 \text{ эВ}$ ($3 \times 10^4 - 9 \times 10^4 \text{ К}$). Давление нейтрального газа p в источниках (за исключением источников света) изменяется от 0,1 до 10 мбарр. Величина магнитного поля изменяется от 0 до 1 кГс. В настоящей статье свойства индуктивного ВЧ-разряда проанализированы в пределах указанных диапазонов параметров плазмы.

Оценки показывают, что при рассмотренных условиях частота столкновений электронов v при относительно небольших значениях плотности плазмы определяется частотой электрон-атомных столкновений v_{ea} , частота электрон-ионных столкновений v_{ei} становится существенной лишь при плотности n_e , превышающей 10^{12} см^{-3} . Величина $k v_{Te}$, характеризующая черенковское поглощение (k — величина волнового вектора, v_{Te} — тепловая скорость электронов), близка по величине к частоте электрон-атомных столкновений. Таким образом, в индуктивном ВЧ-разряде низкого давления вклад в поглощение вносят как столкновительный, так и черенковский механизмы.

Несмотря на большое число схем плазменных устройств, работающих на индуктивном ВЧ-разряде, постоянно возрастающие и изменяющиеся требования плазменных технологий требуют усовершенствования моделей старых устройств и разработки новых перспективных моделей. Такая работа ставит перед разработчиками источников плазмы целый ряд вопросов.

- Какую схему разряда — разряд без магнитного поля, или разряд, помещенный в магнитное поле, соответствующее ЭЦР, условиям возбуждения геликонов и ТГ-волн, — следует выбрать, разрабатывая источник плазмы для определенного технологического приложения?

- Как оптимизировать поглощение ВЧ-мощности плазмой и обеспечить эффективный ввод мощности?

- Как обеспечить воспроизводимость и надежность работы источников плазмы?

- Как получить максимально возможную плотность плазмы в источнике при заданных уровнях мощности, поглощаемой плазмой, и расходе рабочего газа?

- Какие внешние факторы позволяют получить заданное пространственное распределение плотности плазмы и/или пространственное распределение плотности тока в пучке ионов?

Очевидно, что найти ответы на поставленные вопросы можно только на основе фундаментальных знаний о физических процессах, протекающих в индуктивном ВЧ-разряде [21–38]. Рассмотрим основные пред-

ставления о физических процессах, происходящих в индуктивном ВЧ-разряде низкого давления, а затем в разделе 6 постараемся найти ответы на поставленные выше вопросы.

2. Поглощение мощности плазмой индуктивного высокочастотного разряда

Индуктивный ВЧ-разряд — это разряд, возбуждаемый током, текущим по индуктору, расположенному на боковой или торцевой поверхности, как правило, цилиндрического источника плазмы (рис. 1а, б). Центральным вопросом физики индуктивного разряда низкого давления является вопрос о механизмах и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой. Еще со времен Дж. Дж. Томсона известно [39], что при чисто индуктивном возбуждении ВЧ-разряда его эквивалентную схему можно представить в виде, изображенном на рис. 1г. ВЧ-генератор нагружен на трансформатор, первичная обмотка которого состоит из антенны, по которой течет ток, создаваемый генератором, а вторичной обмоткой является ток, индуцированный в плазме. Первичная и вторичная обмотки трансформатора связаны коэффициентом взаимной индукции M . Трансформаторную схему можно легко свести к схеме, представляющей собой последовательно соединенные активное сопротивление и индуктивность антенны, эквивалентные сопротивления и индуктивность плазмы (рис. 1д), так что мощность ВЧ-генератора P_{gen} оказывается связанный с мощностью P_{ant} , выделяемой в антenne, и мощностью P_{pl} , выделяемой в плазме, выражениями

$$P_{gen} = P_{ant} + P_{pl}, \quad (1)$$

$$P_{gen} = \frac{1}{2} I^2 (R_{ant} + R_{pl}), \quad (2)$$

где I — ток, текущий через антенну, R_{ant} — активное сопротивление антенны, R_{pl} — эквивалентное сопротивление плазмы.

Из формул (1) и (2) видно, что когда нагрузка согласована с генератором, активная ВЧ-мощность P_{gen} , отдаваемая генератором во внешнюю цепь, распределяется между двумя каналами, а именно: одна часть

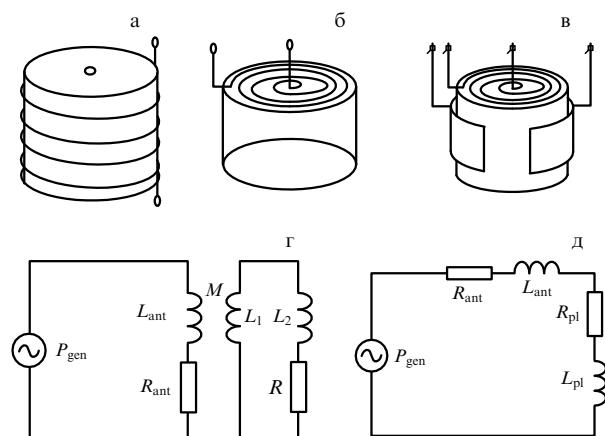


Рис. 1. Схемы (а, б) индуктивных источников плазмы и (в) индуктивного источника плазмы с емкостной компонентой, (г, д) эквивалентные схемы чисто индуктивного разряда.

мощности идет на нагрев антенны, а другая часть поглощается плазмой. Ранее в подавляющем числе работ *a priori* полагалось, что в условиях экспериментов

$$R_{\text{pl}} \gg R_{\text{ant}} \quad (3)$$

и свойства плазмы определяются мощностью ВЧ-генератора, полностью поглощаемой плазмой. В середине 1990-х годов В. Годяк с сотрудниками убедительно показали [40], что в разрядах низких давлений соотношение (3) может нарушаться. Очевидно, что при условии

$$R_{\text{pl}} \leq R_{\text{ant}} \quad (4)$$

поведение индуктивного ВЧ-разряда кардинально меняется. Теперь параметры плазмы зависят не только от мощности ВЧ-генератора, но и от эквивалентного сопротивления плазмы, которое, в свою очередь, зависит от параметров плазмы и условий ее поддержания. Это приводит к появлению новых эффектов, связанных с самосогласованным перераспределением мощности во внешней цепи разряда. Последнее может существенно сказываться на эффективности работы источников плазмы. Очевидно, что ключ к пониманию поведения разряда в режимах, соответствующих неравенству (4), а также к оптимизации работы плазменных устройств лежит в закономерностях изменения эквивалентного сопротивления плазмы при изменении параметров плазмы и условий поддержания разряда.

3. Эквивалентное сопротивление плазмы

3.1. Определение и методы расчета

В общем случае величина ВЧ-мощности, поглощаемой плазмой, определяется выражением [22]

$$P_{\text{pl}} = \frac{L\omega}{4} \int_0^R r [\epsilon''_{\perp} |E_r|^2 + \epsilon''_{\perp} |E_{\varphi}|^2 + \epsilon''_{||} |E_z|^2 + g'' (E_{\varphi} E_r^* - E_r E_{\varphi}^*)] dr, \quad (5)$$

где E_{φ} , E_r , E_z — азимутальная, радиальная и продольная компоненты ВЧ-электрического поля в плазме соответственно, ϵ''_{\perp} , $\epsilon''_{||}$, g'' — мнимые части компонент тензора диэлектрической проницаемости плазмы. Интегрирование ведется по всему объему плазмы. В индуктивном разряде ВЧ-электрические поля пропорциональны току, текущему в антenne, поэтому (5) можно переписать в виде

$$P_{\text{pl}} = \frac{1}{2} R_{\text{pl}} I^2, \quad (6)$$

где коэффициент пропорциональности R_{pl} имеет размерность сопротивления и зависит только от свойств плазмы.

Сравнение (6) с выражением (2), полученным на основе трансформаторной модели разряда, показывает, что коэффициент пропорциональности в (6) и представляет собой эквивалентное сопротивление плазмы.

Из формул (5) и (6) видно, что физический смысл эквивалентного сопротивления плазмы состоит в том, что это сопротивление является мерой способности плазмы поглощать ВЧ-мощность. Величина эквивалентного сопротивления зависит как от закономерностей проникновения полей в плазму, так и от механизма поглощения мощности, т.е. определяется основными

фундаментальными свойствами плазмы индуктивного разряда.

Из формулы (5) видно, что для расчета эквивалентного сопротивления должны быть известны ВЧ-поля в объеме плазмы. Эти поля могут быть найдены на основе теоретических моделей индуктивных источников плазмы низкого давления [41–45].

3.2. Методы измерения

Когда разряд является чисто индуктивным и нагрузка согласована с генератором, ВЧ-мощность P_{gen} , отдаваемая генератором во внешнюю цепь, распределяется между двумя каналами, а именно: часть мощности идет на нагрев антенны, а часть мощности поглощается плазмой [25, 40]. В действительности сопротивление антенн в экспериментах включает в себя потери на нагрев элементов системы согласования, самой антenne, металлических частей установки, расположенных вблизи источника плазмы, вследствие возбуждения в них индукционных токов, ВЧ-разъемов и т.д. В связи с этим метод измерения R_{pl} состоит из следующих этапов. Сначала по измеренным значениям тока I_0 , текущего по антenne без разряда, и величины мощности ВЧ-генератора определяется эффективное сопротивление антенн:

$$R_{\text{ant}} = \frac{2P_{\text{gen}}}{I_0^2}. \quad (7)$$

Затем по измерениям при разряде тока через антенну и мощности ВЧ-генератора вычисляется полное сопротивление внешней цепи R :

$$R = \frac{2P_{\text{gen}}}{I^2}. \quad (8)$$

Из полного сопротивления внешней цепи вычитается сопротивление антennы и определяется эквивалентное сопротивление плазмы:

$$R_{\text{pl}} = \frac{2P_{\text{gen}}}{I^2} - R_{\text{ant}}. \quad (9)$$

По известному эквивалентному сопротивлению плазмы легко вычисляется доля ВЧ-мощности, поглощенной плазмой:

$$P_{\text{pl}} = \frac{1}{2} R_{\text{pl}} I^2. \quad (10)$$

3.3. Индуктивный разряд без внешнего магнитного поля

На рисунке 2а представлены значения эквивалентного сопротивления плазмы индуктивного ВЧ-разряда [46, 47], полученные в экспериментах с источниками плазмы различных размеров при давлении аргона, близком к 2 мторр. В качестве независимой переменной по оси абсцисс отложена мощность P_{pl} , поглощенная плазмой. Естественно предположить, что плотность плазмы n_e пропорциональна P_{pl} , однако следует отметить, что для различных источников плазмы коэффициенты пропорциональности между P_{pl} и n_e будут различаться. Как видно, общей тенденцией поведения эквивалентного сопротивления R_{pl} является его возрастание в области относительно небольших значений вложенной мощности, а затем его насыщение.

На рисунке 2б показаны зависимости эквивалентного сопротивления от концентрации электронов, рас-

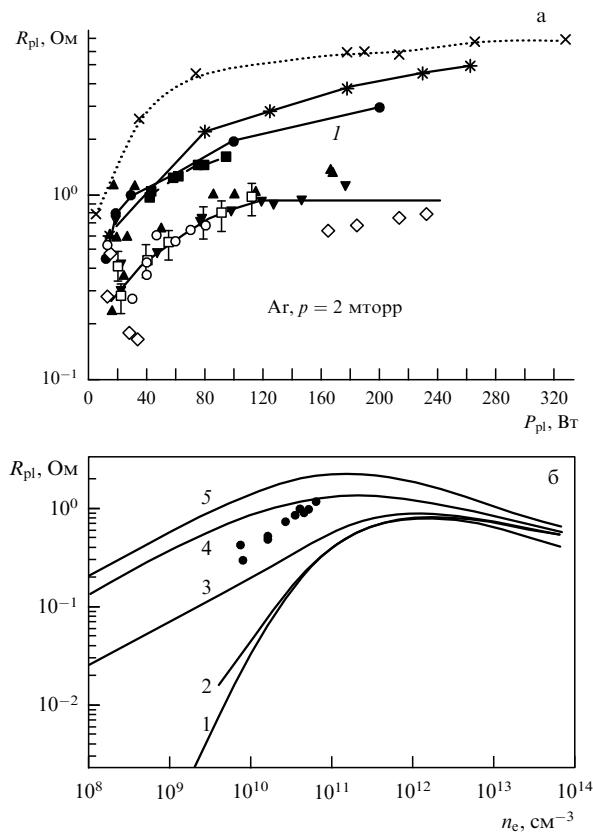


Рис. 2. (а) Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы R_{pl} от величины ВЧ-мощности P_{pl} , поглощенной плазмой при возбуждении разряда спиральными антеннами, расположенными на боковой и торцевой поверхностях источника плазмы. Данные работы [46] (аргон, давление 2 мторр) при $R = 7,5$ см с "верхней" антенной при $L = 10$ см (\square), $L = 15$ см (\circ), $L = 20$ см (\blacktriangle) и с "боковой" антенной при $L = 10$ см (\blacktriangledown), $L = 20$ см (\blacksquare); при $R = 11$ см с "верхней" антенной при $L = 20$ см (*) и с "боковой" антенной при $L = 20$ см (\times); 1 — данные работы [47] (аргон, давление 1 мторр, "верхняя антenna", $R = 10$ см). (б) Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от ее плотности. Результаты расчета для плоских дискообразных источников радиусом 7,5 и 11 см по формулам, полученным в [42, 45]. Кривая 1 — расчет без учета электрон-ионных столкновений, 2 — с учетом столкновений, 3—5 — с учетом столкновений при давлениях 2, 10 и 30 мторр соответственно, кружки — экспериментальные данные [46] при давлении аргона 2 мторр.

считанные в рамках кинетической модели индуктивного ВЧ-источника плазмы низкого давления без магнитного поля [42, 45]. Расчетные значения эквивалентного сопротивления по абсолютной величине несколько меньше измеренных [46]. Несмотря на количественное расхождение, качественно экспериментальные и расчетные зависимости $R_{pl}(n_e)$ близки друг к другу. В области малых плотностей плазмы n_e расчетные значения R_{pl} , так же как и экспериментальные, возрастают пропорционально n_e , а затем насыщаются. В области больших концентраций электронов, не достигнутых экспериментально, расчетные R_{pl} , пройдя через максимум, начинают медленно убывать.

При низких давлениях область малых концентраций электронов соответствует случаю слабой пространственной дисперсии, поэтому зависимость $R_{pl}(n_e)$ хорошо аппроксимируется результатами расчетов, выполненных с использованием выражения для диэлектрической проницаемости, полученным для среды без пространствен-

ной дисперсии [42, 45]. Напротив, в области высоких концентраций электронов, где преобладает бесстолкновительное поглощение, т.е. в области аномального скин-эффекта, зависимость $R_{pl}(n_e)$ близка к полученной для сред с сильной пространственной дисперсией [42, 45]. В целом, немонотонность зависимости эквивалентного сопротивления от плотности плазмы объясняется конкуренцией двух факторов: с одной стороны, поглощение ВЧ-мощности возрастает с увеличением концентрации электронов, с другой стороны, глубина скин-слоя, определяющая ширину области поглощения ВЧ-мощности, убывает с увеличением n_e .

Теоретическая модель источника плазмы [42, 45], возбуждаемого спиральной антенной, расположенной на его верхней торцевой поверхности, предсказывает отсутствие зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от длины источника плазмы при условии, что глубина скин-слоя меньше, чем длина источника плазмы. Физически этот результат очевиден, так как поглощение ВЧ-мощности происходит в пределах скин-слоя. В условиях экспериментов глубина скин-слоя заведомо меньше длины источников плазмы, поэтому неудивительно, что эквивалентное сопротивление плазмы источников, оснащенных верхней торцевой антенной, не зависит от их длины. Напротив, в случае расположения антennы на боковой поверхности источников увеличение длины источника, сопровождающееся одновременным увеличением длины антennы, приводит к увеличению области, в которой происходит поглощение ВЧ-мощности, т.е. к удлинению скин-слоя, поэтому в случае боковой антennы эквивалентное сопротивление возрастает с увеличением длины источника (рис. 2а).

Эксперименты и расчеты показали, что при низких давлениях абсолютные значения эквивалентного сопротивления плазмы невелики. Увеличение давления рабочего газа приводит к существенному повышению эквивалентного сопротивления. Этот эффект многократно отмечался как в теоретических, так и в экспериментальных работах [40, 42, 46–48]. Физическая причина увеличения способности плазмы поглощать ВЧ-мощность при возрастании давления лежит в механизме поглощения ВЧ-мощности. Как видно из рис. 2б, при минимальном из

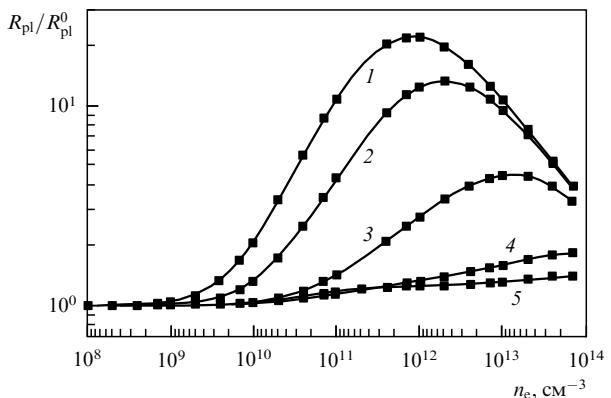


Рис. 3. Зависимость отношения эквивалентного сопротивления R_{pl} , рассчитанного с учетом столкновительного и бесстолкновительного механизмов поглощения, к эквивалентному сопротивлению R_{pl}^0 , рассчитанному только с учетом столкновений, от плотности плазмы. Расчет выполнен для плоских дискообразных источников радиусом 10 см при давлении нейтрального газа 0,3 мторр (1), 1 мторр (2), 10 мторр (3), 100 мторр (4), 300 мторр (5).

рассмотренных давлений, $p = 0,1$ мторр, преобладающим является черенковский механизм диссипации. Электрон-атомные столкновения практически не оказывают влияния на величину эквивалентного сопротивления, а электрон-ионные столкновения приводят лишь к незначительному повышению эквивалентного сопротивления при $n_e > 3 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Увеличение давления, т.е. частоты электрон-атомных столкновений, приводит к возрастанию эквивалентного сопротивления вследствие повышения роли столкновительного механизма поглощения ВЧ-мощности. Это видно из рис. 3, на котором показано отношение эквивалентного сопротивления, рассчитанного с учетом столкновительного и бесстолкновительного механизмов поглощения, к эквивалентному сопротивлению, рассчитанному только с учетом столкновений.

3.4. Индуктивный разряд с внешним магнитным полем

На рисунке 4а показаны экспериментальные зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от величины магнитного поля, полученные при фиксированной вложенной в плазму мощности [46]. В экспериментах использовались источники плазмы, оснащенные спиральными антеннами, расположеными на боковой и торцевой поверхностях источников, а также антеннами Nagoya III. Для рабочей частоты 13,56 МГц область магнитных полей $B \approx 0,4\text{--}1$ мТл соответствует условиям ЭЦР, а область $B > 1$ мТл — условиям возбуждения геликонов и волн Трайвелписа — Голда [41, 44].

При низких давлениях рабочего газа ($p \leq 5$ мторр) эквивалентное сопротивление плазмы без магнитного поля существенно меньше по величине, чем в "геликонной" области. Величины R_{pl} , полученные для области ЭЦР, занимают промежуточное положение, причем здесь эквивалентное сопротивление монотонно увеличивается с возрастанием магнитного поля. Для "геликонной" области характерна немонотонная зависимость

эквивалентного сопротивления от магнитного поля, причем немонотонность $R_{pl}(B)$ в случае торцевой спиральной антенны и антенны Nagoya III выражена значительно сильнее, чем в случае боковой спиральной антенны. Положение и количество локальных максимумов кривой $R_{pl}(B)$ зависят от вложенной ВЧ-мощности, длины и радиуса источника плазмы, рода газа и его давления.

Увеличение вкладываемой мощности, т.е. концентрации электронов n_e , приводит к возрастанию эквивалентного сопротивления и смещению основного максимума функции $R_{pl}(B)$ в область больших магнитных полей, а в ряде случаев и к появлению дополнительных локальных максимумов. Сходный эффект наблюдается и при увеличении длины источника плазмы [46].

Возрастание давления в диапазоне 2–5 мторр, как видно из рис. 4б, не приводит к существенным изменениям характера зависимости $R_{pl}(B)$, однако при давлениях, превышающих 10 мторр, немонотонность зависимости эквивалентного сопротивления от магнитного поля исчезает, абсолютные значения эквивалентного сопротивления падают и становятся меньше значений, полученных без магнитного поля.

Анализ физических механизмов поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного разряда при условиях ЭЦР и условиях возбуждения геликонов и ТГ-волн проводился во многих теоретических работах [26–29, 33–37, 41, 44–46]. Аналитическое рассмотрение задачи о возбуждении геликонов и ТГ-волн в общем случае связано со значительными трудностями, так как необходимо описать две связанные между собой волны. Напомним, что геликон — это быстрая поперечная волна, а ТГ-волна — медленная продольная. Геликоны и ТГ-волны оказываются независимыми только в случае пространственно неограниченной плазмы, в которой они представляют собой собственные моды колебаний замагниченной плазмы. В случае ограниченного цилиндрического источника плазмы задачу удается решить лишь численно. Однако основные черты физического

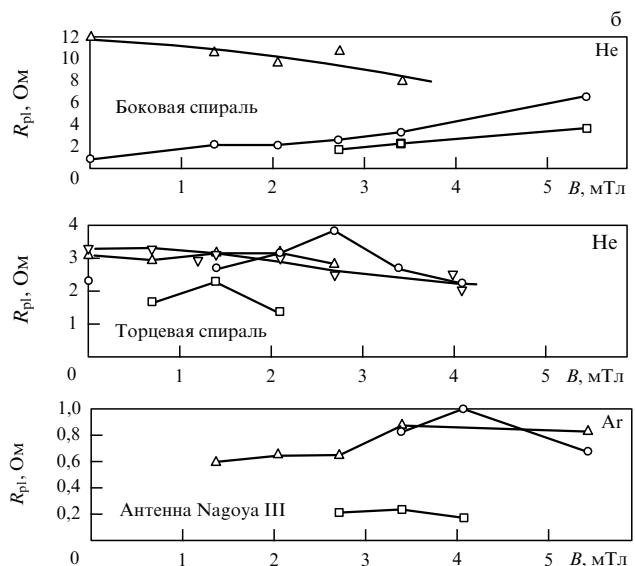
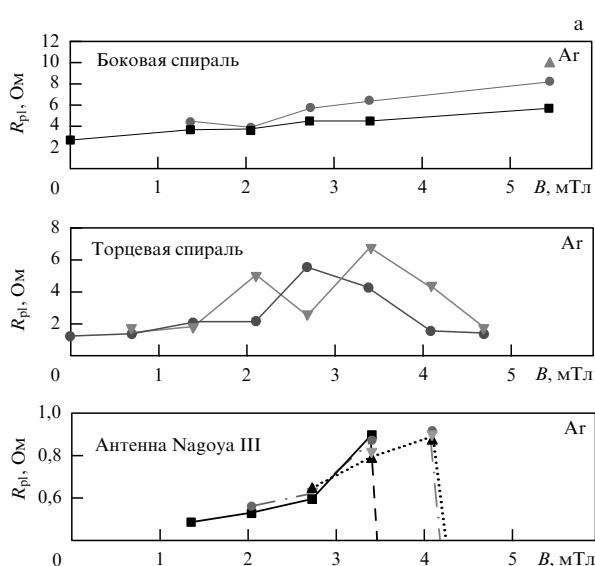


Рис. 4. Зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от внешнего магнитного поля (а) при различных мощностях, вложенных в плазму аргона при давлении 5 мторр ($R = 7,5$ см, $L = 20$ см); 100 Вт (квадраты), 150 Вт (кружки), 200 и 250 Вт (треугольники с вершиной вверх и вниз соответственно), (прерывистыми линиями отмечен срыв разряда), и (б) при различных давлениях инертного газа ($R = 7,5$ см $L = 20$ см, $P_{pl} = 250$ Вт): 2 мторр (квадраты), 5 мторр (кружки), 10 и 100 мторр (треугольники с вершиной вверх и вниз соответственно).

механизма поглощения ВЧ-мощности при $B > 1$ мТл можно проиллюстрировать с помощью развитого в [44, 45] геликонного приближения, описывающего процесс возбуждения волн в плазме при условии выполнения неравенств

$$\frac{c^2 k^2}{\omega_{\text{Le}}^2} \ll 1, \quad \frac{\omega}{\Omega_e} < \frac{\omega^2}{c^2 k_z^2} \varepsilon_{\perp} \approx \frac{\omega_{\text{Le}}^2 \omega^2}{\Omega_e^2 c^2 k_z^2} \ll 1. \quad (11)$$

Здесь ω — частота поля, $k_z \sim 1/L$ и $k_{\perp} \sim 1/R$ — продольная и поперечная компоненты волнового вектора, Ω_e и ω_{Le} — циклотронная и ленгмюровская частоты, $k^2 = k_z^2 + k_{\perp}^2$, $k_z = \pi n/L$, $k_{\perp} = \mu_n/R$, $n = 1, 2, 3, \dots, \mu_n$ — корни функции Бесселя.

В геликонном приближении, т.е. в пределе достаточно плотной плазмы, удается расщепить систему уравнений Maxwella для ВЧ-полей, возбуждаемых в плазме азимутальным током амплитуды I_0 , текущим по антenne, расположенной на боковой поверхности источника плазмы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r E_{\phi} - \alpha^2 E_{\phi} - \beta \frac{\omega}{c} \frac{\partial}{\partial r} E_z = 0, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} E_z - \tilde{k}_z^2 \frac{\varepsilon_{||}}{\varepsilon_{\perp}} E_z = k_z \frac{g}{\varepsilon_{\perp}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r E_{\phi}, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\tilde{k}_z^2 = k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{\perp}, \quad \alpha^2 = \tilde{k}_z^2 - \frac{\omega^4 g^2}{c^4 \tilde{k}_z^2}, \quad \beta = \frac{\omega}{c} g \frac{k_z}{\tilde{k}_z^2}.$$

Границные условия имеют вид

$$E_{\phi}(z)|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial E_{\phi}}{\partial z}(z) \right|_{z=0} = 4\pi i \frac{\omega}{c^2 R} q I_0. \quad (13)$$

Действительно, при выполнении неравенств (11) в левой части первого из уравнений (12) последним членом, содержащим продольную компоненту электрического поля, можно пренебречь, тогда первое уравнение совместно с граничным условием дает возможность рассчитать азимутальное электрическое поле геликона. Опуская математические выкладки, приведенные в работах [44, 45], рассмотрим дисперсионное соотношение для геликонов:

$$k_1 J'_1(k_1 R) K_1(k_1 R) - k_z J_1(k_1 R) K'_1(k_z R) = 0, \quad (14)$$

здесь J и K — функции Бесселя и Макдональда.

Для характерных размеров источника плазмы $L \geq 10$ см, $R \leq 5$ см решение уравнения (14) с хорошей степенью точности выражается в виде

$$k_1^2 R^2 \approx \pi^2 \left(n + \frac{1}{2} \right)^2, \quad \text{где } n = 1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

Таким образом, возбуждение геликонов в плазме носит резонансный характер, а резонансные значения магнитного поля (или плотности плазмы) могут быть найдены из соотношения

$$\frac{\omega^2 \omega_{\text{Le}}^2 R^2}{\Omega_e^2 c^2 k_z^2} \approx \frac{\pi^2 R^2}{L^2} + \pi^2 \left(n + \frac{1}{2} \right)^2. \quad (16)$$

При возбуждении объемных геликонных волн в удлиненном источнике плазмы поля E_{ϕ}^h и E_r^h в резонансе становятся достаточно большими вследствие слабой диссипации энергии геликонного поля в плазме. Это, в свою очередь, приводит к тому, что геликонное поле, в частности поле E_{ϕ}^h , становится источником возбуждения в плазме потенциального поля ТГ-волны. Заметим, что второе уравнение системы (12) по сути является дифференциальным уравнением колебаний с вынуждающей силой. В работе [45] отмечается, что наряду с геликонным резонансом, описываемым дисперсионным соотношением (14), в принципе возможен и резонанс ТГ-волны. Однако при условиях (11), т.е. в рамках геликонного приближения, резонанс ТГ-волны оказывается невозможным [45].

Полные поля в плазме являются суммой геликонного и потенциального полей ТГ-волны:

$$E_z = E_z^L, \quad E_r = E_r^h + E_r^L \approx E_r^h, \quad E_{\phi} = E_{\phi}^h. \quad (17)$$

При подстановке выражений для полей в уравнение для мощности, поглощенной плазмой, в [45] получено, что геликонная волна в рассматриваемых условиях очень слабо поглощается в плазме (из-за малости $\text{Im } g$), а поле ТГ-волны, напротив, достаточно сильно диссирирует и нагревает плазму.

Таким образом, из использованного приближения следует, что антenna с азимутальным током j_{ϕ} в плотной плазме резонансно возбуждает геликонное поле, которое слабо поглощается плазмой. Геликонное поле при учете слабой связи с ТГ-волной становится источником возбуждения в замагниченной плазме потенциальной ТГ-волны, которая сильно поглощается плазмой.

Численные расчеты, выполненные в общем случае в рамках гидродинамической модели индуктивного ВЧ-источника плазмы низкого давления, подтвердили сделанные выше выводы [41, 45] о механизме поглощения ВЧ-мощности плазмой. На рисунке 5а представлены типичные зависимости R_{pl} от величины магнитного поля в геликонной области, рассчитанные при давлении аргона 1 мторр и различных значениях концентрации плазмы. Как видно, функции R_{pl} имеют серию локальных максимумов, соответствующих условиям резонансного возбуждения геликонов и ТГ-волн. Математическое моделирование дает возможность проанализировать по отдельности вклад геликонов и ТГ-волн в поглощение ВЧ-мощности плазмой. На рисунке 5б, в приведены результаты расчетов эквивалентного сопротивления, выполненных на основе только ВЧ-полей геликона и только полей волны ТГ. Как видно из рис. 5б, в, при концентрациях электронов 10^{11} см^{-3} и меньших основной вклад в поглощение вносит ТГ-волна. Поскольку ТГ-волне является квазипродольной волной, ее поглощение определяется главным образом бесстолкновительным черенковским механизмом. С возрастанием концентрации электронов (рис. 5б, в) вклад геликонов в поглощение в области магнитных полей, не превышающих 200 Гс, сравним со вкладом ТГ-волны. В области более высоких магнитных полей поглощение ТГ-волне доминирует всюду кроме узких областей, в которых амплитуда ТГ-волне имеет локальные минимумы.

Характер изменения эквивалентного сопротивления с увеличением магнитного поля при плотности плазмы 10^{11} см^{-3} существенно отличается от полученного при

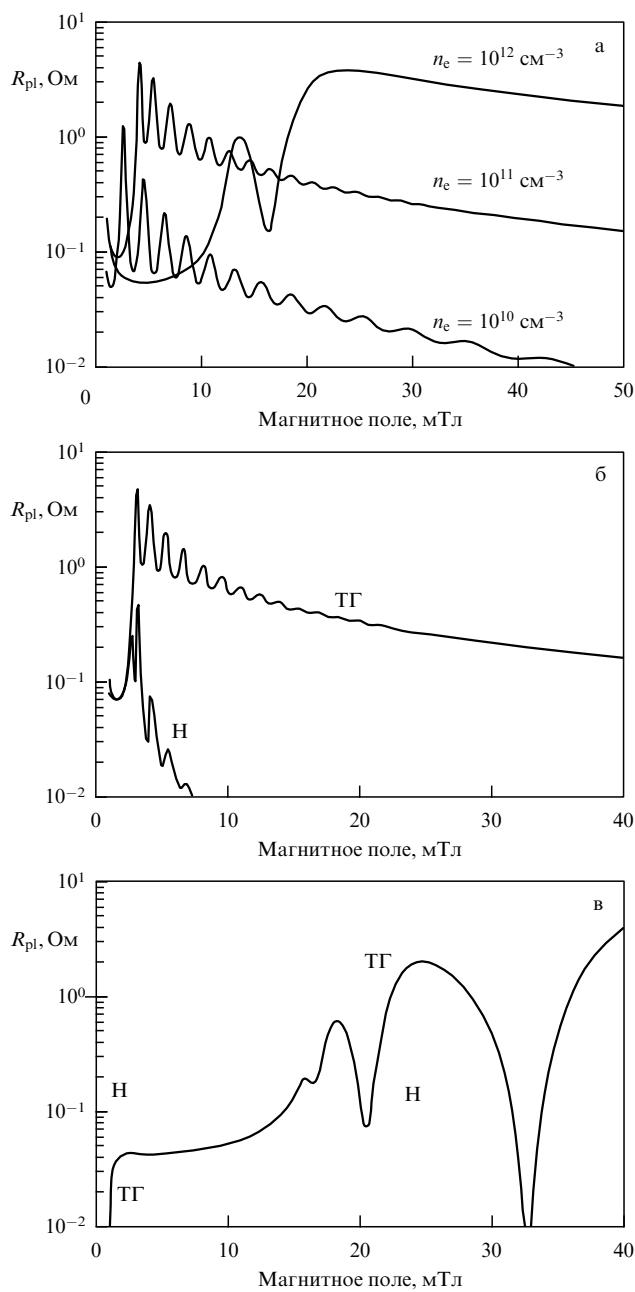


Рис. 5. Зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от магнитного поля, рассчитанные при (а) концентрациях электронов 10^{10} , 10^{11} и 10^{12} см^{-3} для источника плазмы с $R = 5 \text{ см}$, $L = 20 \text{ см}$. (б, в) $n_e = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, (в) $n_e = 3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($p = 1 \text{ мторр}$) для источника плазмы с $R = 5 \text{ см}$, $L = 15 \text{ см}$ при учете только ТГ-волны (TG) и при учете только геликона (H).

$n_e = 3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Это связано с влиянием электрон-ионных столкновений. В целом, увеличение частоты столкновений, вызванное повышением давления газа или увеличением электрон-ионных столкновений с возрастанием плотности плазмы, приводит к сглаживанию зависимости амплитуд полей от магнитного поля. Кроме того, с возрастанием частоты столкновений амплитуда ТГ-волны уменьшается и волна из объемной превращается в поверхностную [41]. В связи с этим эквивалентное сопротивление плазмы понижается. Отметим, что амплитуда и проникновение геликона в плазму с возрастанием давления не изменяются.

Из рисунка 5а видно, что основной максимум зависимости эквивалентного сопротивления от магнитного поля при увеличении плотности плазмы (вложенной в плазму мощности) смещается в область больших магнитных полей. Это означает, что зависимость R_{pl} от концентрации электронов при фиксированном значении B_0 является убывающей в области высоких концентраций электронов. Этот результат физически очевиден, так как при выходе из резонанса с увеличением концентрации плазмы амплитуды полей уменьшаются и их проникновение в плазму резко ухудшается. Чем больше индукция магнитного поля, тем больше значение критической плотности плазмы, при превышении которой происходит падение эквивалентного сопротивления плазмы.

В заключение раздела перечислим основные закономерности изменения эквивалентного сопротивления плазмы:

1) R_{pl} немонотонно зависит от плотности плазмы; в области низких концентраций электронов R_{pl} возрастает с увеличением n_e , в области высоких концентраций электронов способность плазмы поглощать мощность понижается вследствие ухудшения проникновения ВЧ-полей в плазму;

2) при отсутствии магнитного поля существенную роль в поглощении ВЧ-мощности играет столкновительный механизм, поэтому повышение давления и концентрации электронов приводит к увеличению R_{pl} ;

3) в геликонной области характер изменения R_{pl} при изменении магнитного поля в случае низких давлений носит сильно немонотонный резонансный характер;

4) при наличии магнитного поля в областях резонансного поглощения ВЧ-мощности существенную роль играет бесстолкновительный черенковский механизм, поэтому возрастание давления приводит к уменьшению R_{pl} .

4. Особенности индуктивного высокочастотного разряда низкого давления, горящего в режиме $R_{\text{pl}} \leq R_{\text{ant}}$

Результаты, представленные в разделе 3 показывают, что эквивалентное сопротивление плазмы существенно изменяется при изменении плотности плазмы и условий поддержания разряда, в частности при изменении давления и внешнего магнитного поля. Это должно приводить к появлению особенностей (не всегда желательных) поведения индуктивного ВЧ-разряда в источниках плазмы, работающих в режиме $R_{\text{pl}} \leq R_{\text{ant}}$. Ниже рассмотрены результаты экспериментов, поставленных с целью выявления таких особенностей [46], а также результаты численного моделирования разряда, проясняющие физику наблюдаемых эффектов. Самосогласованная модель индуктивного ВЧ-источника изложена в работах [41, 46]. Результаты, приведенные ниже, получены в приближении линейной зависимости концентрации электронов от вложенной мощности [41, 46]:

$$n_e = \alpha P_{\text{pl}} . \quad (18)$$

Рассмотрение начнем с зависимости параметров плазмы от мощности ВЧ-генератора.

4.1. Зависимость параметров плазмы от мощности высокочастотного генератора

На рисунке 6а показаны типичные зависимости интенсивности свечения плазмы от мощности ВЧ-генератора.

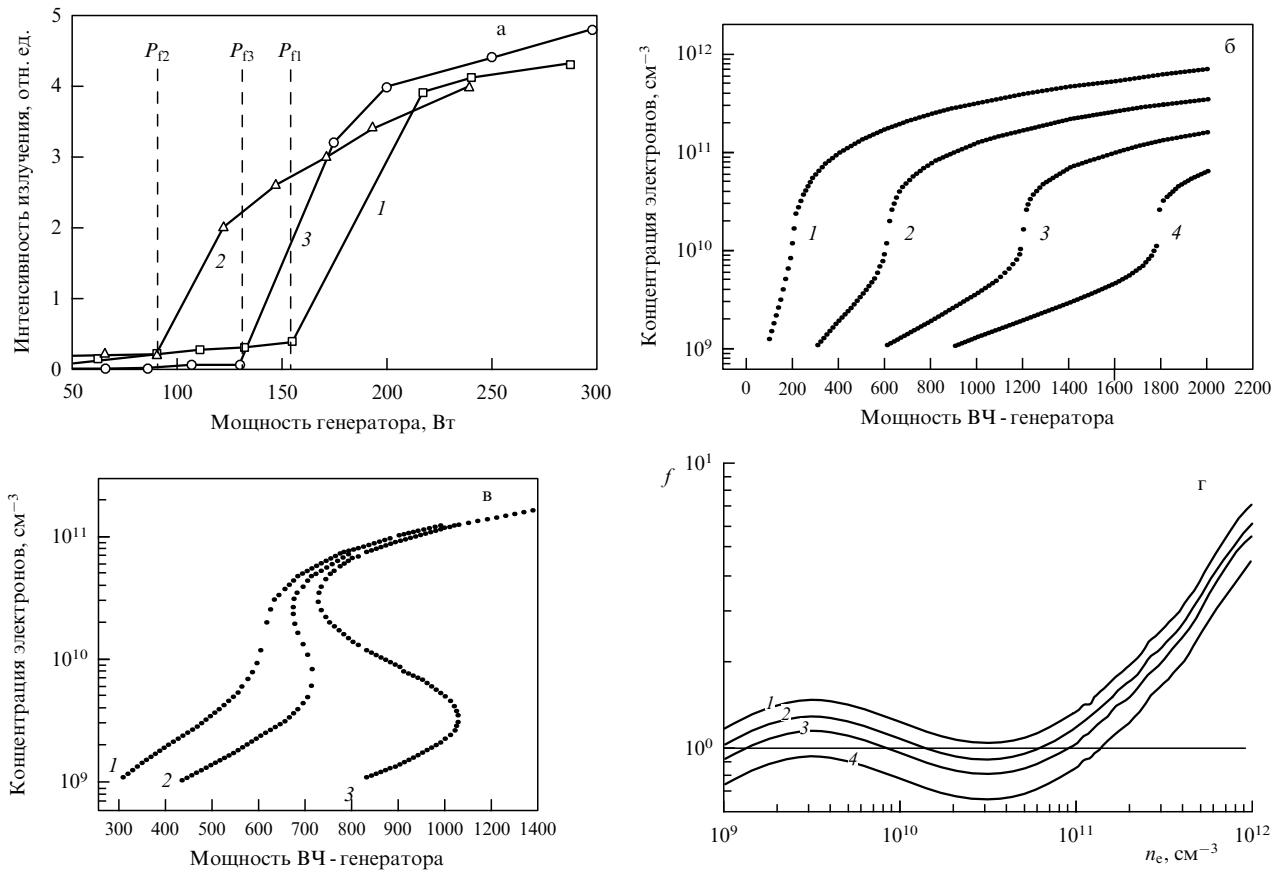


Рис. 6. (а) Зависимость интенсивности свечения плазмы от мощности ВЧ-генератора с торцевой спиральной антенной: 1 — чисто индуктивный разряд, 2 — независимый емкостной канал, мощность ВЧ-генератора, питающего емкостной канал, 100 Вт, 3 — гибридный разряд; P_{f1} , P_{f2} — пороговые мощности, при которых индуктивный разряд при увеличении мощности генератора переходит из моды с низкой интенсивностью свечения в моду с высокой интенсивностью. (б, в) Зависимость концентрации электронов от мощности ВЧ-генератора в индуктивном разряде в источнике плазмы радиусом 5 см без магнитного поля. Решение самосогласованной задачи (б) для различных сопротивлений антенн: 0,3 Ом (1), 1 Ом (2), 2 Ом (3), 3 Ом (4) при давлении 0,3 мтторр, и (в) для различных давлений нейтрального газа: 0,3 мтторр (1), 0,2 мтторр (2), 0,1 мтторр (3), при сопротивлении антennы 0,5 Ом. (г) Графическое решение уравнения (19) при значениях мощности ВЧ-генератора: 700 Вт (кривая 1), 800 Вт (кривая 2), 900 Вт (кривая 3) и 1100 Вт (кривая 4).

Ход кривой в соответствии с современными представлениями [38, 49–50] интерпретируется следующим образом: разряд поджигается и горит при малых мощностях в емкостной моде, затем при увеличении мощности генератора, после достижения некоторого критического тока через антенну [38] появляются условия для перехода разряда в индуктивную моду. При этом концентрация электронов, а следовательно, и интенсивность свечения плазмы резко возрастают. Далее разряд горит в индуктивной моде с высокой концентрацией электронов.

Результаты моделирования (рис. 6б, в) позволяют существенно уточнить физику процессов. Решения системы уравнений, соответствующие возможным режимам разряда, существуют при мощности генератора, превышающей некоторую пороговую величину P_{\min} , которая зависит как от условий поддержания разряда, так и от сопротивления антennы. При низком сопротивлении антennы сразу после превышения пороговой мощности разряд резко переходит в режим моды с высокой концентрацией электронов (далее — высокая мода). Однако по мере увеличения сопротивления антennы появляются решения, указывающие на возможность существования разряда в моде с низкой концентрацией электронов (далее — низкая мода). При горении разряда

в низкой моде основная часть мощности генератора теряется в антенну, а вкладываемая в разряд мощность обеспечивает поддержание лишь невысокой концентрации электронов, близкой по величине к существующей в емкостном ВЧ-разряде. Увеличение мощности ВЧ-генератора приводит к возрастанию плотности плазмы и соответственно эквивалентного сопротивления плазмы. Когда вклад мощности в разряд становится значимым, возникает "цепная реакция": возрастание эквивалентного сопротивления плазмы, а следовательно, P_{pl} , приводит к повышению n_e , которое, в свою очередь, ведет к увеличению R_{pl} и P_{pl} . Эти процессы обусловливают резкий, скачкообразный переход разряда из низкой моды в высокую. Концентрация электронов в высокой моде разряда достаточно велика — порядка 10^{11} cm^{-3} . В разделе 3 показано, что в области относительно высоких концентраций электронов — порядка 10^{11} cm^{-3} , наблюдается насыщение зависимости эквивалентного сопротивления от плотности плазмы. В связи с этим в высокой моде разряда возрастание плотности плазмы с увеличением мощности генератора замедляется, а в ряде случаев происходит насыщение плотности плазмы. Это ограничивает возможности управления параметрами разряда в моде с высокой концентрацией электронов.

Хорошо известно, что в ряде случаев в области перехода из низкой моды разряда в высокую появляется гистерезис зависимости параметров плазмы от мощности ВЧ-генератора. Результаты численного моделирования показали [41, 46] (рис. 6в), что в ряде случаев в области перехода между модами индуктивного разряда появляется неоднозначность решений, которая может являться причиной гистерезиса, наблюдаемого экспериментально. Для анализа условий появления многозначности решений выполним простые алгебраические преобразования и сведем систему уравнений (1), (2), (18) к одному уравнению:

$$1 = \frac{\alpha n_e (1 + R_{\text{ant}}/P_{\text{pl}})}{P_{\text{gen}}} \equiv f(n_e). \quad (19)$$

Очевидно, что при $R_{\text{pl}} \gg R_{\text{ant}}$ вся мощность генератора вкладывается в плазму и концентрация электронов изменяется пропорционально мощности ВЧ-генератора. Отметим, что при этом связь между n_e и P_{gen} является однозначной. В противоположном случае $R_{\text{pl}} < R_{\text{ant}}$ также возможно появление решений, причем их может быть несколько, если зависимость R_{pl} от концентрации электронов является немонотонной в области $R_{\text{pl}} < R_{\text{ant}}$.

На рисунке 6г показана функция $f(n_e)$, рассчитанная для случая индуктивного разряда низкого давления в отсутствие магнитного поля. Как видно из рис. 6г, при мощности ВЧ-генератора 700 Вт $f(n_e) > 1$ во всем рассмотренном диапазоне электронных плотностей. Это означает, что решений не существует и ВЧ-индуктивный разряд при рассмотренной мощности генератора возникнуть не может. При мощностях ВЧ-генератора 800–900 Вт возможно существование индуктивного ВЧ-разряда, однако эквивалентное сопротивление плазмы, соответствующее максимально возможной концентрации электронов, мало по сравнению с сопротивлением антенны и немонотонно зависит от концентрации электронов. Это является причиной немонотонности зависимости $f(n_e)$ от n_e и появления двух или трех решений системы уравнений, описывающей разряд, при мощностях ВЧ-генератора 800–900 Вт. Дальнейшее увеличение мощности приводит к исчезновению многозначности и появлению единственного значения плотности плазмы, удовлетворяющего системе уравнений (1), (2), (18).

Рассмотрим влияние внешнего магнитного поля на зависимость плотности плазмы от магнитного поля и гистерезис. На рисунке 7 показаны измеренные зависимости интенсивности свечения плазмы J от мощности ВЧ-генератора P_{gen} при фиксированных значениях магнитного поля. Типичные зависимости $J(P_{\text{gen}})$ при магнитных полях, меньших 1 мТл, схожи с зависимостями, полученными в отсутствие магнитного поля. Разряд зажигается в низкой моде, и по мере возрастания мощности ВЧ-генератора происходит скачкообразный переход разряда в высокую моду. При уменьшении мощности ВЧ-генератора скачок из высокой моды в низкую происходит при значении $P_{\text{gen}} = P_b$, равном значению $P_{\text{gen}} = P_f$, при котором происходит скачок из низкой моды в высокую при изменении мощности ВЧ-генератора P_f . Ситуация меняется при возрастании магнитного поля в области его значений выше 1 мТл. Здесь появляется гистерезис, и P_b оказываются меньше P_f , причем разница между P_b и P_f возрастает с увеличе-

нием магнитного поля. Обращает на себя внимание также тот факт, что с возрастанием магнитного поля область перехода смещается в область больших мощностей. Так, при магнитных полях, превышающих 1,4 мТл, максимальная использованная в работе мощность ВЧ-генератора $P_{\text{gen}} = 300$ Вт оказывается недостаточной для перехода разряда из низкой моды в высокую.

Качественно схожие закономерности наблюдаются и при численном моделировании индуктивного ВЧ-разряда во внешнем магнитном поле [41]. Как и в случае разряда без магнитного поля, индуктивный разряд возможен лишь при мощностях, превышающих пороговую величину P_{min} , причем расчеты показывают, что в дополнение к уже перечисленным выше факторам, влияющим на значение P_{min} , появляется зависимость также от величины магнитного поля B . Как видно из рис. 8, при небольших магнитных полях, $B \leq 2$ мТл, сразу после появления условий существования решений системы уравнений разряда возрастание мощности ВЧ-генератора приводит к резкому повышению концентрации электронов (переходу в высокую моду), причем имеется однозначное соответствие между плотностью плазмы и мощностью ВЧ-генератора. При увеличении магнитного поля картина несколько видоизменяется. В области резкого возрастания концентрации плазмы появляется второе решение, соответствующее низкой моде разряда. Увеличение внешнего магнитного поля приводит к появлению многозначности решений и расширению интервала мощностей ВЧ-генератора, в котором возможно существование нескольких мод разряда. Причина появления многозначности решений состоит в немонотонности (осциллирующем характере) зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от концентрации электронов, что является следствием резонансного характера возбуждения геликонов и ТГ-волн в разряде (см. [46]).

Таким образом, решения самосогласованной задачи для разряда показали, что характерный вид зависимости плотности плазмы от мощности ВЧ-генератора обусловлен самосогласованным перераспределением мощности между антенной и плазмой [41, 46]. Индуктивный ВЧ-разряд может существовать в двух модах: с низкой и высокой концентрацией электронов. В низкой моде подавляющая часть мощности ВЧ-генератора теряется в антенну, в высокой моде значимая часть мощности P_{gen} выделяется в плазме. В высокой моде разряда наблюдается замедление повышения плотности плазмы в связи с насыщением зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от n_e при концентрациях порядка 10^{11} см^{-3} . В переходной области между модами происходит скачкообразное возрастание плотности плазмы и возможно появление гистерезиса. Гистерезис возникает в случае, когда эквивалентное сопротивление плазмы, во-первых, является малым по сравнению с сопротивлением антенны, а во-вторых, немонотонно зависит от плотности плазмы.

4.2. Зависимость параметров плазмы от внешнего магнитного поля

Эксперименты, представленные в этом разделе, были выполнены с торцевой спиральной антенной, эффективное сопротивление которой составляло 3,6 Ом [46], что позволяло реализовать режим $R_{\text{pl}} \leq R_{\text{ant}}$ в широком диапазоне магнитных полей и мощностей ВЧ-генератора.

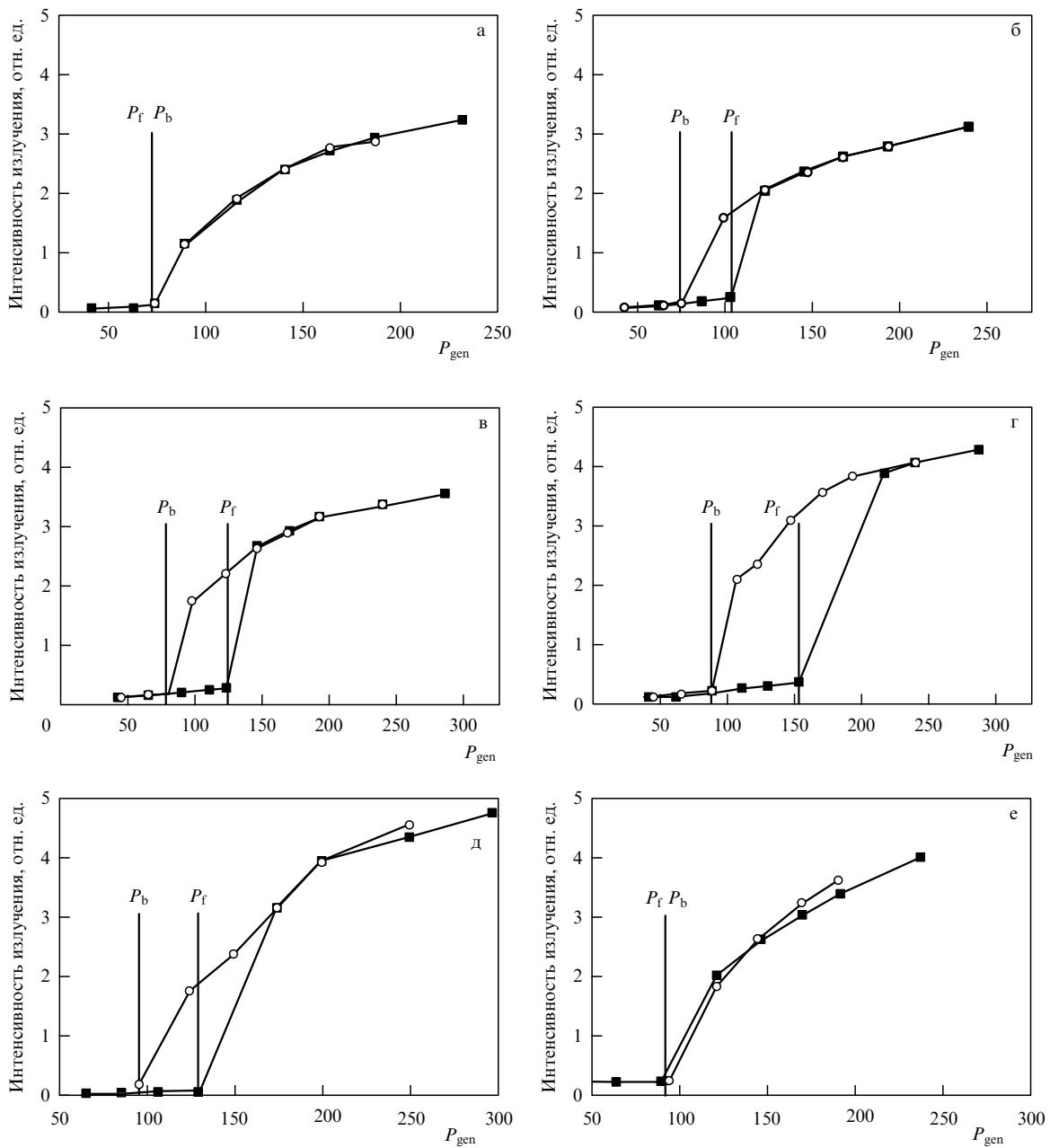


Рис. 7. Зависимости интенсивности свечения плазмы от мощности ВЧ-генератора, питающего антенну, при увеличении (квадраты) и уменьшении (кружки) мощности при магнитных полях (а) 1 мТл, (б) 1,2 мТл, (в) 1,3 мТл, (г-е) 1,4 мТл. (а-г) Индуктивный разряд, (д) гибридный разряд, (е) разряд с независимыми индуктивным и емкостным каналами; мощность ВЧ-генератора, питающего емкостной канал 100 Вт. Давление аргона 2 мторр.

На рисунке 9а, б показаны зависимости изменения концентрации и эффективной температуры электронов в центре источника плазмы при изменении величины магнитного поля. Согласование нагрузки с ВЧ-генератором осуществлялось при каждом из рассмотренных значений магнитного поля, так что величина ВЧ-мощности, отдаваемой генератором во внешнюю цепь, являлась постоянной. Как видно, при отсутствии магнитного поля концентрация электронов мала. Увеличение магнитного поля B приводит к резкому возрастанию плотности плазмы, затем при превышении магнитным полем некоторого значения B_{\max} концентрация электронов уменьшается и при достижении магнитным полем критического значения B_{cr} следует срыв разряда. Одно-

временно с изменением абсолютной величины плотности плазмы происходит и ее пространственное перераспределение (рис. 9в, г). Увеличение магнитного поля сначала приводит к общему повышению концентрации электронов, особенно в центральных областях разряда, затем перед срывом разряда концентрация плазмы во всем сечении снижается и наиболее значимыми становятся периферийные области разряда. Несмотря на существенное изменение концентрации электронов, эффективная температура электронов слабо зависит от магнитного поля и мощности ВЧ-генератора. Увеличение мощности ВЧ-генератора и давления рабочего газа приводят к смещению срывов разряда в область больших магнитных полей, т.е. к увеличению B_{cr} . В ряде

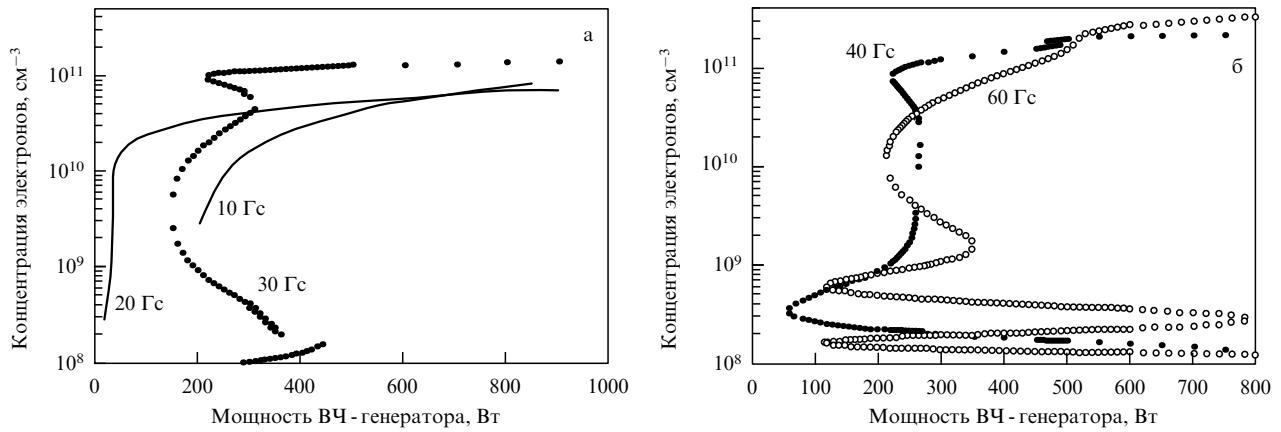


Рис. 8. Зависимость концентрации электронов от мощности ВЧ-генератора при различных значениях магнитного поля.

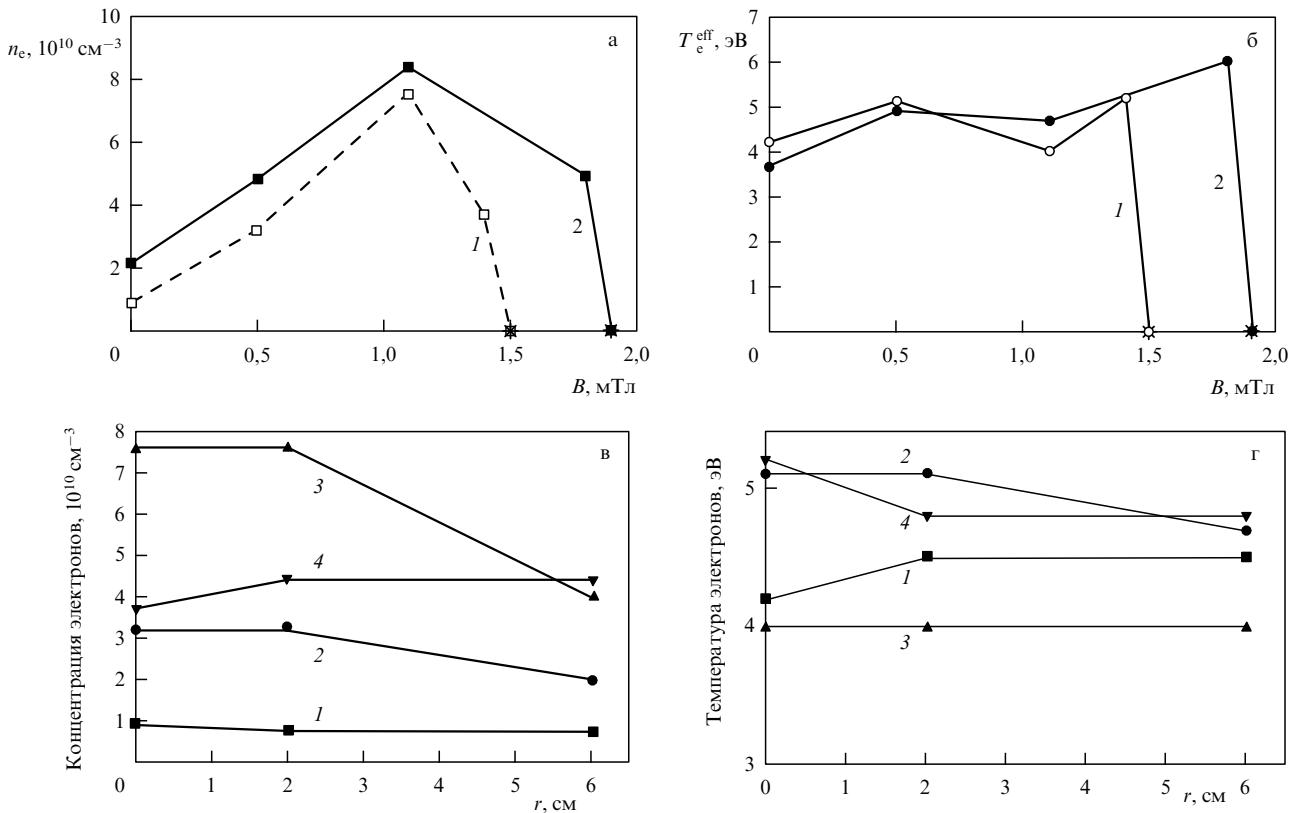


Рис. 9. Зависимости концентрации n_e (а) и эффективной температуры электронов $T_{\text{eff}}^{\text{eff}}$ (б) от величины внешнего магнитного поля B при мощностях ВЧ-генератора 150 Вт (1) и 200 Вт (2); давление аргона 2 мторр, разряд с торцевой антенной. Зависимости n_e и $T_{\text{eff}}^{\text{eff}}$ (г) от расстояния r до оси источника при $B = 0$ (1), 0,5 мТл (2), 1,1 мТл (3), 1,4 мТл (4); разряд зажигался в источнике плазмы радиусом 7,5 см и длиной 15 см; мощность ВЧ-генератора 150 Вт; давление аргона 4 мторр.

случаев увеличение мощности ВЧ-генератора приводит к появлению второго, а иногда и третьего локального максимума плотности плазмы в области меньших магнитных полей. Область существования всех максимумов резко ограничена со стороны больших магнитных полей.

Естественно предположить, что причиной немонотонного изменения концентрации плазмы при изменении магнитного поля является перераспределение мощности между антенной и плазмой в соответствии с формулами (1) и (2). В связи с этим были определены значения ВЧ-мощности, поглощенной плазмой, при

различных величинах магнитных полей [46] в экспериментах с чисто индуктивным разрядом на основе измерений тока I_{ant} , текущего через антенну, при увеличении внешнего магнитного поля. Измерения показали, что поджиг разряда приводит к небольшому уменьшению тока, текущего через антенну, а дальнейшее увеличение магнитного поля — к увеличению разницы между токами, текущими через антенну при разряде и в его отсутствие. Это свидетельствует о возрастании доли мощности ВЧ-генератора, поглощенной плазмой. Увеличение магнитного поля при $B > B_{\max}$ приводит к возрастанию тока через антенну. После срыва разряда

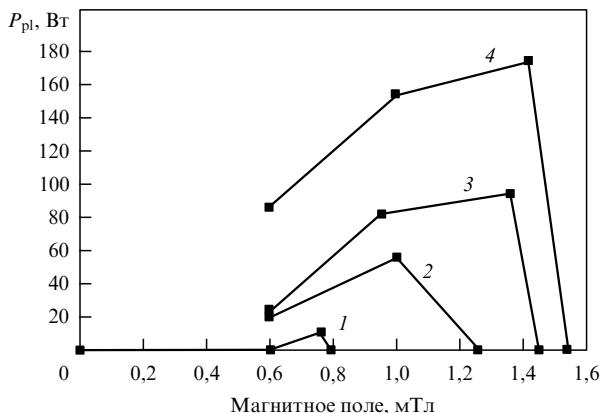


Рис. 10. Зависимости мощности, вложенной в плазму, от магнитного поля при мощности ВЧ-генератора: 1 — 100 Вт, 2 — 150 Вт, 3 — 200 Вт, 4 — 300 Вт. Давление аргона 2 мторр. Разряд с торцевой антенной.

ток через antennу возвращается к значениям, имевшим место до поджига разряда.

На рисунке 10 показаны значения ВЧ-мощности P_{pl} , поглощенной плазмой, рассчитанные на основе измеренных I_{ant} . Как видно, при увеличении магнитного поля вплоть до значения B_{max} мощность P_{pl} возрастает, затем при $B > B_{max}$ начинает уменьшаться до тех пор, пока не достигнет величин, недостаточных для поддержания разряда. Здесь происходит срыв разряда.

Изменение мощности, поглощенной плазмой при увеличении магнитного поля, естественно сопоставить с динамикой изменения концентрации электронов. Как отмечалось выше, при увеличении магнитного поля происходит перераспределение параметров плазмы по объему источника. В этом случае в работе [46] для анализа использовались средние по сечению значения концентрации электронов N_e .

На рисунке 11 приведены экспериментальные данные [46], представленные в виде зависимости $N_e/(P_{pl} p)$ от мощности, поглощенной плазмой, где p — давление аргона в разрядной камере. Можно видеть, что когда в плазму вкладывается мощность, превышающая 40 Вт, все точки в пределах погрешности эксперимента ложатся на прямую, параллельную оси абсцисс. Это означает, что средняя по объему концентрация электронов в плазме

индуктивного ВЧ-разряда пропорциональна вложенной в плазму мощности, а особенности изменения плотности плазмы с изменением магнитного поля связаны с перераспределением мощности ВЧ-генератора между активным эффективным сопротивлением антенны и эквивалентным сопротивлением плазмы. Увеличение отношения $N_e/(P_{pl} p)$ в области малых ($P_{pl} < 40$ Вт) мощностей, вложенных в плазму, связано, по-видимому, с наличием емкостной компоненты разряда.

Для уточнения физической картины явлений, описанных выше, рассмотрим результаты математического моделирования [41, 46]. На рисунке 12а — в изображены зависимости концентрации электронов, тока через antennу и эффективности вложения мощности в плазму от величины магнитного поля B при фиксированной мощности ВЧ-генератора. Так же как и в эксперименте, с возрастанием магнитного поля ток через antennу сначала уменьшается, затем при $B > B_{max}$ начинает возрастать и наконец возвращается к значениям, которые имел в отсутствие разряда. Вложенная в плазму мощность и концентрация электронов возрастают при увеличении магнитного поля вплоть до значения $B = B_{max}$, а затем уменьшаются. При значениях магнитного поля $B > B_{cr}$ система уравнений, описывающая разряд, не имеет решений. Физически это означает невозможность существования разряда. Причиной отсутствия решения при больших значениях магнитного поля является существенное падение эквивалентного сопротивления плазмы вследствие ухудшения проникновения ВЧ-полей в плазму и понижение доли мощности, поглощаемой плазмой, до величин, недостаточных для поддержания разряда. Повышение мощности ВЧ-генератора, сопровождающееся возрастанием плотности плазмы и эквивалентного сопротивления, так же как и повышение давления, в ряде случаев приводящее к увеличению эквивалентного сопротивления в области больших магнитных полей, сопровождается смещением правой границы существования решения в область больших B [46].

Увеличение сопротивления antennы (рис. 12г) приводит к расширению диапазона величин магнитного поля, в котором $R_{pl} \leq R_{ant}$. Заметим, что при этом для зависимости плотности плазмы от магнитного поля характерно наличие локальных максимумов, величина которых убывает в области больших магнитных полей. В разделе 3 показано, что для зависимости R_{pl} от B в случае источников плазмы с относительно большими радиусом и длиной характерно наличие нескольких локальных максимумов, связанных с положениями резонансов возбуждения геликонов и волн ТГ. Выход из области резонанса сопровождается резким падением эквивалентного сопротивления, доли мощности, поглощенной плазмой, и соответственно плотности плазмы. Падение плотности плазмы, в свою очередь, вызывает уменьшение эквивалентного сопротивления и вложенной в плазму мощности. При этом в области резкого уменьшения R_{pl} происходит скачкообразное падение плотности плазмы при увеличении магнитного поля. Сравнение рис. 12г с результатами экспериментов позволяет сделать вывод, что наблюдавшиеся в эксперименте резкие скачки плотности плазмы связаны с наличием резонансов возбуждения геликонов и ТГ-волн, проявляющихся в резком изменении способности плазмы поглощать ВЧ-мощность.

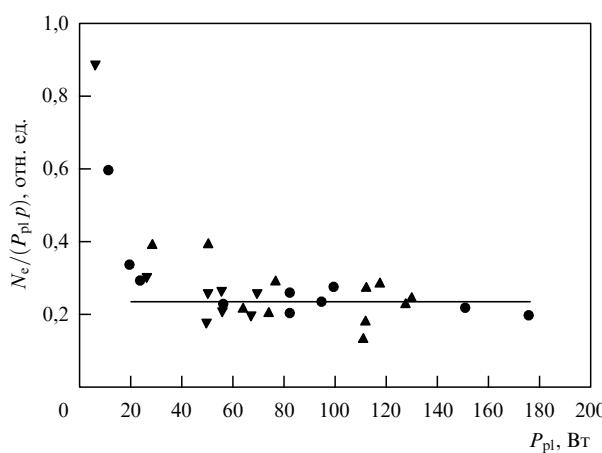


Рис. 11. Зависимость $N_e/(P_{pl} p)$ от мощности, поглощенной плазмой.

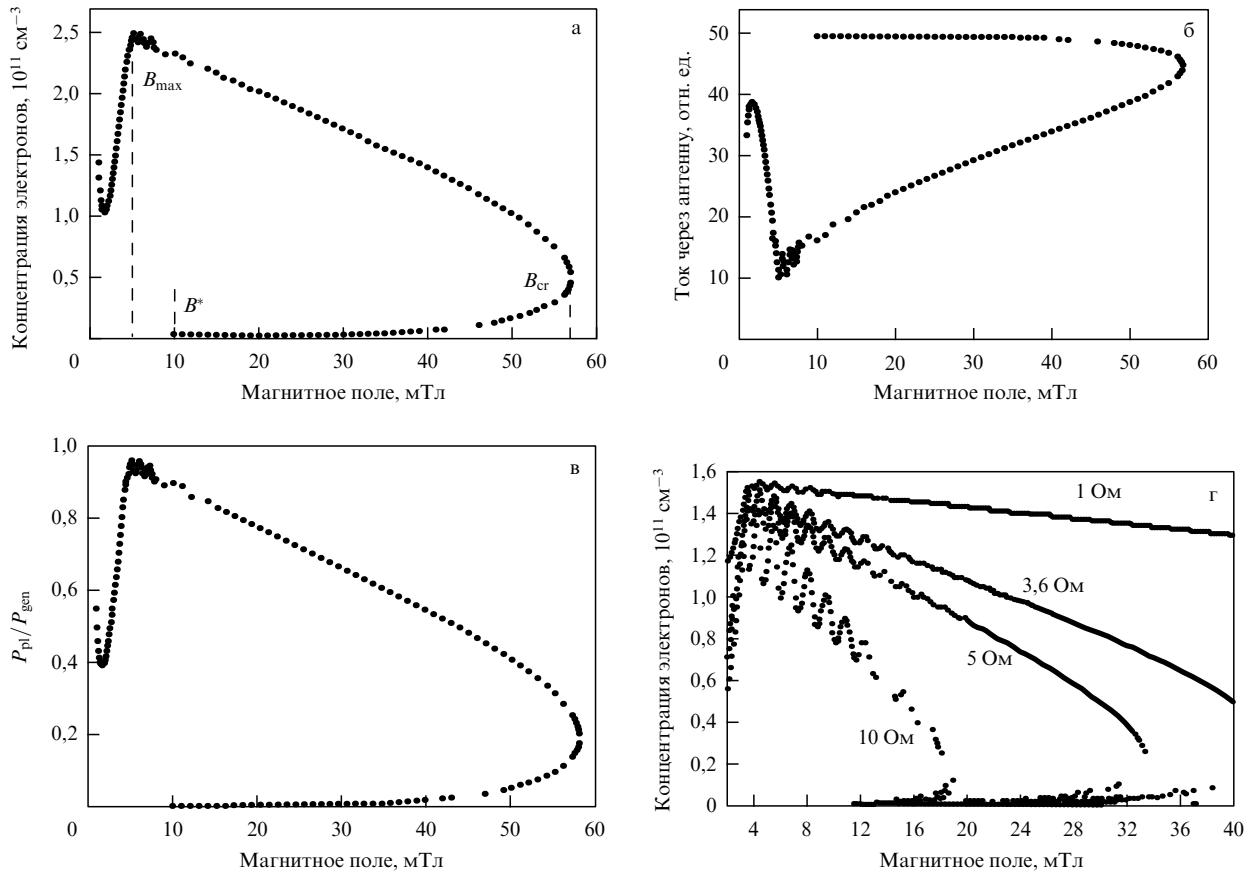


Рис. 12. (а–в) Зависимости концентрации электронов тока через антенну и эффективности вложения ВЧ-мощности в плазму P_{pl}/P_{gen} от величины магнитного поля; мощность генератора 500 Вт, сопротивление антенны 0,2 Ом, радиус источника плазмы 5 см, длина 15 см. (г) Зависимость концентрации электронов от магнитного поля при различных сопротивлениях антennы.

В целом, сравнение результатов расчета и экспериментов позволяет сделать вывод, что закономерности изменения плотности плазмы индуктивного ВЧ-разряда при изменении внешнего магнитного поля определяются самосогласованным перераспределением ВЧ-мощности между плазмой и внешней цепью, закономерности которого напрямую связаны с физическими механизмами проникновения полей в плазму и поглощения ВЧ-мощности.

Представленные выше экспериментальные результаты были получены в [46] при фиксированной мощности генератора при условии, что магнитное поле увеличивалось от нуля до значений B_{fin} , превышающих значения поля B , при которых наблюдается срыв разряда. В ряде случаев, когда магнитное поле сначала увеличивалось от 0 до B_{fin} , а затем уменьшалось до 0, наблюдался гистерезис в зависимости концентрации плазмы от магнитного поля. Измерения ВЧ-мощности, поглощенной плазмой, показали, что при некоторых магнитных полях при одной и той же мощности ВЧ-генератора реализуются два режима: в одном режиме практически вся мощность расходуется во внешней цепи и концентрация плазмы мала, в другом режиме почти вся мощность поглощается плазмой и концентрация электронов велика.

Математическое моделирование показало [41, 46] (см. рис. 12), что в ряде случаев при одних и тех же значениях индукции внешнего магнитного поля B и мощности ВЧ-генератора P_{gen} имеется несколько ветвей решений, т.е.

несколько значений концентрации электронов, при которых существует решение системы уравнений, описывающей разряд. Ранее рассматривалась ветвь решений с высокими значениями концентрации электронов, однако начиная с некоторого значения B^* появляется второе равновесное решение со значениями концентрации плазмы, примерно на порядок меньшими, чем соответствующие значения первого решения. Очевидно, что наличие нескольких значений концентрации электронов при одних и тех же значениях B и P_{gen} указывает на возможное наличие гистерезиса при увеличении и уменьшении внешнего магнитного поля.

Таким образом, при горении индуктивного ВЧ-разряда в режиме $R_{pl} \leq R_{ant}$ происходит самосогласованное перераспределение мощности между плазмой и активным сопротивлением внешней цепи, которое проявляется в следующем:

- 1) наличие двух мод индуктивного ВЧ-разряда с сильно различающимися значениями плотности плазмы;
- 2) появление гистерезиса при переходе из низкой моды разряда в высокую и обратно соответственно при увеличении и уменьшении внешнего магнитного поля;
- 3) насыщение зависимости концентрации плазмы от мощности ВЧ-генератора в области высоких n_e ;
- 4) ограничение при наличии внешнего магнитного поля области существования разряда со стороны больших магнитных полей;
- 5) немонотонность зависимости плотности плазмы от внешнего магнитного поля.

5. Особенности индуктивного высокочастотного разряда с емкостной компонентой

Рассмотрим теперь влияние емкостной связи между антенной и плазмой на характеристики разряда. Для изучения влияния емкостной составляющей разряда в экспериментах [46] на внешней боковой поверхности источника плазмы дополнительно к спирали, расположенной на торцевой поверхности, размещались обкладки конденсатора (рис. 1в). Это позволяло организовать емкостной канал ввода мощности при условии, что индуктивная связь между антенной и плазмой оставалась неизменной. Использовались две схемы подключения конденсатора. В первом случае концы антенны и обкладки конденсатора через отдельные системы согласования подключались к двум независимым ВЧ-генераторам. При этом ВЧ-мощность могла вкладываться через индуктивный и емкостной каналы независимо. Во втором случае для моделирования реального индуктивного ВЧ-разряда, обладающего емкостной компонентой (далее — гибридного ВЧ-разряда), индуктор и конденсатор, соединенные параллельно, подключались к одному ВЧ-генератору.

5.1. Зависимость параметров плазмы от мощности высокочастотного генератора

Рассмотрение влияния емкостной компоненты на параметры индуктивного разряда начнем со случая без магнитного поля. Из рисунка 6а видно, что наличие независимого емкостного канала приводит к понижению вкладываемой через индуктивный канал критической мощности P_f , при которой разряд переходит в моду с высокой интенсивностью свечения. Чем большая доля ВЧ-мощности вкладывается через емкостной канал, тем меньше значение P_f . Одновременно с понижением P_f переход из моды с низкой интенсивностью свечения в моду с высокой интенсивностью становится более плавным. Случай параллельного подсоединения антенны и конденсатора приводит к тем же качественным результатам, однако изменение P_f выражено значительно слабее.

При наличии внешнего магнитного поля присутствие емкостной составляющей приводит к изменениям не только P_f , но и P_b [46]. Как видно из рис. 7д, е, при параллельном подсоединении антенны и конденсатора разница между P_f и P_b существенно меньше, чем в случае чисто индуктивного разряда, а при увеличении ВЧ-мощности, поступающей в плазму через независимый емкостной канал, разница между P_f и P_b стремится к нулю и гистерезис исчезает. Таким образом, наличие емкостной составляющей приводит к стабилизации разряда и исчезновению гистерезиса в зависимости параметров плазмы от ВЧ-мощности и магнитного поля.

Отметим еще один важный результат. При параллельном подсоединении антенны и конденсатора в высокой моде разряда уменьшение тока через антенну по сравнению с током при чисто индуктивном разряде не превышает 10 % во всех рассмотренных условиях эксперимента. Интенсивность свечения плазмы в высокой моде разряда также слабо зависит от наличия емкостной компоненты разряда (рис. 6а).

Рассмотрим теперь результаты математического моделирования разряда с независимой емкостной ком-

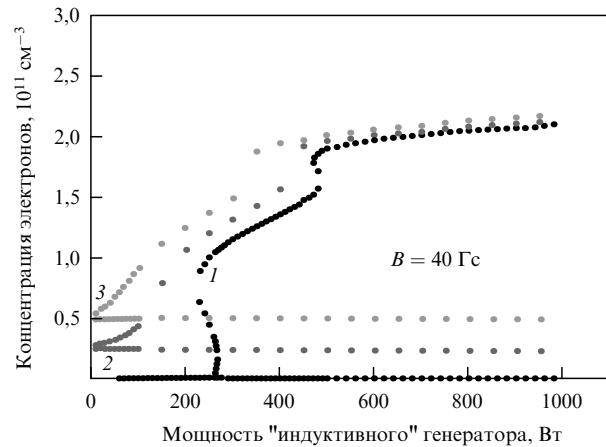


Рис. 13. Зависимость концентрации электронов от мощности "индуктивного" ВЧ-генератора ($B = 40$ Гц) при различных значениях мощности "емкостного" генератора: 1 — без емкостной составляющей, 2 — емкостная составляющая 50 Вт, 3 — емкостная составляющая 100 Вт.

понентой, позволяющие прояснить физические причины наблюдавшихся эффектов. На рисунке 13 представлена зависимость плотности плазмы n_e в ВЧ-разряде от мощности ВЧ-генератора P_{gen}^{ind} , питающего индуктивный канал в чисто индуктивном разряде, а также при условии, что в разряд дополнительно вводится мощность через емкостной канал. Как видно, при наличии емкостного канала разряд может существовать в модах со значительно различающимися концентрациями плазмы. В случае моды с высокой концентрацией подавляющая часть мощности ВЧ-генератора, питающего индуктивный канал, вкладывается в плазму. В моде с низкой концентрацией электронов практически вся мощность индуктивного генератора идет на нагрев антенны, а плотность плазмы определяется ВЧ-мощностью, которая поступает в плазму через емкостной канал. В экспериментах "выбор" моды горения разряда, по-видимому, осуществляется с помощью системы согласования, так как активная и реактивная составляющие импеданса плазмы, существующего в высокой и низкой модах существенно различаются. Сказанное подтверждают результаты работы [49], в которой экспериментально продемонстрирована возможность изменения моды горения разряда при изменении параметров системы согласования.

На рисунке 14 показано изменение доли мощности, вложенной в плазму через индуктивный канал, в зависимости от мощности P_{gen}^{ind} при различных значениях P_{gen}^{cap} . Как видно, мощность, вкладываемая через индуктивный канал, зависит от мощности, вкладываемой через емкостной канал. При небольших значениях P_{gen}^{ind} мощность, поступающая через индуктивный канал P_{pl}^{ind} возрастает с увеличением P_{gen}^{cap} , затем приближается к значениям, имеющим место в отсутствие емкостной составляющей, и наконец становится меньше, чем в чисто индуктивном разряде. Уменьшение мощности P_{pl}^{ind} в области высоких значений P_{gen}^{ind} тем сильнее, чем больше ВЧ-мощность, вкладываемая через емкостной канал.

Проанализируем качественно взаимное влияние двух каналов ввода ВЧ-мощности, пользуясь эквивалентной схемой, приведенной на рис. 15а. Сначала рассмотрим

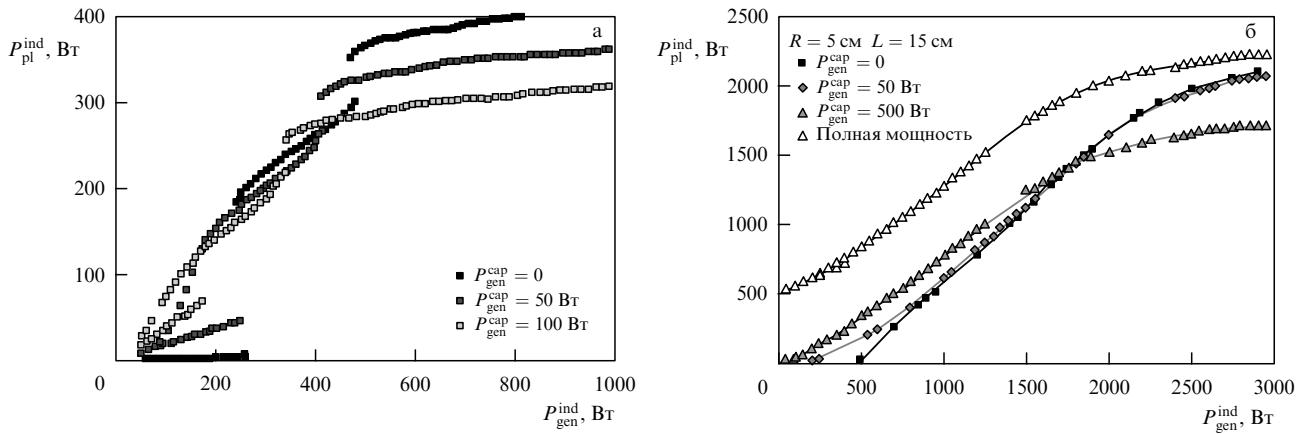


Рис. 14. Зависимость мощности, вложенной в плазму через индуктивный канал, а также полной мощности, от мощности "индуктивного" ВЧ-генератора при различных значениях мощности "емкостного" генератора: (а) $B = 40 \text{ Гс}$, (б) $B = 150 \text{ Гс}$.

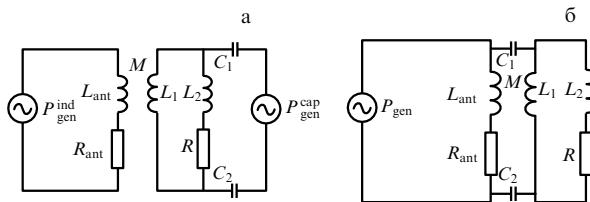


Рис. 15. Эквивалентные схемы ВЧ-разряда, поддерживаемого независимыми индуктивным и емкостным каналами (а), и гибридного разряда (б).

случай малых P_{gen}^{ind} и низких концентраций плазмы. Как известно из литературы [38, 49–51] и как показывают расчеты, в широком диапазоне условий емкостная фаза разряда может существовать при меньших мощностях ВЧ-генератора, чем индуктивная, при этом в разряде устанавливается некоторая концентрация электронов n_e^* . Напомним, что хотя антенна подключена к "индуктивному" генератору, очевидно, что с появлением плазмы во внешней цепи "индуктивного" генератора возникает эквивалентное сопротивление, величина которого определяется n_e^* , т.е. фактически ВЧ-мощностью, поступающей через емкостной канал. В случае, когда концентрация электронов, определяемая емкостным каналом, больше концентрации электронов n_e^{ind} , которая существовала бы в источнике плазмы в отсутствие емкостного канала, вклад ВЧ-мощности в плазму через индуктивный канал возрастает по сравнению с таковым в отсутствие емкостного канала. Это и показали решения, представленные на рис. 13, 14.

Теперь рассмотрим область высоких концентраций плазмы. Дополнительный ввод мощности через емкостной канал приводит к увеличению плотности плазмы, однако в области высоких концентраций электронов эквивалентное сопротивление плазмы проходит через максимум и начинает убывать (см. раздел 3). Физически это связано с ухудшением проникновения ВЧ-мощности в плазму с возрастанием концентрации плазмы. Положение максимума эквивалентного сопротивления по концентрации электронов существенно зависит от величины магнитного поля, поэтому и область P_{gen}^{ind} , в которой начинается падение доли мощности, вложенной в плазму через индуктивный канал, зависит от B [46].

Уменьшение доли ВЧ-мощности, поступающей в плазму через индуктивный канал, естественно, приводит к уменьшению полной мощности, вкладываемой в плазму (рис. 14б). При этом с возрастанием мощности ВЧ-генератора, питающего индуктивный канал, величина полной мощности приближается к величине мощности, вкладываемой через индуктивный канал в чисто индуктивном разряде. Неудивительно, что параметры плазмы, экспериментально наблюдавшиеся в высокой моде чисто индуктивного разряда и разряда с емкостной компонентой, оказались близки друг к другу.

Вернемся к области относительно небольших P_{gen}^{ind} , в которой происходит переход из низкой моды горения разряда в высокую. Как видно из рис. 16, в случае, когда $P_{gen}^{cap} = 0$, для зависимости $n_e(P_{gen}^{ind})$ при переходе из моды с низкими концентрациями плазмы в моду с высокими концентрациями характерно существование нескольких решений, что обычно связывается с наличием гистерезиса. Однако, по мере возрастания P_{gen}^{cap} область мощностей индуктивного генератора, в которой существует многозначность решений, сначала сужается, а затем исчезает. Кроме того, понижается пороговая мощность, при которой происходит переход

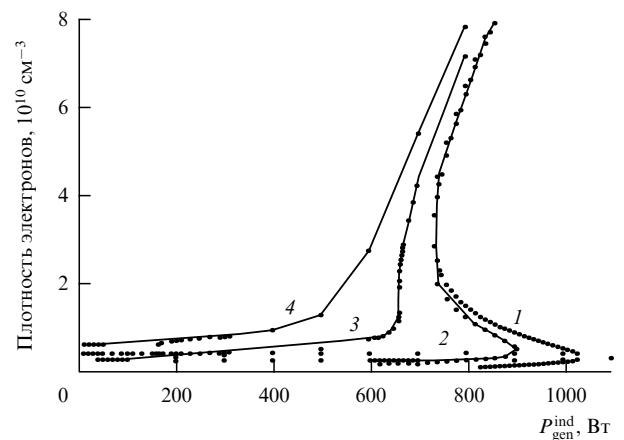


Рис. 16. Зависимость концентрации электронов от мощности ВЧ-генератора P_{gen}^{ind} , питающего индуктивный канал при различных значениях мощности, вкладываемой через емкостной канал P_{gen}^{cap} . 1 — 0, 2 — 1 Вт, 3 — 5 Вт, 4 — 10 Вт.

из низкой моды разряда в высокую. Таким образом, математическое моделирование подтвердило, что наличие емкостного канала ввода ВЧ-мощности приводит к исчезновению гистерезиса в зависимости $n_e(P_{\text{gen}}^{\text{ind}})$. Это связано с увеличением эквивалентного сопротивления плазмы при малых n_e в случае, когда концентрация плазмы определяется мощностью, вкладываемой через емкостной канал.

Подводя итог полученным результатам, можно сделать вывод о том, что индуктивная составляющая разряда является ответственной за появление скачкообразного перехода из моды разряда с низкой концентрацией электронов в моду с высокой концентрацией. Емкостная составляющая разряда приводит к уменьшению пороговой мощности, при которой происходит скачок, и к более плавному переходу из низкой моды разряда в высокую. Наличие внешнего магнитного поля не приводит к качественным изменениям сделанных выводов.

5.2. Зависимость параметров плазмы от внешнего магнитного поля

Рассмотрим влияние емкостной компоненты на зависимость параметров плазмы от магнитного поля при фиксированной мощности ВЧ-генератора. На рисунке 17 показаны зависимости тока ионов аргона от магнитного поля, полученные при реализации в источнике ионов чисто индуктивного разряда, разряда с независимыми индуктивным и емкостным каналами и гибридного разряда. Как видно из рис. 17, в чисто индуктивном источнике ионов разряд возникает при магнитном поле порядка 0,5 мТл и ток ионов при возрастании величины магнитного поля вплоть до 1,3 мТл увеличивается, затем при магнитном поле 1,6 мТл происходит срыв разряда. В случае, когда в разряд дополнительно вводится мощность через независимый емкостной канал, ситуация несколько видоизменяется. Разряд поджигается без внешнего магнитного поля и в области срыва чисто индуктивного разряда не гаснет, а переходит в моду, характерную для чисто емкостного разряда, причем область перехода оказывается тем более плавной, чем больше величина ВЧ-мощности, вкладываемой в плазму через емкостной канал, и чем выше давление аргона. В переходных областях (при малых магнитных полях и вблизи срыва разряда) значение тока ионов, полученное в гибридном разряде, близко к значению тока, полученному в разряде с независимым емкостным каналом и мощностью 60 Вт.

В области максимума ионного тока (магнитные поля 1,0–1,5 мТл) ток ионов в разряде с независимым емкостным каналом несколько больше тока, характерного для чисто индуктивного разряда, а ток ионов в гибридном разряде, несколько меньше. Однако необходимо отметить, что указанная разница в значениях тока не превышает 10–15 %.

На рисунке 17в показано изменение тока I_{ant} , текущего через antennу, при изменении величины внешнего магнитного поля при различных способах реализации разряда. Как и следовало ожидать, наибольшие различия наблюдаются в переходных областях, в области максимума ионного тока значения I_{ant} , полученные в разных разрядах, совпадают в пределах экспериментальной ошибки. Это неудивительно, так как при всех рассмотренных условиях ток в емкостной ветви составлял менее 10 % от величины тока, текущего через antennу.

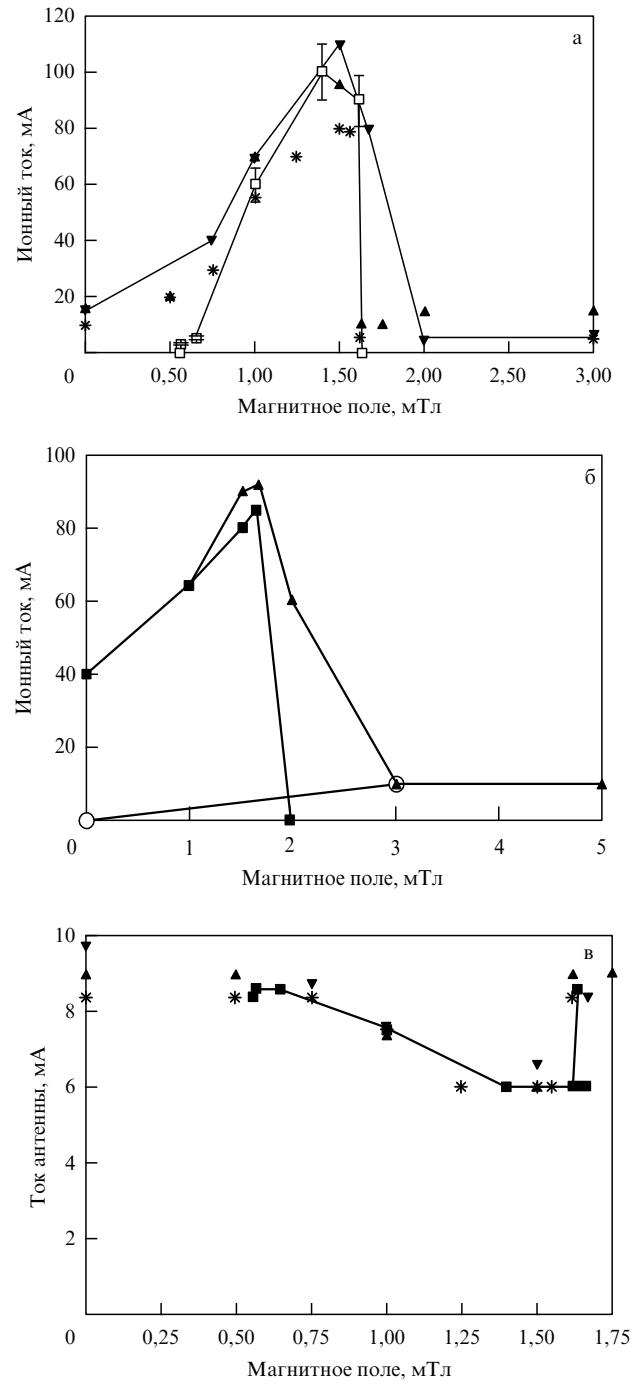


Рис. 17. Зависимости тока пучка ионов (а, б) и тока антенны (в) от величины магнитного поля. Квадраты соответствуют результатам для чисто индуктивного разряда, треугольники вершиной вверх и вниз — результатам для независимого емкостного канала при мощности ВЧ-генератора, питающего емкостной канал, 60 и 200 Вт соответственно, звездочки — результатам для гибридного разряда, кружки — для чисто емкостного разряда. Источник ионов радиусом 5 см и длиной 10 см (аргон). На рисунках (а, в) расход $10 \text{ см}^3 \text{ мин}^{-1}$, на рис. (б) расход $30 \text{ см}^3 \text{ мин}^{-1}$.

Рассмотрим влияние емкостной составляющей на зависимость концентрации плазмы от величины магнитного поля при фиксированной мощности ВЧ-генераторов, питающих индуктивный и емкостной каналы. Результаты расчета показаны на рис. 18. Видно, что при наличии емкостного канала разряд может существовать в модах, значительно отличающихся по концентрации

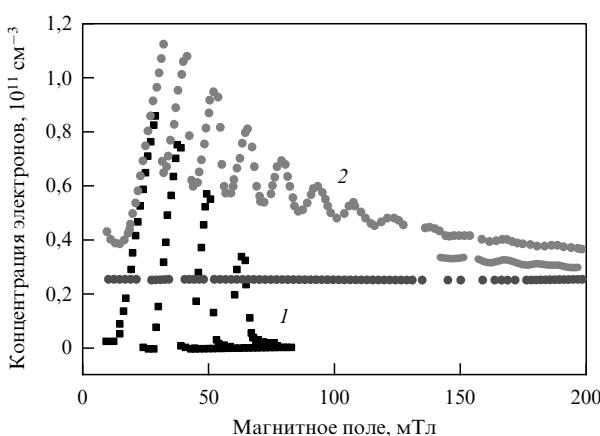


Рис. 18. Зависимость концентрации электронов от величины магнитного поля при фиксированной мощности ВЧ-генератора $P_{\text{gen}}^{\text{ind}}$ (200 Вт), питающего индуктивный канал при значениях мощности, вкладываемой через емкостной канал $P_{\text{gen}}^{\text{cap}}$. 1 — 0, 2 — 50 Вт.

плазмы. В дальнейшем остановимся подробно на моде с высокой концентрацией электронов. Из рисунка 18 видно, что при отсутствии емкостной составляющей разряд срывается при величине магнитного поля порядка 8 мТл. Наличие емкостной составляющей предотвращает срыв разряда и приводит к появлению решений в области магнитных полей, где чисто индуктивный разряд невозможен. Интересно, что наличие плазмы при полях, больших 8 мТл, с концентрацией, определяемой емкостной составляющей, приводит к возрастанию вклада мощности и через индуктивный канал, причем P^{ind} возрастает с увеличением $P_{\text{gen}}^{\text{cap}}$. Для эквивалентного сопротивления плазмы при низких давлениях характерна осциллирующая зависимость от магнитного поля. Осциллирующий характер этой зависимости определяет немонотонность зависимости от магнитного поля доли ВЧ-мощности, вкладываемой в разряд через индуктивный канал, что в конце концов обусловливает немонотонность зависимости концентрации плазмы от величины магнитного поля. Однако при магнитных полях больших 8 мТл поддержание разряда и ввод мощности через индуктивный канал возможны только благодаря существованию емкостного канала ввода ВЧ-мощности.

5.3. Гибридный разряд

В завершение качественно рассмотрим гибридный разряд, т.е. случай, когда индуктивный и емкостной каналы подключены к одному ВЧ-генератору. В этом случае моделируется реальный разряд, при котором емкостной канал образуется благодаря наличию паразитных емкостей между антенной и плазмой.

Понимая всю условность представления разряда в виде эквивалентной схемы, тем не менее обратимся к рассмотрению приведенной на рис. 15б эквивалентной схемы разряда. Плазма на этой схеме представляется в виде активной R и реактивных нагрузок L_1 и L_2 , включенных как в индуктивную, так и в емкостную цепи разряда. ВЧ-мощность от генератора идет на нагрев антены, на нагрев плазмы индуцированным током, а также на нагрев плазмы при прохождении тока через цепь, состоящую из емкостей C_1 , C_2 и сопротивления R , величина которого определяется омическим сопротивле-

нием плазмы. Величины емкостей C_1 , C_2 определяются площадью обкладок конденсатора и расстоянием между обкладками и плазмой, которое складывается из толщины стенок и толщины слоя между плазмой и стенками газоразрядной камеры. Для простоты в схеме предполагается, что часть ВЧ-мощности замыкается через конденсатор, тогда как в реальном разряде работает емкость между поверхностью антены и плазмой.

Очевидно, что постановка самосогласованной задачи гибридного разряда в общем случае является очень сложной. Действительно, в случае гибридного разряда изменение мощности ВЧ-генератора приводит к самосогласованному изменению не только параметров плазмы, но и долей мощности, вкладываемой в плазму через емкостной и индуктивный каналы. Однако можно качественно оценить взаимное влияние этих двух каналов.

При низких мощностях ВЧ-генератора, когда возникновение чисто индуктивного разряда невозможно, разряд загорается в емкостной моде. Через емкостной канал в плазму вкладывается мощность, равная мощности ВЧ-генератора за исключением потерь на нагрев антены. Это приводит к возникновению в индуктивной цепи отличного от нуля эквивалентного сопротивления и к появлению вклада в плазму мощности через индуктивный канал. Подчеркнем, что величина вклада мощности через индуктивный канал определяется мощностью, поступающей в плазму через емкостной канал. Концентрация плазмы зависит от суммарной мощности, поступившей в плазму через оба канала. В этом случае, очевидно, физически не оправдано считать моду существования разряда с низкой концентрацией чисто емкостной, так как суммарная мощность, вкладываемая в плазму, определяется не только емкостным, но и индуктивным каналом.

При более высоких мощностях генератора, когда концентрация электронов определяется долей мощности, поступающей через индуктивный канал, качественно поведение гибридного разряда близко к поведению разряда с независимыми каналами ввода ВЧ-мощности. В области высоких концентраций электронов, где эквивалентное сопротивление плазмы начинает уменьшаться с возрастанием n_e , роль емкостной составляющей становится значимой. Таким образом, можно сделать вывод, что мода индуктивного разряда с высокой концентрацией электронов не является чисто индуктивной. Емкостная составляющая оказывает существенное влияние на величину мощности, поступающей в плазму через индуктивный канал.

Таким образом, наличие емкостной составляющей разряда приводит к изменению доли мощности, вводимой в плазму через индуктивный канал. Это приводит к смещению положения перехода разряда из низкой моды в высокую, в область меньших мощностей ВЧ-генератора. При переходе из низкой моды разряда в высокую наличие емкостной составляющей проявляется в более плавном изменении плотности плазмы с возрастанием мощности генератора и в исчезновении гистерезиса. Превышение за счет вклада мощности через емкостной канал концентраций электронов величины, при которой эквивалентное сопротивление достигает максимума, приводит к уменьшению вклада ВЧ-мощности через индуктивный канал. В связи с этим физически не оправдано сопоставление мод индуктивного ВЧ-разряда с низкой и высокой концентрациями электронов с емкост-

ной и индуктивной модами, так как наличие одного канала ввода мощности в плазму приводит к изменению доли мощности, поступающей в плазму через другой канал.

6. О возможности оптимизации индуктивных источников плазмы низкого давления

Воспользовавшись результатами, представленными в разделах 2–5, попытаемся найти ответы на поставленные во введении вопросы, касающиеся разработки новых ВЧ-источников плазмы. Прежде всего проанализируем возможности оптимизации ввода ВЧ-мощности в плазму. Будем предполагать, что с помощью системы согласования вся мощность от ВЧ-генератора передается во внешнюю цепь, состоящую из антенны и плазмы. Как показано в разделе 4, в реальных экспериментах мощность ВЧ-генератора перераспределяется между двумя каналами: плазмой и элементами внешней цепи, обладающими активным сопротивлением, причем доля мощности, поглощаемая плазмой, зависит от параметров самого источника плазмы. Это может явиться причиной низкой эффективности, а также невоспроизводимости работы источников плазмы при их использовании в установках с различными системами согласования, установочными фланцами и т.д. Очевидно, что для обеспечения эффективных и воспроизводимых режимов работы источников плазмы необходимо, чтобы

$$P_{\text{gen}} \approx P_{\text{pl}} \gg P_{\text{ant}}, \quad (20)$$

что эквивалентно требованию

$$R_{\text{pl}} \gg R_{\text{ant}}. \quad (21)$$

Наиболее простым решением проблемы является уменьшение эффективного сопротивления антенны. Однако существенное уменьшение R_{ant} не всегда возможно. Результаты экспериментальных работ [33, 52, 53], посвященных исследованию эффективности ввода ВЧ-мощности в плазму, показывают, что эффективное сопротивление внешней цепи R_{ant} , измеренное при различных постановках эксперимента, изменяется в пределах 0,2–3 Ом, причем низкие значения R_{ant} характерны для экспериментов, проводимых со стеклянными газоразрядными трубками, достаточно удаленными от металлических элементов установок.

Рассмотрим теперь абсолютные значения эквивалентного сопротивления плазмы. Начнем с разряда без магнитного поля. Расчеты показали [54], что абсолютные значения эквивалентного сопротивления тем больше, чем больше радиус источника, однако даже максимальное значение эквивалентного сопротивления плазмы источника радиусом 50 см не намного превосходит 1 Ом. Это означает, что в плазму низкого давления, созданную источниками радиусом 2,5 см при сопротивлении внешней цепи 1 Ом, можно вложить максимум 30 % мощности, отдаваемой ВЧ-генератором во внешнюю цепь, при этом 70 % мощности пойдут на нагрев антенны, элементов системы согласования и т.д. Увеличение радиуса источника позволяет улучшить результат, однако и здесь добиться вложения хотя бы 80 % мощности ВЧ-генератора в плазму практически невозможно.

Для того чтобы найти пути повышения эквивалентного сопротивления плазмы при индуктивном возбуждении разряда без магнитного поля, были выполнены расчеты R_{pl} при увеличении давления аргона для различных частот [54]. Результаты показали, что увеличение давления приводит к существенному повышению эквивалентного сопротивления. Оптимальная рабочая частота ВЧ-источников плазмы зависит от значений концентрации электронов, необходимых для реализации технологической задачи. При необходимости разработки устройств, работающих при плотностях плазмы $10^{10} \leq n_e \leq 10^{11} \text{ см}^{-3}$, оптимальный ввод ВЧ-мощности в плазму можно обеспечить, работая на частотах 6–13 МГц, в то время как при необходимости получения более высоких концентраций плазмы, $10^{11} \leq n_e \leq 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $n_e > 10^{12} \text{ см}^{-3}$, характерных для плазменных реакторов, применяемых для травления полупроводников, целесообразно повысить частоту до 27 МГц и 40 МГц соответственно.

Теперь рассмотрим результаты, полученные для разряда с внешним магнитным полем. При низких давлениях величины эквивалентного сопротивления плазмы здесь существенно выше, чем значения, полученные в отсутствие магнитного поля. Так же как и в случае ВЧ-индуктивных источников плазмы без магнитного поля, значения эквивалентного сопротивления возрастают с увеличением радиуса источника плазмы и при $R \geq 10 \text{ см}$ обеспечивают практически полное поглощение ВЧ-мощности, отдаваемой генератором во внешнюю цепь. Если в случае дискообразных источников плазмы в отсутствие внешнего магнитного поля величины эквивалентного сопротивления не зависят от длины источника плазмы, то в случае удлиненного цилиндрического источника возможно возрастание R_{pl} при увеличении длины газоразрядной камеры. Расчеты показали, что это может оказаться полезным при разработке устройств с малым радиусом, для которых значения R_{pl} малы, так же как и в случае ВЧ-источников без магнитного поля.

Еще одним параметром, позволяющим увеличить R_{pl} , является рабочая частота ВЧ-генератора ω . Расчеты показали, что увеличение ω приводит к существенному возрастанию R_{pl} , однако при этом максимум функции $R_{\text{pl}}(B)$ смещается в область больших магнитных полей. Кроме того, наблюдаются сильные осцилляции сопротивления при увеличении магнитного поля.

Ранее отмечалось, что увеличение давления рабочего газа приводит к возрастанию эквивалентного сопротивления плазмы ВЧ-индуктивного разряда без магнитного поля. В случае магнитных полей, соответствующих области возбуждения геликонов и ТГ-волн, как отмечалось в разделе 3, ситуация прямо противоположная — пиковые значения R_{pl} убывают с возрастанием магнитного поля. Этот факт свидетельствует в пользу целесообразности учета "геликонных" режимов ВЧ-разряда при разработке источников плазмы низкого давления.

Значения эквивалентного сопротивления, полученные при различных способах и условиях возбуждения плазмы, позволяют сформулировать ряд выводов о возможных путях повышения эффективности ввода ВЧ-мощности в плазму низкого давления. На рисунке 19 показаны области параметров плазмы, при которых удается ввести максимальную долю ВЧ-мощности в плазму при различных способах возбуждения индуктив-

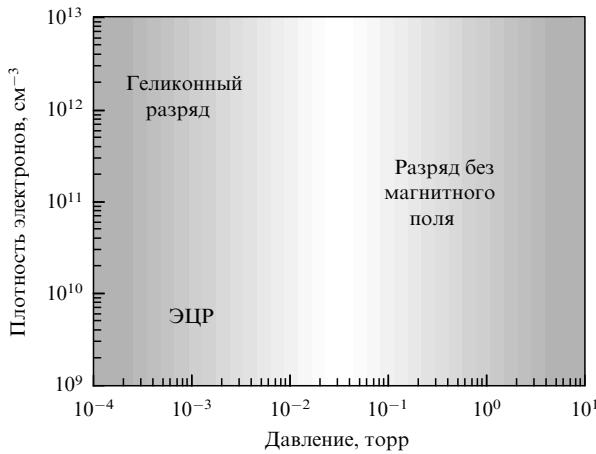


Рис. 19. Области параметров плазмы, при которых удается ввести максимальную долю ВЧ-мощности в плазму при различных способах возбуждения индуктивного разряда на частоте 13 МГц.

ного разряда при работе на частоте 13,6 МГц. Как отмечалось выше, при давлениях, больших 10^{-2} торр, наилучший способ организации разряда — это индуктивный разряд без магнитного поля, в котором превалирует столкновительный механизм поглощения ВЧ-мощности. Понижение давления и тем самым уменьшение роли столкновительных механизмов поглощения ВЧ-мощности приводят к необходимости усиления бесстолкновительного поглощения ВЧ-мощности, что в области низких концентраций электронов возможно при ЭЦР, а в области более высоких концентраций — при возбуждении геликонов и волн ТГ. В области низких давлений ВЧ-мощность лучше вкладывается в источники с большим радиусом; повысить эффективность ввода ВЧ-мощности в источники с малым радиусом можно, увеличивая или длину источника, или рабочую частоту.

Источники плазмы, рассчитанные на более высокие концентрации электронов, должны быть оснащены магнитной системой, создающей относительно более сильные магнитные поля, чем источники, рассчитанные на более низкие плотности плазмы.

Очевидно, что срывы разряда и гистерезис зависимости параметров плазмы от внешних факторов существования разряда являются крайне нежелательными эффектами, с точки зрения организации рабочих режимов индуктивных источников плазмы. В случаях, когда эффективное сопротивление антенн велико, представляется целесообразным использование емкостной составляющей разряда, позволяющей стабилизировать плазму.

Возможные решения задачи получения максимально возможной плотности плазмы при заданной вложенной мощности хорошо известны из физики и техники источников ионов и плазмы, работающих от источников постоянного напряжения [55]. Повышение плотности плазмы при заданном уровне мощности может быть достигнуто за счет выбора оптимального соотношения между длиной и диаметром источника плазмы, а также конфигурации и величины внешнего магнитного поля. Однако в случае с ВЧ-источниками плазмы эти условия должны быть согласованы с условиями эффективного поглощения ВЧ-мощности. Как правило, это приводит к существенному изменению оптимальных конструктивных параметров источников плазмы [54].

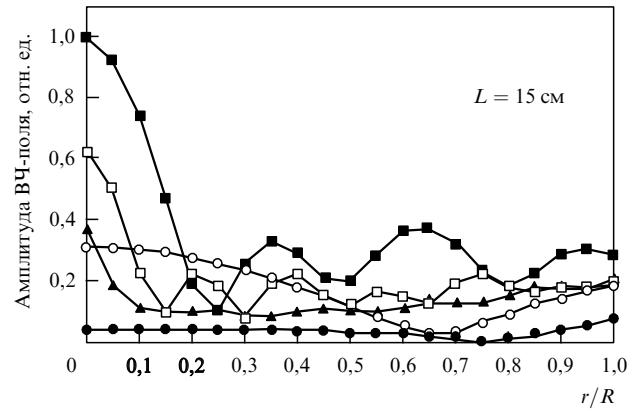


Рис. 20. Расчетное радиальное распределение амплитуды ВЧ-полей при изменении индукции внешнего магнитного поля для источников плазмы радиусом $R = 7,5$ см и длиной 15 см: ● — $B = 1$ мТл, ○ — $B = 2,5$ мТл, ■ — $B = 3,5$ мТл, □ — $B = 5$ мТл, ▼ — $B = 10$ мТл.

Как отмечалось в разделе 4, изменение величины внешнего магнитного поля приводит к пространственному перераспределению плотности плазмы. На рисунке 20 представлены рассчитанные радиальные зависимости ВЧ-электрических полей, полученные при различных значениях магнитного поля [46]. Как видно, при магнитных полях, близких по величине к значению B_{\max} , соответствующему максимуму концентрации электронов, электрические поля волн проникают в объем плазмы, в то время как при магнитных полях, существенно меньших и больших B_{\max} , волны являются поверхностными. Отмеченная зависимость характерна для относительно длинных источников плазмы [46]. В коротких источниках плазмы при любых значениях магнитного поля волны являются поверхностными [46]. Оценка ларморовского радиуса при магнитных полях, больших 1 мТл, для электронов с энергией, меньшей 10 эВ, составляющих большинство плазменных электронов, не превышает 1 см. Это дает основание полагать, что ввод ВЧ-мощности в плазму в радиальном направлении осуществляется локально. Таким образом, пространственное распределение плотности плазмы можно изменять, варьируя величину внешнего магнитного поля и длину газоразрядной камеры. Наиболее однородную плазму можно получить, используя магнитные поля, близкие по величине к B_{\max} , при которой эквивалентное сопротивление плазмы достигает максимума.

7. Заключение

Результаты, полученные в последние годы, как экспериментальные, так и теоретические, показывают, что параметры плазмы индуктивного ВЧ-разряда зависят от потерь мощности во внешней цепи и величин мощности, поступающей в разряд через индуктивный и емкостной каналы. Параметры плазмы, с одной стороны, определяются величинами поглощенной мощности, а с другой стороны, сами определяют как соотношение мощностей, поступающих в разные каналы, так и в конечном счете мощность, поглощаемую плазмой. Это обуславливает самосогласованный характер разряда. Наиболее ярко самосогласованность проявляется в сильной немонотонности зависимости параметров плазмы

от магнитного поля и срывах разряда. Значительные потери мощности во внешней цепи и немонотонная зависимость способности плазмы поглощать ВЧ-мощность от плотности плазмы приводят к насыщению плотности плазмы при увеличении мощности ВЧ-генератора и появлению гистерезиса зависимости параметров плазмы от величины мощности ВЧ-генератора и внешнего магнитного поля.

Наличие емкостной составляющей разряда обуславливает изменение доли мощности, вводимой в плазму через индуктивный канал. Это вызывает смещение положения перехода разряда из низкой моды в высокую в область меньших мощностей ВЧ-генератора. При переходе из низкой моды разряда в высокую наличие емкостной составляющей проявляется в более плавном изменении плотности плазмы с возрастанием мощности генератора и в исчезновении гистерезиса. Увеличение за счет вклада мощности через емкостной канал концентрации электронов до значений, превышающих величину, при которой эквивалентное сопротивление достигает максимума, приводит к уменьшению вклада ВЧ-мощности через индуктивный канал. Физически не оправдано сопоставление мод индуктивного ВЧ-разряда с низкой и высокой концентрациями электронов с емкостной и индуктивной модами, так как наличие одного канала ввода мощности в плазму приводит к изменению доли мощности, поступающей в плазму через другой канал.

Уточнение картины физических процессов в индуктивном ВЧ-разряде низкого давления позволяет оптимизировать параметры плазменных устройств, работающих на его основе.

Благодарности. Автор приносит глубокую благодарность Анри Амвросиевичу Рухадзе и Андрею Федоровичу Александрову за интерес к работе, многочисленные обсуждения и полезные замечания, сделанные при прочтении рукописи.

Список литературы

1. Thomson J J *Philos. Mag.* **32** 321 (1891)
2. Hittorf W *Ann. Phys. Chem.* **21** 90 (1884)
3. Townsend J S, Donaldson R H *Philos. Mag.* **5** 178 (1928)
4. Townsend J S, Donaldson R H *Philos. Mag.* **7** 600 (1929)
5. MacKinnon K A *Philos. Mag.* **8** 605 (1929)
6. Godyak V A "Plasma phenomena in inductive discharges", in *Invited Papers from the 30th European Physical Soc. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics (St. Petersburg), Russia, 7–11 July 2003; Plasma Phys. Control. Fusion* **45** A399 (2003)
7. Hopwood J *Plasma Sources Sci. Technol.* **1** 109 (1992)
8. Loeb H W "Recent work on radio frequency ion thrusters" *J. Spacecraft Rockets* **8** 494 (1971)
9. Godyak V A, Alexandrovich B M, Piejak R B, US Patent 5,834,905 (November 19, 1998)
10. Stevens J E "Electron cyclotron resonance plasma sources", in *High Density Plasma Sources: Design, Physics, and Phenomena* (Ed. O A Popov) (Park Ridde, NJ: Noyes Publ., 1995) p. 312
11. Uchida T *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** L43 (1994)
12. Tsuboi H et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* **34** 2476 (1995)
13. Yoshida Z, Uchida T *Jpn. J. Appl. Phys.* **34** 4213 (1995)
14. Uchida T *J. Vac. Sci. Technol. A* **16** 1529 (1998)
15. Uchida T, Jpn. Patents 07-090632, 08-078188, 07-263190 (1994)
16. Арсенин А В, Лейман В Г, Тараканов В П *Краткие сообщения по физике ФИАН* (4) 19 (2003) [Arsenin A V, Leiman V G, Tarakanov V P *Bull. Lebedev Phys. Inst.* (4) 15 (2003)]
17. Boswell R W, US Patent 4,810,935 (March 7, 1989)
18. Chen F F, "Helicon plasma sources", in *High Density Plasma Sources: Design, Physics, and Phenomena* (Ed. O A Popov) (Park Ridde, NJ: Noyes Publ., 1995) p. 1
19. Александров А Ф и др. *ЖТФ* **64** (11) 53 (1994) [Aleksandrov A F et al. *Tech Phys.* **39** 1118 (1994)]
20. Александров А Ф и др., Патент РФ 2095877
21. Силин В П, Рухадзе А А *Электромагнитные свойства плазмы и плазмоподобных сред* (М.: Госатомиздат, 1961)
22. Гинзбург В Л, Рухадзе А А *Волны в магнитоактивной плазме* (М.: Наука, 1970)
23. Александров А Ф, Богданевич Л С, Рухадзе А А *Основы электродинамики плазмы* (М.: Высшая школа, 1978) [Translated into English: Aleksandrov A F, Bogdanovich L S, Rukhadze A A *Principles of Plasma Electrodynamics* (Berlin: Springer-Verlag, 1984)]
24. Кондратенко А Н *Проникновение поля в плазму* (М.: Атомиздат, 1979)
25. Lieberman M A, Lichtenberg A J *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (New York: Wiley, 1994)
26. Boswell R W *Phys. Lett. A* **33** 457 (1970)
27. Boswell R W *Plasma Phys. Control. Fusion* **26** 1147 (1984)
28. Boswell R W, Henry D *Appl. Phys. Lett.* **47** 1095 (1985)
29. Chen F F "Helicon plasma sources", in *High Density Plasma Sources: Design, Physics, and Phenomena* (Ed. O A Popov) (Park Ridde, NJ: Noyes Publ., 1995) p. 1
30. Kolobov V I, Economou D J *Plasma Sources Sci. Technol.* **6** R1 (1997)
31. Chen F F *Phys. Plasmas* **8** 3008 (2001)
32. Godyak V A, Piejak R B, Alexandrovich B M *Plasma Sources Sci. Technol.* **11** 525 (2002)
33. Miljak D G, Chen F F *Plasma Sources Sci. Technol.* **7** 61 (1998)
34. Blackwell D D, Chen F F *Plasma Sources Sci. Technol.* **10** 226 (2001)
35. Chen F F *Plasma Phys. Control. Fusion* **33** 339 (1991)
36. Александров А Ф и др. *ЖТФ* **64** (11) 53 (1994) [Aleksandrov A F et al. *Tech Phys.* **39** 1118 (1994)]
37. Shamrai K P, Taranov V B *Plasma Sources Sci. Technol.* **5** 474 (1996)
38. Turner M M, Lieberman M A *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** 313 (1999)
39. Thomson J J *Philos. Mag.* **4** 1128 (1927)
40. Piejak R B, Godyak V A, Alexandrovich B M *Plasma Sources Sci. Technol.* **1** 179 (1992)
41. Александров А Ф и др. *Физика плазмы* **30** 434 (2004) [Aleksandrov A F et al. *Plasma Phys. Rep.* **30** 398 (2004)]
42. Вавилин К В и др. *ЖТФ* **74** (5) 44 (2004) [Vavilin K V et al. *Tech. Phys.* **49** 565 (2004)]
43. Вавилин К В и др. *ЖТФ* **74** (6) 25 (2004) [Vavilin K V et al. *Tech. Phys.* **49** 686 (2004)]
44. Вавилин К В и др. *ЖТФ* **74** (6) 29 (2004) [Vavilin K V et al. *Tech. Phys.* **49** 691 (2004)]
45. Александров А Ф и др. *Физика плазмы* **30** 434 (2004) [Aleksandrov A F et al. *Plasma Phys. Rep.* **30** 398 (2004)]
46. Александров А Ф и др. *Прикладная физика* (4) 70; (5) 72 (2005); (1) 36; (2) 41; (4) 54; (5) 33; (5) 39 (2006)
47. Godyak V A, Piejak R B, Alexandrovich B M *J. Appl. Phys.* **85** 703 (1999)
48. Godyak V A, Piejak R B, Alexandrovich B M *Plasma Sources Sci. Technol.* **3** 169 (1994)
49. Cunge G et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** 576 (1999)
50. El-Fayoumi I M, Jones I R, Turner M M *J. Phys. D: Appl. Phys.* **31** 3082 (1998)
51. Suzuki K et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* **7** 13 (1998)
52. Godyak V *Plasma Phys. Control. Fusion* **45** A399 (2003)
53. Lee H-J, Yang I-D, Whang K-W *Plasma Sources Sci. Technol.* **5** 383 (1996)

54. Alexandrov A F et al. "On the possibilities of RF ion thrusters optimization", in *29th Intern. Electric. Propulsion Conf. (IEPCO5)*, Princeton, NJ, October 31 – November 4, 2005
55. *Плазменные ускорители и ионные инжекторы* (Отв. ред. Н П Козлов, А И Морозов) (М.: Наука, 1984)

Plasma sources using RF low pressure inductive discharge: optimization aspects

E.A. Kral'kina

*M.V. Lomonosov Moscow State University, Physics Department,
Vorob'evy gory, 119992 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-495) 939-4773
E-mail: ekralkina@mail.ru*

Although plasma reactors and ions sources operating on the principle of RF inductive discharge have been a vital component to modern earth and space technologies for several decades, the ever increasing and changing requirements on the part of plasma technologies call for improving old and developing new and promising device models. A crucial factor in developing inductive plasma sources is to create proper conditions for RF power to be absorbed by plasma. In recent years it has become evident that in the case of RF low pressure inductive discharge the power of the RF generator is distributed between the external circuit and plasma and that there are two channels of power input to plasma: and inductive one, which exists due to the current through the inductor or the antenna; and a capacitive one, due to the antenna- to-plasma capacitive coupling. Those aspects of the behavior of the RF inductive discharge that are due to the RF power distribution between the channels are examined. Absorption mechanisms for RF power are reviewed. Optimization possibilities for plasma sources operating on the RF inductive discharge are discussed.

PACS numbers: 52.40.Fd, **52.50.-b**, 52.80.Pi

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200805f.0519

Bibliography — 55 references

Received 25 June 2007, revised 12 November 2007

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **178** (5) 519 – 540 (2008)

Physics – Uspekhi **51** (5) (2008)