

УДК 537.525.7

DOI: 10.15372/PMTF202315321

ФЕРРОМАГНИТНО-УСИЛЕННЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ РАЗРЯД НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

М. В. Исупов, В. А. Пинаев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mails: isupovmikhail@yandex.ru, pinaev_vadim@mail.ru

Исследуется генерация низкочастотного индукционного разряда низкого давления с ферромагнитным усилением магнитной связи между индуктором и плазмой. Рассмотрены основные особенности и преимущества данного способа генерации плазмы при его использовании в технологиях ионно-плазменной обработки поверхности материалов. Представлены новые экспериментальные данные об электрофизических и динамических характеристиках ферромагнитно-усиленного индукционного разряда низкого давления в аргоне с добавлением кислорода. Показана возможность управления радиальным распределением параметров плазмы в газоразрядной камере с помощью распределенной генерации разряда. Выявлены существенные колебания температуры электронов в течение периода колебаний электрического поля разряда, рассмотрен механизм их возникновения.

Ключевые слова: индуктивно связанная плазма, электроотрицательная плазма, нестационарный разряд

Введение. Индукционный принцип генерации разряда, позволяющий получать химически активную плазму низкого давления с высокой концентрацией ионов и радикалов, активно используется на практике в процессах ионно-плазменной обработки поверхности материалов (реактивное ионное травление, плазмохимическое газофазное осаждение, ионно-плазменная модификация и т. д.). Однако стандартный способ генерации индуктивно связанной плазмы (ИСП) в высокочастотном радиодиапазоне порядка $1 \div 10$ МГц имеет ряд особенностей, ограничивающих возможности существующих ионно-плазменных технологий. В частности, широко используемые на практике высокочастотные индукционные разряды с плоским спиральным индуктором обладают слабой магнитной связью между индуктором и плазмой ($k < 1$) и как следствие низким коэффициентом мощности ($\cos \varphi < 1$), что усложняет задачу согласования источника питания и нагрузки. Также высокочастотные индукционные разряды характеризуются существенной емкостной связью между индуктором и плазмой. Емкостный разряд, возникающий между витками индуктора при низком давлении плазмообразующего газа и высокой частоте тока, вызывает ионную бомбардировку стенок газоразрядной камеры и загрязнение плазмы нежелательными примесями.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теплофизики СО РАН № 121031800218-5.

© Исупов М. В., Пинаев В. А., 2023

Для преодоления указанных ограничений высокочастотных индукционных разрядов в работе [1] предложен альтернативный способ генерации плазмы на основе низкочастотного индукционного разряда с ферромагнитным усилением магнитной связи между индуктором и плазмой. Данный способ генерации ИСП основан на концентрации и увеличении магнитного потока Φ , связывающего индуктор и плазму, за счет введения замкнутого ферромагнитного сердечника в магнитную цепь индукционного разряда. Это позволяет усилить магнитную связь между индуктором и плазмой ($k \approx 1$), увеличить коэффициент мощности газоразрядного устройства ($\cos \varphi \approx 1$), улучшить согласование источника питания и нагрузки, а также существенно снизить частоту генерации ИСП (до значений порядка $10 \div 100$ кГц). Генерация ИСП в низкочастотном диапазоне, в свою очередь, позволяет устранить нежелательную емкостную связь между индуктором и плазмой, а также существенно упростить конструкцию источника питания. Указанные преимущества низкочастотных ферромагнитно-усиленных индукционных разрядов позволили разработать на их основе безэлектродные газоразрядные лампы [2–4], а также безэлектродные плазмотроны [5–7]. Как показано в работе [1], данный подход также может быть использован в качестве альтернативы высокочастотной ИСП при создании новых устройств для ионно-плазменной обработки крупномасштабных подложек.

Следует отметить, что введение магнитопровода в магнитную цепь индукционного разряда существенно изменяет конфигурацию электрических и магнитных полей ИСП [8]. В результате высокочастотные и низкочастотные индукционные разряды характеризуются разными распределениями параметров плазмы в объеме газоразрядной камеры. Помимо различий пространственных распределений параметров плазмы высокочастотные и низкочастотные индукционные разряды характеризуются различной динамикой плазмы, определяемой соотношением между периодом колебаний электрического поля разряда τ , характерным временем жизни заряженных частиц τ_z и характерным временем релаксации энергии электронов τ_e [8]. Указанные особенности электрофизических и динамических характеристик низкочастотной ферромагнитно-усиленной ИСП необходимо учитывать при создании новых устройств для ионно-плазменной обработки материалов, поскольку эти особенности могут оказывать существенное влияние на плотности потоков ионов и химически активных частиц, воздействующих на обрабатываемую поверхность (по сравнению с высокочастотной ИСП). Следует отметить, что электрофизические и динамические характеристики низкочастотных индукционных разрядов изучены недостаточно. Единственная работа [8] посвящена численному моделированию электромагнитных полей и нестационарных процессов в низкочастотной ИСП. В работах [1, 9–12] выполнены экспериментальные исследования ферромагнитно-усиленных индукционных разрядов низкого давления в инертных газах с целью создания нового метода ионно-плазменной обработки крупномасштабных подложек. Однако введение даже небольших добавок химически активных электроотрицательных газов (галогены, кислород), широко применяемых в технологиях ионно-плазменной обработки, существенно изменяет баланс энергии и частиц разряда. Таким образом, низкочастотная ИСП электроотрицательных газов требует детального изучения.

Целью настоящей работы является получение новых экспериментальных данных об электрофизических характеристиках низкочастотного ферромагнитно-усиленного индукционного разряда низкого давления в смеси инертного и электроотрицательного газов, а также новых экспериментальных данных о динамических характеристиках низкочастотной ИСП.

Экспериментальные установки. Методы измерений. Для изучения электрофизических характеристик ферромагнитно-усиленной ИСП низкого давления использовалась установка, схема которой представлена на рис. 1. Установка состоит из основной газораз-

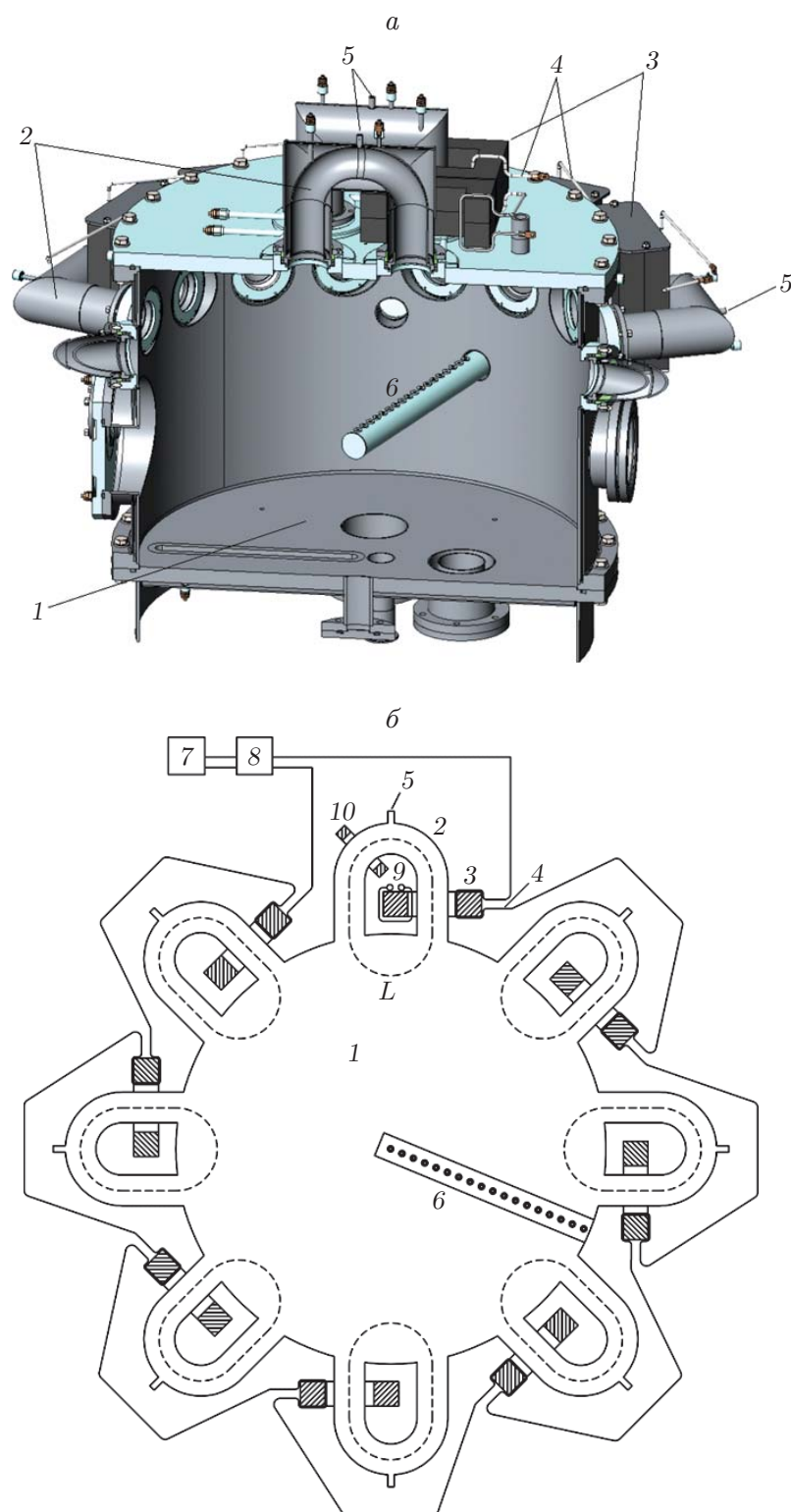


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

a — общий вид, *б* — вид сверху; 1 — газоразрядная камера, 2 — газоразрядная трубка, 3 — ферритовый сердечник, 4 — первичная обмотка, 5 — газовый ввод, 6 — система электрических зондов, 7 — источник питания, 8 — блок согласования, 9 — измерительный виток, 10 — трансформатор тока



Рис. 2. Газоразрядная камера

рядной камеры радиусом $R = 35$ см и высотой $H = 50$ см и 10 П-образных газоразрядных трубок с внутренним диаметром $D_T = 5$ см и длиной $L_T = 42$ см, торцы которых соединены с основной газоразрядной камерой. Восемь газоразрядных трубок размещены симметрично по периметру газоразрядной камеры, две газоразрядные трубки находятся в центре верхней крышки камеры (см. рис. 1, а). Газоразрядные трубки и камера изготовлены из нержавеющей стали и разделены диэлектрическими прокладками из фторопласта и силиконовой резины. Диэлектрические прокладки обеспечивают вакуумное уплотнение газоразрядной камеры и предотвращают протекание индуцированного тока по проводящим стенкам камеры. На каждой газоразрядной трубке установлен замкнутый ферритовый сердечник с сечением площадью 32 см^2 и первичной обмоткой (индуктором). Первичные обмотки соединены последовательно и подключены через блоки согласования (перестраиваемые LC-цепи) к двум источникам питания с частотой тока $50 \div 100$ кГц: первичные обмотки восьми периферийных газоразрядных трубок подключены к источнику питания с полной мощностью $40 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ (см. рис. 1, б), обмотки двух центральных газоразрядных трубок подключены к источнику питания с полной мощностью $12 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Блоки согласования необходимы как для стабилизации тока разряда (обладающего отрицательной вольт-амперной характеристикой), так и для инициирования разряда повышенным напряжением в момент запуска. Данная экспериментальная установка позволяет генерировать до 10 ферромагнитно-усиленных индукционных разрядов в общей газоразрядной камере, независимо варьируя силу тока разряда (и соответственно мощность) различных источников плазмы. Газоразрядная камера с активированными периферийными и центральными источниками плазмы показана на рис. 2. Аналогичный распределенный способ генерации ферромагнитно-усиленной ИСП реализован в экспериментах [1, 9–12], однако в этих экспериментах либо центральный источник плазмы не применялся [9, 12], либо в качестве него использовался высокочастотный индукционный разряд [10, 11], либо источники плазмы размещались внутри газоразрядной камеры [1]. Еще одно принципиальное различие экспериментов, описанных в настоящей работе и работах [1, 9–12], заключается в том, что в качестве плазмообразующего газа используется не чистый инертный газ, а смесь инертного газа (аргона) с электроотрицательным газом (кислородом). Аргон подается через газовые вводы в газоразрядные трубки и истекает через торцы газоразрядных трубок

в объем основной газоразрядной камеры. Кислород подается через ввод в верхней крышке газоразрядной камеры и смешивается с аргонном, при этом газ из газоразрядной камеры непрерывно откачивается через фланец в ее нижней крышке.

Для измерения напряжения разряда U используется одиночный измерительный виток, охватывающий сечение магнитопровода. Сила тока разряда I измеряется с помощью трансформатора тока, установленного на газоразрядную трубку (см. рис. 1, б). Для измерения пространственного распределения концентрации заряженных частиц используется система плоских электрических зондов, расположенных по радиусу основной газоразрядной камеры на расстоянии 28 см от верхней крышки камеры. На зонды подается потенциал смещения $U_c = -50$ В относительно стенок газоразрядной камеры, измеряются ионные токи зондов. Поскольку ионный ток зонда j прямо пропорционален концентрации ионов n_i , измерение радиального распределения ионного тока $j(r)$ позволяет выявить распределение концентрации ионов в объеме газоразрядной камеры $n_i(r)$. Аналогичный способ измерения пространственного распределения плотности плазмы использовался в работе [1].

Для изучения динамических характеристик низкочастотной ИСП используется метод оптической эмиссионной спектроскопии, основанный на измерении непрерывного спектра излучения разряда. Основным механизмом, формирующим непрерывный спектр излучения в видимой области при исследуемых условиях генерации низкочастотной ИСП, является тормозное излучение, возникающее при упругом рассеянии электронов на нейтральных частицах [13]. Полагая, что функция распределения электронов по энергиям является максвелловской, интенсивность тормозного излучения J_ω на частоте ω можно рассчитать как функцию температуры T_Σ и плотности электронов n_Σ [14]:

$$J_\omega = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\hbar}{m^{3/2} c^2} n_\Sigma N (kT_\Sigma)^{-3/2} \times \int_{\hbar\omega}^{\infty} \sqrt{\varepsilon - \hbar\omega} [\varepsilon \sigma_{col}(\varepsilon - \hbar\omega) + (\varepsilon - \hbar\omega) \sigma_{col}(\varepsilon)] e^{-\varepsilon/(kT_\Sigma)} d\varepsilon, \quad (1)$$

где N — концентрация нейтральных частиц; ε — энергия электрона; σ_{col} — площадь сечения упругих столкновений электрона с нейтральными частицами. Таким образом, измеряя спектральную плотность тормозного излучения разряда J_ω в абсолютных энергетических единицах, с помощью выражения (1) можно определить величины n_Σ и T_Σ . При измерении интенсивности тормозного излучения в относительных единицах выражение (1) позволяет определить величину T_Σ . Ранее данный способ оптической диагностики применялся для измерения параметров плазмы в области положительного столба тлеющего разряда постоянного тока [14, 15]. Однако вследствие высокой частоты упругих соударений электронов с атомами (порядка 1 ГГц для исследуемых условий генерации ИСП) непрерывный спектр тормозного излучения позволяет определить мгновенные значения параметров плазмы и может быть использован для изучения динамических характеристик разряда.

Для проведения экспериментальных исследований динамических характеристик низкочастотной ИСП использовалась экспериментальная установка, описанная в работе [16]. Излучение из центральной области газоразрядной трубки фокусировалось на входную щель оптической системы, состоящей из монохроматора МДР-23 и фотоэлектронного умножителя. До начала эксперимента проводился анализ спектра излучения разряда, определялись спектральные интервалы, свободные от спектральных линий излучения разряда. В ходе эксперимента сигнал с фотоэлектронного умножителя, соответствующий непрерывному спектру излучения разряда $J_\lambda(t)$ на выбранной длине волны λ , регистрировался с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Одновременно на АЦП регистрировалась осциллограмма напряжения горения разряда $U(t)$, что позволяло связать наблюдаемые пульсации интенсивности непрерывного спектра $J_\lambda(t)$ с фазой электрического поля

разряда. С использованием полученных при различных значениях длины волн λ_i зависимости интенсивности тормозного излучения $J_{\lambda_i}(t)$ и соответствующих осциллограмм напряжения $U_i(t)$ строился спектр тормозного излучения электронов (в нормированном виде $J_{\lambda_i}/J_{\lambda_0}$) для выбранного момента времени t/τ . С помощью выражения (1) строился расчетный нормированный спектр тормозного излучения $J_{\omega_i}/J_{\omega_0}$. При нормировке выражения (1) неизвестные величины n_3 и N сокращаются, и расчетная интенсивность тормозного излучения зависит исключительно от выбранной частоты $\omega_i = 2\pi c/\lambda_i$ и температуры электронов T_3 . С помощью метода наименьших квадратов определялась величина T_3 , при которой отклонение экспериментально измеренных значений интенсивности тормозного излучения $J_{\lambda_i}/J_{\lambda_0}$ от расчетных значений $J_{\omega_i}/J_{\omega_0}$ является минимальным. Данная процедура выполнялась для различных моментов времени t/τ , что позволяло определить значения температуры электронов $T_3(t/\tau)$ в течение периода колебаний электрического поля разряда τ .

Результаты экспериментов и их обсуждение. Рассмотрим схему экспериментальной установки, представленную на рис. 1. Каждая газоразрядная трубка с ферритовым сердечником, соединенная с газоразрядной камерой, образует замкнутый контур L для индукционного тока разряда (см. рис. 1, б). Поскольку практически весь магнитный поток Φ , связывающий плазму и первичную обмотку, сосредоточен в сердечнике, в соответствии с законом электромагнитной индукции имеем
$$U = \oint_L E dl = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (U — \text{на-}$$

пряжение разряда). При характерной частоте генерации ферромагнитно-усиленной ИСП порядка 100 кГц влияние скин-эффекта на распределение электрических полей в плазме пренебрежимо мало [8], соответственно интеграл от электрического поля $\mathbf{E}$ по контуру L остается постоянным для любого L . По мере удаления от сердечника длина контура L возрастает пропорционально расстоянию до центра сердечника r_c , соответственно напряженность индуцированного электрического поля убывает по закону $E \sim 1/r_c$. Таким образом, нагрев электронов ферромагнитно-усиленной ИСП происходит в тороидальном газоразрядном канале, проходящем через газоразрядную трубку и между открытыми торцами трубки. Фактически каждый замкнутый газоразрядный канал L играет роль одиночного вторичного витка электрического трансформатора, при этом сила тока индукционного разряда I и сила тока в первичной обмотке I_1 связаны соотношением $I \approx N_1 I_1$ (N_1 — число витков первичной обмотки). Поскольку применение схемы генерации разряда позволяет стабилизировать и регулировать силу тока в первичной обмотке, сила тока разряда I использовалась в качестве независимого параметра, определяющего остальные электрические характеристики разряда: напряжение U и мощность $P = UI$. Аналогичный подход используется для дуговых и тлеющих разрядов, при этом сила тока разряда также является независимым параметром разряда. Следует отметить, что высокочастотные индукционные разряды с плоским спиральным индуктором характеризуются принципиально иной топологией разряда. В случае высокочастотной ИСП переменное магнитное поле $\mathbf{B}$ пронизывает плазму, индуцируя вихревое электрическое поле $\text{rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B}/\partial t$, ускоряющее электроны. При этом в плазменном объеме невозможно выделить какой-либо характерный газоразрядный канал с силой тока разряда I , поэтому в качестве независимого параметра используется мощность P разряда.

На рис. 3 представлена зависимость напряжения ферромагнитно-усиленного индукционного разряда U от объемной доли кислорода Q_{O_2} в плазмообразующем газе при силе тока разряда $I = 10$ А и давлении в газоразрядной камере $p = 10$ Па. Видно, что увеличение объемной доли кислорода при фиксированном значении силы тока разряда приводит к увеличению напряжения разряда (и соответственно мощности $P = UI$). Как показали резуль-

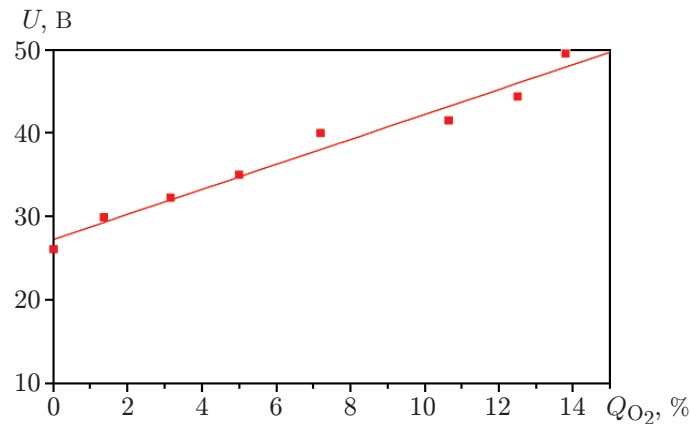


Рис. 3. Зависимость напряжения разряда от объемной доли кислорода в плазмообразующем газе при $p = 10$ Па, $I = 10$ А

таты численного моделирования и зондовых измерений параметров высокочастотной ИСП в смеси O_2 –Ar [17], увеличение объемной доли кислорода при фиксированной мощности высокочастотного индукционного разряда P и постоянном давлении плазмообразующего газа p приводит к существенному уменьшению концентрации электронов n_e вследствие диссоциативного прилипания электронов к молекулам кислорода. Также согласно [17] для заданного состава и давления плазмообразующего газа концентрация электронов возрастает пропорционально мощности разряда ($n_e \sim P$). Таким образом, резкое уменьшение концентрации электронов с увеличением концентрации кислорода может быть компенсировано соответствующим увеличением мощности разряда.

Зондовые измерения параметров высокочастотной ИСП в смеси O_2 –Ar показали, что при $p = 10,6$ Па, $P = 300$ Вт увеличение объемной доли кислорода с 8 до 14 % приводит к уменьшению концентрации электронов в 2,5 раза [17]. Предположим, что аналогичное увеличение объемной доли кислорода в ферромагнитно-усиленной ИСП при $P = 400$ Вт приводит к сопоставимому уменьшению концентрации электронов. В этом случае для поддержания силы тока разряда $I \sim n_e$ должно наблюдаться увеличение напряжения разряда U в два раза. Однако на рис. 3 видно, что при фиксированном значении силы тока разряда и увеличении объемной доли кислорода с 8 до 14 % напряжение и мощность ферромагнитно-усиленного индукционного разряда увеличиваются всего в 1,3 раза. Столь существенное различие характеристик ферромагнитно-усиленной и высокочастотной ИСП может быть обусловлено использованием в данной работе способа распределенной подачи плазмообразующих газов. Поток аргона, подаваемого в газоразрядную трубку, препятствует диффузии молекул электроотрицательного газа, в результате чего объемная доля этого газа в газоразрядной трубке оказывается меньше, чем в основной газоразрядной камере [18]. Соответственно уменьшается как напряженность электрического поля разря-

да E_T в газоразрядной трубке, так и напряжение разряда $U = \oint_L E dl$ (по сравнению со

случаем, когда инертный и электроотрицательный газы подаются вместе). Уменьшение величины E_T позволяет снизить мощность $P_T = E_T I L_T$, потребляемую плазмой в газоразрядной трубке, и увеличить мощность $1 - P_T/P$, вводимую в основную газоразрядную камеру.

На рис. 4 представлены измеренные радиальные распределения плотности ионного тока зондов $j(r)$ для трех различных режимов генерации плазмы: 1) активированы восемь

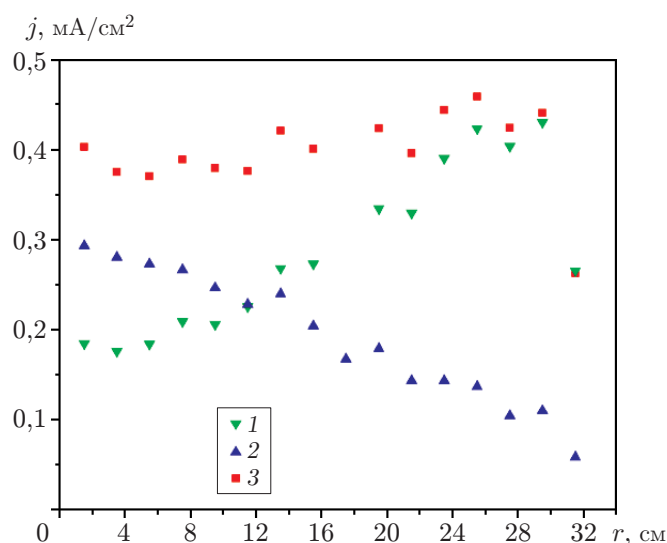


Рис. 4. Зависимость плотности ионного тока зонда от расстояния до центра газоразрядной камеры при $p = 5$ Па, $Q_{O_2} = 18$ % и различных значениях мощности источников плазмы:

1 — $P_{\text{п}} = 3600$ Вт, $P_{\text{ц}} = 0$, 2 — $P_{\text{п}} = 0$, $P_{\text{ц}} = 1500$ Вт, 3 — $P_{\text{п}} = 3600$ Вт, $P_{\text{ц}} = 1500$ Вт

периферийных газоразрядных трубок; 2) активированы две центральные газоразрядные трубки; 3) активированы и боковые, и центральные источники ферромагнитно-усиленной ИСП. На рис. 4 видно, что концентрация ионов достигает максимума вблизи тороидальных газоразрядных каналов и уменьшается по мере удаления от них. Следует отметить, что представленные на рис. 4 данные соответствуют случаю, когда характерная длина релаксации энергии электронов λ_z существенно меньше радиуса газоразрядной камеры R . При этом энергия, полученная электронами в электрическом поле газоразрядного канала E , расходуется на упругие и неупругие процессы локально в газоразрядной трубке и в промежутке между открытыми торцами трубки. Соответственно плазма в основной газоразрядной камере поддерживается за счет амбиполярной диффузии заряженных частиц из газоразрядных каналов, чем обусловлены наблюдаемые спадающие профили концентрации ионов.

Рассмотрим первый режим генерации плазмы, при котором наблюдается уменьшение концентрации ионов в центре газоразрядной камеры. Можно предположить, что в случае $\lambda_z/R \sim 1$ электроны из периферийных газоразрядных каналов проникают в центральную область газоразрядной камеры и ионизируют плазмообразующий газ, вследствие чего возможно выравнивание радиального распределения плотности плазмы. Однако возникающее радиальное распределение потенциала плазмы препятствует прониканию электронов из периферийных газоразрядных каналов в центр основной газоразрядной камеры [10]. Фактически электроны оказываются запертыми в “потенциальной яме” между отрицательно заряженными стенками газоразрядной камеры и областью объемного отрицательного заряда в центре газоразрядной камеры. Соответственно, несмотря на большую длину релаксации энергии электронов λ_z , диссипация энергии электронов происходит локально в области тороидального газоразрядного канала, а радиальные профили концентрации заряженных частиц также имеют минимум в центре основной газоразрядной камеры [10].

На рис. 4 видно, что генерация ферромагнитно-усиленной ИСП над центральной областью газоразрядной камеры позволяет компенсировать уменьшение концентрации заряженных частиц при соотношении значений мощности периферийных и центральных

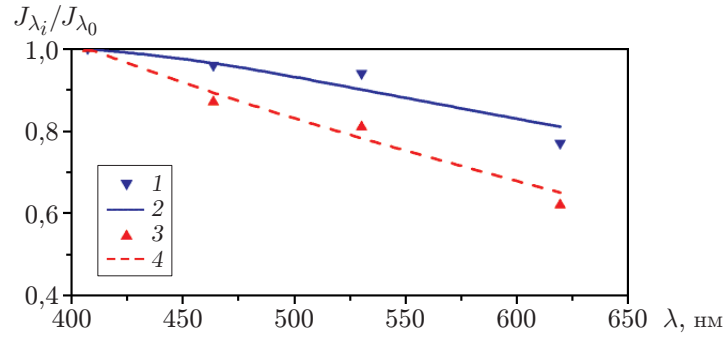


Рис. 5. Зависимость нормированной интенсивности непрерывного спектра излучения разряда от длины волны при $p = 13$ Па, $I = 6$ А, $f = 50$ кГц:
1, 3 — эксперимент (1 — $t/\tau = 0,15$, 3 — $t/\tau = 0,35$), 2, 4 — расчет (2 — $T_э = 1,16$ эВ, 4 — $T_э = 1,69$ эВ)

источников плазмы $P_{\text{п}}/P_{\text{ц}} \approx 2,4$. При этом результирующее распределение 3 оказывается несколько меньше суммы радиальных распределений плотности плазмы 1 и 2. Результаты работы [10] показывают противоположный эффект: при генерации вспомогательного высокочастотного индукционного разряда над центральной областью газоразрядной камеры результирующая плотность плазмы не является прямой суммой плотностей плазмы от периферийных низкочастотных и центрального высокочастотного источников ИСП. Даже при относительно малой мощности вспомогательного высокочастотного индукционного разряда ($P_{\text{п}}/P_{\text{ц}} = 10$) происходила компенсация уменьшения плотности плазмы в центре газоразрядной камеры. Как показали результаты зондовых измерений [10], добавление вспомогательного разряда существенно изменяло радиальное распределение потенциала плазмы и приводило к исчезновению потенциального барьера для электронов в центре газоразрядной камеры. Вследствие большой длины релаксации энергии электронов $\lambda_э \sim R$ возникал поток энергии из периферийных источников плазмы в центр основной газоразрядной камеры. Таким образом, наблюдаемое нелинейное влияние вспомогательного источника плазмы на радиальное распределение концентрации заряженных частиц [10] можно объяснить нелокальной кинетикой электронов в радиальном электрическом поле газоразрядной камеры. В рассматриваемом случае $\lambda_э/R \ll 1$ нелокальный перенос энергии отсутствует и соответственно данный эффект не наблюдается.

На рис. 5 представлены измеренные интенсивности непрерывного спектра $J_{\lambda_i}/J_{\lambda_0}$ для двух моментов времени ($t/\tau = 0,15; 0,35$) при давлении аргона $p = 13$ Па, силе тока разряда $I = 6$ А и частоте тока $f = 50$ кГц. Для сравнения представлены расчетные спектры тормозного излучения (1) для двух значений температуры электронов: $T_э = 1,16; 1,69$ эВ. Наблюдаемое удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментально полученных значений $J_{\lambda_i}/J_{\lambda_0}$ позволяет сделать вывод, что измеряемый непрерывный спектр является спектром тормозного излучения электронов.

На рис. 6 представлены значения температуры электронов $T_э$, при которых наблюдается наилучшее соответствие расчетных и экспериментально полученных значений $J_{\lambda_i}/J_{\lambda_0}$ для различных моментов времени t/τ (при давлении аргона $p = 13$ Па, силе тока разряда $I = 6$ А, частоте тока $f = 50$ кГц). Также на рис. 6 представлены абсолютные значения напряжения разряда $|U(t/\tau)|$. Видно, что температура электронов низкочастотной ИСП испытывает существенные колебания в течение периода колебаний электрического поля разряда τ : достигает максимального значения T_{max} при максимальной напряженности электрического поля и минимального значения T_{min} при переходе напряженности электрического поля разряда через нулевое значение. Наблюдаемые колебания $T_э(t)$ обу-

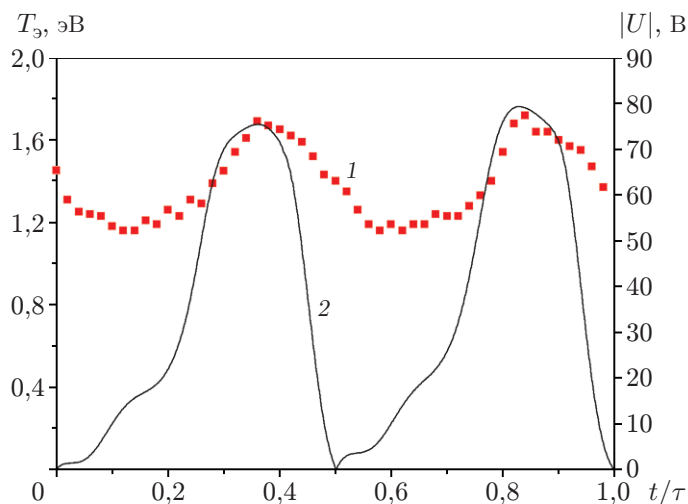


Рис. 6. Зависимости температуры электронов (1) и напряжения разряда (по модулю) (2) от времени при $p = 13$ Па, $I = 6$ А, $f = 50$ кГц

словлены процессом релаксации энергии электронов при упругих и неупругих соударениях с атомами плазмообразующего газа. При низких частотах генерации разряда характерное время релаксации энергии электронов $\tau_e < \tau$, соответственно электроны теряют значительную часть энергии в периоды времени, когда электрическое поле разряда отсутствует или мало. В случае высокочастотных индукционных разрядов $\tau_e > \tau$ и пульсаций температуры электронов не наблюдается [8]. Следует отметить, что положение минимума T_e запаздывает относительно нулевого значения напряженности электрического поля разряда на $\Delta t \approx 2$ мкс. Это обусловлено тем, что относительно небольшие значения напряженности электрического поля разряда не способны компенсировать потерю энергии электронов, вследствие чего температура электронов продолжает уменьшаться и после перехода напряженности электрического поля разряда через нулевое значение.

В результате численного моделирования низкочастотной ИСП при давлении аргона $p = 13$ Па и силе тока разряда $I = 0,1$ А [8] получена качественно аналогичная динамика разряда, включая указанный сдвиг минимума T_e относительно нулевого значения электрического поля разряда. Однако в расчете значение T_e несколько большее ($T_{\max} \approx 3$ эВ), что может быть обусловлено на порядок меньшей плотностью тока разряда. Наличие пульсаций $T_e(t)$ приводит к изменению скоростей возбуждения и ионизации в течение периода разряда, что в свою очередь оказывает влияние на баланс возбужденных и заряженных частиц в плазме разряда. Таким образом, нестационарный характер низкочастотного индукционного разряда может оказывать влияние на состав плазмы и как следствие на процесс ионно-плазменной обработки поверхности материала.

Заключение. В работе исследована генерация низкочастотного индукционного разряда низкого давления с ферромагнитным усилителем магнитной связи между индуктором и плазмой. Ферромагнитно-усиленный индукционный разряд представляет собой электрический трансформатор с замкнутым газоразрядным каналом, играющим роль вторичной обмотки и нагрузки одновременно, что обуславливает специфику его применения в процессах ионно-плазменной обработки поверхности. Несмотря на то что каждый отдельно взятый ферромагнитно-усиленный индукционный разряд характеризуется неравномерным распределением параметров плазмы в объеме газоразрядной камеры, одновременная генерация нескольких разрядов позволяет управлять пространственным распределением параметров плазмы в общей газоразрядной камере. Особый интерес представляет иссле-

дование низких давлений плазмообразующего газа, при которых возможен нелокальный перенос энергии электронов из области газоразрядного канала в центральную область газоразрядной камеры. Также представляет интерес изучение газодинамических процессов, происходящих при раздельном введении инертного и химически активного плазмообразующего газов в объем газоразрядной камеры и приводящих к изменению пространственного распределения параметров плазмы в объеме газоразрядной камеры. Трансформаторный принцип генерации разряда позволяет существенно (на 2–3 порядка) уменьшить частоту тока индукционного разряда. Генерация индуктивно связанной плазмы в низкочастотном радиодиапазоне на частотах, меньших характерной частоты релаксации энергии электронов, обуславливает нестационарный характер происходящих в плазме процессов, что также оказывает влияние на характеристики разряда. Указанные выше особенности ферромагнитно-усиленных индукционных разрядов обуславливают их отличие от “стандартных” высокочастотных индукционных разрядов и должны учитываться при создании на их основе новых устройств для ионно-плазменной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Godyak V., Chung C.-W.** Distributed ferromagnetic inductively coupled plasma as an alternative plasma processing tool // *Japan. J. Appl. Phys.* 2006. V. 45, N 10B. P. 8035–8041.
2. **Попов О. А., Чандлер Р. Т.** Индуктивный источник света трансформаторного типа на частотах 150–400 кГц мощностью 200–500 Вт // *Теплофизика высоких температур.* 2007. Т. 45, № 5. С. 795–800.
3. **Ulanov I. M., Isupov M. V., Litvinsev A. Yu.** Experimental study of transformer-coupled toroidal discharge in mercury vapour // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2007. V. 40. P. 4561–4567.
4. **Левченко В. А., Попов О. А., Свитнев С. А., Старшинов П. В.** Электрические и излучательные характеристики лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой диаметром 16,6 мм // *Светотехника.* 2016. № 1. С. 41–44.
5. **Коган В. А., Уланов И. М.** Исследование возможности создания плазмотронов трансформаторного типа // *Теплофизика высоких температур.* 1993. Т. 31, № 1. С. 105–110.
6. **Shabalín A.** High-pressure operation of a toroidal, inductively coupled discharge // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2004. V. 13, N 4. P. 588–593.
7. **Исупов М. В., Литвинцев А. Ю.** Исследование генерации низкочастотного индукционного разряда атмосферного давления // *ПМТФ.* 2021. Т. 62, № 4. С. 80–87.
8. **Kolobov V., Godyak V.** Inductively coupled plasmas at low driving frequencies // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2017. V. 26. 075013.
9. **Lee K., Lee Y., Jo S., et al.** Characterization of a side-type ferrite inductively coupled plasma source for large-scale processing // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2008. V. 17. 015014.
10. **Bang J.-Y., Kim J.-Y., Chung C.-W.** Electron energy flux control using dual power in side-type inductively coupled plasma // *Phys. Plasmas.* 2011. V. 18. 073507.
11. **Kim H. J., Hwang H.-J., Kim D. H., et al.** On uniform plasma generation for the large area plasma processing in intermediate pressures // *J. Appl. Phys.* 2015. V. 117. 153302.
12. **Han D., Lee H.-C., Bang J.-Y., et al.** Measurements of the spatially resolved electron temperature and plasma potential in ferrite-core side type Ar/He inductively-coupled plasmas // *Current Appl. Phys.* 2015. V. 15. P. 1036–1041.
13. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда. М.: Интеллект, 2009.
14. **Каган Ю. М., Христов Н. Н.** Об использовании сплошного спектра гелия для диагностики плазмы среднего давления // *Оптика и спектроскопия.* 1969. Т. 27, № 4. С. 710–711.

15. **Rutscher A., Pfau S.** On the origin of visible continuum radiation in rare gas glow discharge // Physica. 1976. V. 81C. P. 395–402.
16. **Pinaev V. A., Isupov M. V.** Gas-discharge plasma diagnostics by a continuous spectrum of optical radiation // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1677. 012146.
17. **Liu W., Wen D.-Q., Zhao S.-X., et al.** Characterization of O₂/Ar inductively coupled plasma studied by using a Langmuir probe and global model // Plasma Sources Sci. Technol. 2015. V. 24. 025035.
18. **Sukhinin G. I., Isupov M. V., Fedoseev A. V., Yudin I. B.** Development of a distributed ferromagnetic enhanced inductively coupled plasma source for plasma processing // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1243. 012004.

*Поступила в редакцию 30/V 2023 г.,
после доработки — 13/VI 2023 г.
Принята к публикации 26/VI 2023 г.*
