

УДК 537.525.72, 537.525

## Экспериментальное и теоретическое исследование низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа\*

М.В. Исупов, А.В. Федосеев, Г.И. Сухинин, **И.М. Уланов**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: isupovmikhail@yandex.ru

Изучены электрофизические и теплофизические характеристики низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа в аргоне в широком диапазоне параметров разряда: плотностей тока разряда — 0,1–0,8 А/см<sup>2</sup>, давлений аргона — 15–6000 Па. Разработана упрощенная модель низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа, основанная на одновременном решении уравнения баланса электронов и метастабильных атомов на оси газоразрядной трубки, уравнений баланса для температуры газа и энергии электронов. Выполнен расчет зависимости напряженности электрического поля низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа от давления аргона и тока разряда. Показано, что результаты расчетов хорошо совпадают с результатами измерений и описывают их основные особенности: падающую вольтамперную характеристику разряда и наличие локального минимума в зависимости напряженности электрического поля от давления.

**Ключевые слова:** низкотемпературная плазма, индукционный разряд, электронная и ионная кинетика.

### Введение

Обладая рядом принципиальных преимуществ перед электродными газоразрядными устройствами (большой срок службы, высокая чистота плазмы, в том числе агрессивных химических соединений, отсутствие ограничений на силу тока разряда), безэлектродные индукционные газоразрядные устройства [1] активно применяются в широком спектре технологических процессов и промышленных технологий, например, для плазмохимического синтеза, ионно-плазменной обработки поверхности материалов, для осаждения тонких пленок, в качестве источников оптического излучения и т.д., поэтому задача повышения эффективности индукционных газоразрядных устройств является актуальной.

К основным недостаткам, существенно затрудняющим практическое применение «классических» высокочастотных (ВЧ) индукционных разрядов с плоским и соленоидальным индукторами, можно отнести высокую частоту тока разряда (~1–10 МГц), необходимость применения дорогостоящих специализированных ВЧ источников питания, невысокий коэффициент магнитной связи между индуктором и газовым разрядом ( $k \approx 0,2–0,7$ ) и, следовательно, плохое согласование между источником питания и нагрузкой,

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-08-00526-а).

а также влияние паразитной емкостной связи между витками индуктора на плазму индукционного разряда. Последнее обстоятельство особенно важно в технологиях плазменной обработки пластин кремния для микроэлектроники. Ионы газоразрядной плазмы ускоряются в электрическом поле, возникающем между витками индуктора, бомбардируют и разрушают стенки газоразрядной камеры, что при обработке полупроводниковых материалов крайне нежелательно. Это существенно затрудняет задачу получения больших объемов однородной плазмы для плазменной обработки пластин кремния нового поколения (диаметром 450 мм).

Однако все вышеупомянутые недостатки классических индукционных разрядов (высокая частота генерации, плохая связь между индуктором и газовым разрядом, нежелательное влияние межвитковой емкостной связи на плазму) могут быть устранены за счет перехода к низкочастотному индукционному разряду трансформаторного типа [2–4].

Низкочастотный индукционный разряд трансформаторного типа (рис. 1) представляет собой замкнутый плазменный виток (1), индуктивно связанный с первичной обмоткой (3) замкнутым ферромагнитным сердечником (2). Следует особо отметить, что несмотря на индукционный принцип генерации данный тороидальный плазменный виток гораздо ближе к обычному положительному столбу газового разряда, чем к классическим ВЧ индукционным разрядам. Как и в обычном газовом разряде, электрический ток в данном плазменном витке направлен продольно оси газоразрядной камеры, а не азимутально, как в ВЧ индукционном разряде.

Напряженность вихревого электрического поля  $E(t)$ , поддерживающего «горение» плазменного витка, связана с переменным магнитным потоком в магнитном сердечнике  $\Phi(t)$  выражением

$$\oint_L E dl = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad \Phi = \mu\mu_0 H_m S e^{i\omega t}, \quad (1)$$

где  $L$  — периметр плазменного витка,  $\mu$  — магнитная проницаемость ферромагнетика,  $\omega$  — круговая частота тока,  $H_m$  — напряженность магнитного поля в сердечнике,  $S$  — сечение сердечника.

Использование замкнутых ферромагнитных сердечников с высокой магнитной проницаемостью ( $\mu \sim 10^2 - 10^3$ ) обеспечивает хорошую магнитную связь ( $k \approx 1$ ) между газовым разрядом и первичной обмоткой, улучшает согласование между источником питания и газовым разрядом и позволяет существенно (на два–три порядка) снизить частоту генерации индукционного разряда [2–4] и, соответственно, использовать массово выпускаемые дешевые источники питания для индукционного нагрева металлов с частотой тока  $\sim 50 - 100$  кГц.

Поскольку в низкочастотном индукционном разряде индуктор (первичная обмотка) и газовый разряд разнесены в пространстве, эффекты межвитковой емкостной связи никак не сказываются на самом индукционном разряде, что крайне важно для создания новых устройств ионно-плазменной обработки полупроводниковых материалов.

Таким образом, благодаря большому сроку службы, возможности получения чистой плазмы, низкой частоте генерации разряда, хорошему согласованию между разрядом и

источником питания, отсутствию эффектов межвитковой емкостной связи, низкочастотные индукционные разряды трансформаторного типа представляют большой

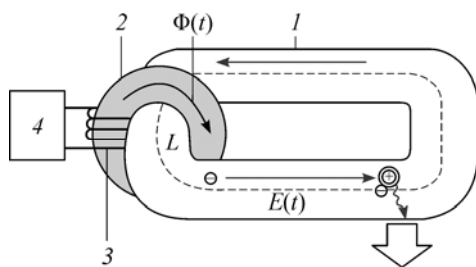


Рис. 1. Схема низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа.

1 — газоразрядная камера, 2 — магнитопровод, 3 — первичная обмотка, 4 — источник питания.

интерес для создания на их основе новых безэлектродных газоразрядных устройств для широкого спектра практических приложений, таких как источники света, плазмотроны атмосферного давления для плазмохимических реакций, газоразрядные устройства низкого давления для ионно-плазменной обработки, осаждения пленок, плазменного травления и т.д.

Однако в настоящее время существует большой пробел в экспериментальном и, в особенности, в теоретическом описании низкочастотных индукционных разрядов трансформаторного типа. Отсутствие достоверных теоретических моделей не позволяет выполнять численные расчеты и оптимизировать разрабатываемые газоразрядные устройства на базе низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа. В свою очередь, пробелы в экспериментальных данных о характеристиках низкочастотных индукционных разрядов трансформаторного типа не дают возможности верифицировать разрабатываемые модели.

Целью настоящей работы являлось проведение экспериментальных исследований низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа в аргоне, получение новых экспериментальных данных об электрофизических характеристиках разряда и разработка упрощенной квазиодномерной модели низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа, позволяющей наиболее наглядным и простым способом выполнять расчет электрофизических и теплофизических характеристик разряда.

### 1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

Кварцевая газоразрядная камера (1) имела внутренний диаметр  $D = 35$  мм и периметр по средней линии  $L = 50$  см, ферритовый сердечник (2) имел три витка первичной обмотки (3), первичная обмотка была подключена к источнику питания (5) с выходным напряжением 500 В и частотой тока 100 кГц через блок согласования (4), представлявший собой перестраиваемый LC контур. Ток разряда измерялся с помощью трансформатора тока (6), полное напряжение на разряде измерялось с помощью измерительного витка (7), напряженность электрического поля  $E$  определялась как отношение напряжения на разряде  $U$  к длине плазменного витка  $L$ :  $E = U/L$ , плотность тока разряда  $j$  определялась как отношение тока разряда  $I$  и сечения газоразрядной трубки  $S$ :  $j = I/S$ . Для откачки системы использовался форвакуумный насос (9), соединенный с азотной ловушкой (8). Для обеспечения высокой чистоты плазмообразующего газа эксперименты проводились при непрерывном протоке аргона через газоразрядную камеру. Давление аргона регулировалось изменением его расхода с помощью натекателя.

Эквивалентная электрическая схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Схема включает в себя источник питания (1), блок согласования (2) и низкочастотный индукционный разряд трансформаторного типа (3), где роль вторичной обмотки играет плазменный виток. Блок согласования (2) состоит из регулируемого

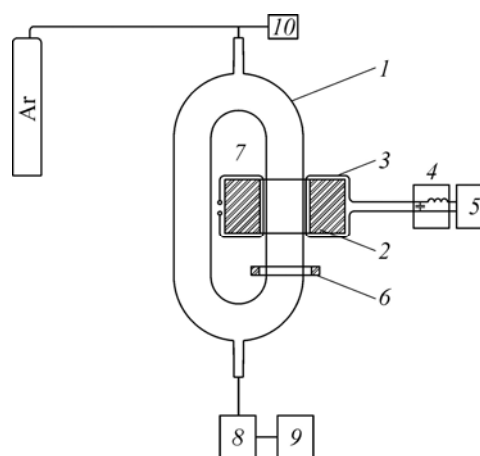


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

1 — газоразрядная трубка, 2 — магнитопровод, 3 — первичная обмотка, 4 — блок согласования, 5 — источник питания, 6 — трансформатор тока, 7 — измерительный виток, 8 — азотная ловушка, 9 — форвакуумный насос, 10 — вакуумметр.

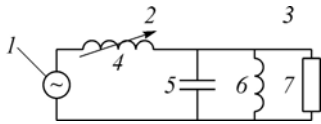


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема установки.

1 — источник питания (100 кГц, 500 В), 2 — блок согласования, 3 — низкочастотный индукционный разряд (эквивалентная схема), 4 — дроссель блока согласования  $L_{др}$ , 5 — емкость блока согласования  $C$ , 6 — индуктивность первичной обмотки  $L_{обм}$ , 7 — сопротивление.

дросселя  $L_{др}$  (4) и конденсатора  $C$  (5). Низкочастотный индукционный разряд трансформаторного типа (3) можно представить в виде индуктивности первичной обмотки трансформатора  $L_{обм}$  (6), включенной параллельно его сопротивлению  $R$  (7). В режиме холостого хода (без индукционного разряда)  $R \gg \omega L_{обм}$ , в этом случае сопротивление определяется только тепловыми потерями в сердечнике и для идеального трансформатора стремится к бесконечности. Когда индукционный разряд «горит»,  $R \approx N^2 R_{пл}$ , где  $N$  — число витков первичной обмотки,  $R_{пл}$  — сопротивление плазменного витка.

Емкость  $C$  выбирается таким образом, чтобы полностью скомпенсировать индуктивность первичной обмотки и образовать вместе с дросселем  $L_{др}$  резонансный контур, позволяющий получить в момент запуска повышенное напряжение, необходимое для зажигания разряда (резонансная схема зажигания газового разряда).

После зажигания разряда в газоразрядной камере возникает замкнутый плазменный виток с  $R_{пл} \sim 10 \Omega$ , и дроссель блока согласования  $L_{др}$  начинает играть роль электрического балласта, стабилизирующего и регулирующего ток разряда.

## 2. Экспериментальные результаты

Как видно из выражения (1), сечение магнитопровода  $S$ , требуемое для поддержания горения низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа, прямо пропорционально напряженности электрического поля  $E$ . Поэтому для оптимизации размера магнитопровода и минимизации тепловых потерь в нем необходимо знать зависимость напряженности электрического поля от параметров разряда. Соответственно была измерена зависимость напряженности электрического поля низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа с частотой тока 100 кГц и диаметром газоразрядной трубки 35 мм от тока разряда и давления аргона для тока разряда 1–8 А и давления аргона 15–6000 Па (рис. 4). Для сравнения представлены литературные данные [5] для индукционного разряда трансформаторного типа с частотой тока 450 кГц и диаметром газоразрядной трубки 50 мм. По сравнению с известными экспериментальными данными полученные экспериментальные данные охватывают более высокую область давлений аргона до 6000 Па.

Из рис. 4 видно, что с увеличением силы тока разряда напряженность электрического поля низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа уменьшается, тогда как для зависимости напряженности электрического поля от давления существует локальный минимум при давлениях аргона  $\sim 100$ –200 Па.

Наличие локального минимума напряженности электрического поля может быть

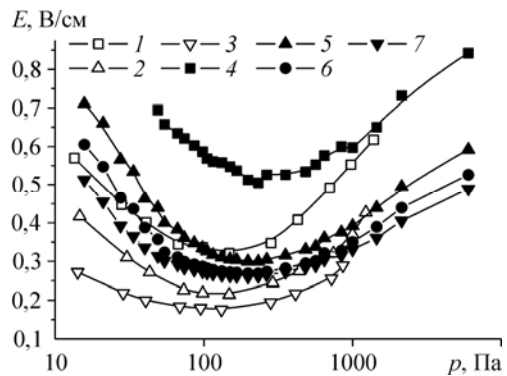


Рис. 4. Зависимость напряженности электрического поля от давления аргона для разных токов разряда.

Ток разряда: 1А (1), 3А (2), 10А (3) — данные работы [5], 1А (4), 3А (5), 5А (6), 8А (7) — данные настоящей работы.

качественно объяснено тем, что с увеличением концентрации атомов аргона  $N$  потери энергии на пристеночную рекомбинацию заряженных частиц и гибель метастабильных атомов уменьшаются пропорционально  $1/N$ , тогда как потери энергии в упругих соударениях электронов с атомами возрастают пропорционально  $N$ . Совместное действие этих двух противоположных процессов и приводит к появлению локального минимума в зависимости напряженности электрического поля от давления.

Как видно на рис. 4, минимальное значение напряженности электрического поля для исследуемого разряда с диаметром газоразрядной трубки 35 мм в 1,5 раза выше по сравнению с напряженностью электрического поля разряда в газоразрядной трубке диаметром 50 мм [5]. Это связано с тем, что потери заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии зависят от диаметра трубки пропорционально  $1/D^2$ . Чем меньше диаметр трубки, тем больше потери частиц на стенках и, соответственно, тем выше напряженность электрического поля, чтобы компенсировать эти потери.

С увеличением тока разряда напряженность электрического поля уменьшается, демонстрируя типичную для газовых разрядов падающую вольт-амперную характеристику. Поэтому для стабилизации тока низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа необходимо использовать дроссель (рис. 3).

### 3. Численная модель и результаты расчетов

Известна математическая модель низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа [6, 7], в которой характеристики разряда описываются в рамках двухтемпературного магнитогазодинамического приближения плазмы. Рассматривается и анализируется случай средних давлений аргона (7000 Па) и больших плотностей тока разряда ( $5 \text{ А/см}^2$ ). Однако для исследуемых низких давлений аргона ( $\sim 10\text{--}6000 \text{ Па}$ ) и относительно невысоких плотностей тока ( $\sim 0,1\text{--}1 \text{ А/см}^2$ ) необходимо использовать кинетический подход, учитывая все основные элементарные процессы в плазме разряда.

Для того чтобы понять, какие основные физические процессы играют наиболее важную роль в низкочастотном индукционном разряде трансформаторного типа, была разработана следующая упрощенная модель. Плазма газового разряда предполагается стационарной, однородной в продольном направлении и цилиндрически симметричной. Модель основывается на одновременном решении балансных уравнений для плотности электронов и метастабильных атомов аргона, уравнений баланса энергии электронов и температуры газа. Для простоты рассматривались только локальные параметры плазмы на оси разрядной трубки, однако учитывался уход электронов и метастабильных атомов аргона на стенки разрядной трубки в процессах радиальной диффузии. Так же рассматривалась теплопроводность газа и уход тепла на стенки трубки. В рассматриваемой модели мы предполагаем, что функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ)  $f(U)$  является максвелловской ( $U$  — кинетическая энергия электронов). На начальном этапе сделанный ряд упрощений и приближений оправдан тем, что заранее неизвестно, какие из многочисленных процессов имеют наибольшее значение в таком широком диапазоне параметров (ток разряда меняется на порядок и давление разряда меняется на четыре порядка). Кроме того, в будущем планируется учесть радиальные зависимости параметров разряда аналогично моделям [8–12], но с учетом особенностей низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа.

Плотность электронов  $n_e$  и плотность энергии электронов  $u_e$  определяются интегралами функции распределения электронов по энергии следующим образом:

$$n_e = \int_0^{\infty} U^{1/2} f(U) dU, \quad (2)$$

$$u_e = \int_0^{\infty} U^{3/2} f(U) dU. \quad (3)$$

Аксиальная компонента плотности потока электронов  $j_z$  имеет вид:

$$j_z = \frac{1}{3} e_0 E \sqrt{2/m_e} \int_0^{\infty} \frac{U}{H(U)} \frac{\partial f(U)}{\partial U} dU, \quad (4)$$

где  $E$  — аксиальная компонента электрического поля,  $H(U) = N_g Q^d(U) + \sum_k N_g Q_k^{\text{in}}(U)$  — суммарное сечение потери импульса электронов в столкновениях с атомами,  $N_g$  — плотность атомов газа,  $Q^d$  и  $Q_k^{\text{in}}$  — сечения рассеяния электронов в упругих и неупругих столкновениях с атомами газа [13, 14]. Полный разрядный ток  $I = 2\pi R^2 e_0 j_z$ , где  $R$  — радиус разрядной трубки.

Уравнение баланса энергии электронов имеет вид:

$$\partial u_e / \partial t = P_f - P^{\text{el}} - \sum_k P_k^{\text{in}} - 2\pi R j_r \varepsilon_w + k_{\text{mm}} N_m^2 \cdot \varepsilon_{\text{mm}}, \quad (5)$$

где энергия, полученная электронами в электрическом поле,

$$P_f = -e_0 j_z E_z, \quad (6)$$

потери энергии в упругих столкновениях

$$P^{\text{el}} = 2 \frac{m_e}{M} \sqrt{2/m_e} \int_0^{\infty} U^2 N_g Q^d(U) f(U) dU \quad (7)$$

и в различных неупругих столкновениях

$$P_k^{\text{in}} = U_k^{\text{in}} \sqrt{2/m_e} \int_0^{\infty} U N_g Q_k^{\text{in}} f(U) dU. \quad (8)$$

Член  $2\pi R j_r \varepsilon_w$  обозначает поток энергии электронов на стенку разрядной трубки, которая уносится вместе с потоком электронов. Здесь  $j_r$  — радиальная плотность потока электронов,  $\varepsilon_w$  — потенциал поверхности стенки трубки относительно оси разрядной трубки. Предполагается, что только электроны с энергией выше  $\varepsilon_w$  могут преодолеть радиальный потенциал разряда и достичь стенок разрядной трубки. Последний член в уравнении (5) описывает прирост энергии электронов ( $\varepsilon_{\text{mm}}$ ), выделяемой при столкновении двух метастабильных атомов аргона.

Уравнение баланса для плотности электронов  $n_e$  на оси разрядной трубки имеет вид:

$$\partial n_e / \partial t = k_{\text{ig}} n_e N_g + k_{\text{em}} n_e N_m + k_{\text{mm}} N_m^2 - k_{\text{rec}} n_e n_i - n_e D_a (2, 4/R)^2, \quad (9)$$

где  $k_{\text{ig}}$  — константа ионизации прямым электронным ударом,  $k_{\text{em}}$  — константа ступенчатой ионизации из метастабильного атома аргона,  $k_{\text{mm}}$  — константа пеннинговской ионизации при столкновении двух метастабильных атомов аргона,  $k_{\text{rec}}$  — константа радиационной рекомбинации при столкновении электрона и иона,  $n_i$  — плотность ионов,  $D_a$  — коэффициент амбиполярной диффузии электронов и ионов на стенку разрядной трубки. Предполагается условие квазинейтральности разрядного промежутка, т.е. равенство плотностей электронов и ионов.

Уравнение баланса метастабильных атомов аргона, где  $N_m$  — плотность метастабильных атомов аргона на оси разрядной трубки, рассматривалось в следующем виде:

$$\begin{aligned} \partial N_m / \partial t = & k_{im} n_e N_g + k_{rec} n_e n_i - k_{em} n_e N_m - 2k_{mm} N_m^2 - \\ & - N_m D_m (2,4/R)^2 - k_{2B} N_m N_g - k_{3B} N_m N_g^2, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $k_{im}$  — константа возбуждения метастабильного состояния аргона электронным ударом,  $D_m$  — коэффициент диффузии метастабильей,  $k_{2B}$  и  $k_{3B}$  — константы двухчастичной и трехчастичной рекомбинации. Константы  $k_{ig}$ ,  $k_{em}$ ,  $k_{im}$  рассчитывались интегрированием ФРЭЭ с соответствующими сечениями процессов. Остальные константы и коэффициенты были взяты из работ [13–17].

В работе учитывались нагрев газа электрическим током и охлаждение газа стенками трубки. Для этого использовалось уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \kappa_g(T_g) \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) = P_{el}(r), \quad (11)$$

где коэффициент теплопроводности был взят в виде  $\kappa_g(T_g) = 4,17 \cdot 10^{-6} T_g^{2/3}$  [Вт/(см·К<sup>5/3</sup>)] [10]. На оси разрядной трубки предполагается условие  $dT_g/dr = 0$ , а на стенке трубки температура газа равна температуре стенки  $T_g = T_w = 300$  К. Уравнение (11) решалось итерациями с поправкой зависимости  $\kappa_g(T_g)$  на каждой итерации. В правой части уравнения (11) предполагалось, что нагрев газа в упругих столкновениях электронов с атомами газа  $P_{el}(r)$  имеет радиальную зависимость, так как у плотности газа  $N_g(r)$  и плотности электронов  $n_e(r)$  есть радиальный профиль. Для простоты предполагалось, что плотность электронов имеет распределение Бесселя по радиусу. Необходимо отметить, что нагрев газа имеет большое влияние на получаемые параметры плазмы разряда, особенно при больших разрядных токах и давлениях газа. Нагрев газа приводит к неравномерному радиальному распределению плотности газа  $N_g(r)$  по сечению разрядной трубки в соответствии с выражением

$$N_g(r) = \frac{P}{k_B T_g(r)}, \quad (12)$$

поскольку всюду в разрядной трубке вырабатывается постоянное давление. Необходимо отметить, что в уравнениях (2–10) использовалось значение  $\langle N_g \rangle$ , полученное усреднением выражения (12) по сечению разрядной трубки.

В качестве обратной связи между током разряда и напряженностью электрического поля использовался аналог закона Ома. Если рассчитанное значение электрического тока оказывалось меньше необходимого заданного значения, то электрическое поле увеличивалось, и наоборот. Таким образом, были получены вольт-амперные характеристики разряда.

Балансные уравнения (5), (9), (10), (11) решались совместно методом релаксации, начиная с некоторых начальных условий. Вначале задавались максвелловская ФРЭЭ с некоторым значением средней температуры электронов  $T_e$  и плотности электронов  $n_e$  и некоторое значение плотности метастабильных атомов аргона  $N_m$ . В результате расчета для заданных параметров разряда (тока разряда и давления газа) был получен конечный набор параметров разряда (плотность электронов и метастабильных атомов аргона, а также скорости всех рассматриваемых процессов), который не зависел от выбора начальных условий. В конце расчета все балансные уравнения полностью выполнялись в соответствии со стационарным состоянием.

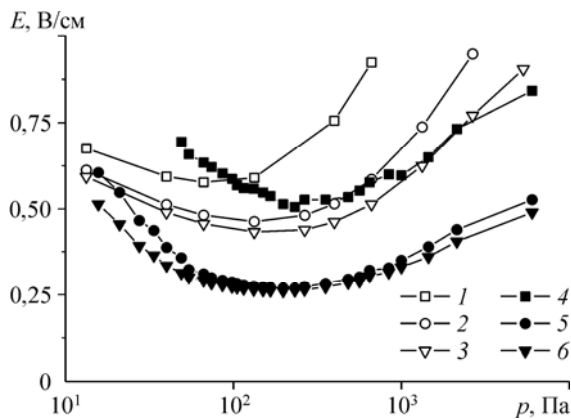


Рис. 5. Напряженность электрического поля  $E$  в зависимости от давления разряда  $p$  при различных значениях тока разряда  $I$ .

Светлые символы — численные расчеты, темные — экспериментальные результаты; ток разряда: 1А (1), 5А (2), 8А (3), 1А (4), 5А (5), 8А (6).

На рис. 5 представлены результаты численных расчетов зависимости напряженности электрического поля от плотности газа при различных токах разряда ( $I = 1, 5, 8$  А). Видно, что во всем диапазоне давлений  $p \sim 10-10^4$  Па полученные расчетные и экспериментальные зависимости имеют следующие схожие принципиальные характеристики:

– вольт-амперные характеристики показывают отрицательное сопротивление низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа;

– в зависимостях напряженности электрического поля от давления наблюдаются минимумы;

– абсолютные значения напряженности электрического поля лежат в диапазоне 0,25–1 В/см во всем диапазоне давления газа.

– абсолютные значения напряженности электрического поля лежат в диапазоне 0,25–1 В/см во всем диапазоне давления газа.

На рис. 6 представлен вклад слагаемых в уравнение баланса плотности электронов (9) для тока разряда  $I = 5$  А. Видно, что при низком давлении аргона ионизация прямым ударом играет основную роль в процессе прироста числа электронов. При высоких давлениях начинает доминировать ступенчатая ионизация из метастабильных атомов аргона. Гибель частиц на стенках разрядной трубки существенна при низких давлениях, а при высоких давлениях большую роль играет объемная рекомбинация. Объемная рекомбинация также растет с ростом тока разряда. Стоит отметить, что плотность электронов  $n_e$  является практически линейной функцией разрядного тока  $I$ . Для заданного значения тока разряда плотность электронов увеличивается монотонно с давлением газа, в то время как плотность метастабильных атомов аргона имеет минимум в зависимости от давления. Минимальное значение плотности электронов  $n_e \sim 10^{11}$  см<sup>-3</sup> при токе разряда  $I = 1$  А

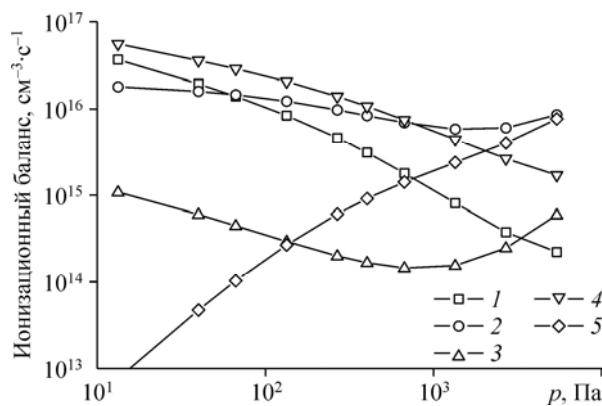


Рис. 6. Ионизационный баланс в зависимости от давления аргона (ток разряда 5 А).

1 — прямая ионизация, 2 — ступенчатая ионизация, 3 — пеннинговская ионизация, 4 — гибель на стенках, 5 — объемная рекомбинация.



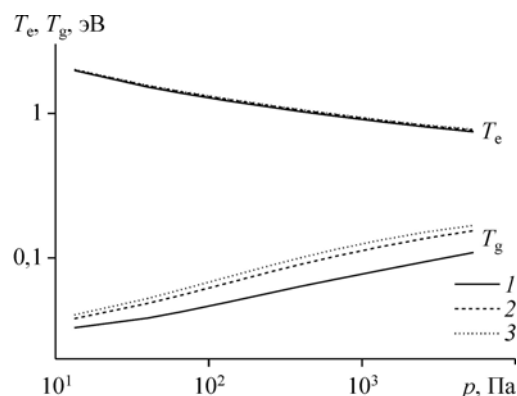


Рис. 7. Средняя температура электронов  $T_e$  и температура газа  $T_g$  в зависимости от давления аргона при различных токах разряда.  
1А (1), 5А (2), 8А (3).

и давлении аргона  $p = 10$  Па, а максимальное значение  $n_e \sim 8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при  $I = 8$  А,  $p = 5000$  Па. Плотность метастабильных атомов аргона имеет порядок  $N_m \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$  во всем диапазоне рассматриваемых параметров разряда.

На рис. 7 представлена зависимость температуры электронов  $T_e$  и температуры газа  $T_g$  от давления аргона. Видно, что средняя температура электронов слабо убывает с ростом давления газа, а температура газа растет от значений  $T_w = 0,03$  эВ при низких давлениях и токах разряда до значений порядка  $\langle T_g \rangle \sim 0,18$  эВ при давлении аргона  $p = 5000$  Па и токе разряда  $I = 8$  А. С ростом давления газа и тока разряда отношение температуры электронов и температуры газа существенно уменьшается.

#### 4. Обсуждение

Как уже упоминалось выше, низкочастотный индукционный разряд трансформаторного типа является своеобразным аналогом обычного положительного столба газового разряда, у которого нет электродов и других областей газового разряда. Как и в обычном электродном газовом разряде, в низкочастотном индукционном разряде трансформаторного типа ток направлен аксиально, а не азимутально, как в ВЧ индукционных разрядах с плоским и соленоидальным индуктором. Поэтому существующие модели ВЧ индукционных разрядов не пригодны для описания низкочастотных индукционных разрядов трансформаторного типа, а численный расчет должен проводиться аналогично численному расчету положительного столба.

Известен ряд моделей, описывающих положительный столб газового разряда низкого давления при токах разряда существенно менее 1 А [10, 11, 15]. Интерес к диапазону токов разряда  $\sim 0,1$ –1 А обусловлен в частности тем, что характерные значения силы тока в газовых разрядах низкого давления как правило не превышают нескольких сотен миллиампер, поскольку длительный срок службы газоразрядных электродов при низком давлении может быть достигнут только при малых токах разряда. Низкочастотный индукционный разряд трансформаторного типа отличается от тлеющих разрядов тем, что не имеет электродов, поэтому сила тока разряда не ограничена процессами разрушения электродов и может варьироваться от единиц до десятков ампер и выше. В этих условиях, как было показано в работе [8], стандартные модели, разработанные для положительного столба тлеющего разряда, могут давать результаты, существенно отличающиеся от результатов экспериментальных исследований.

Таким образом, ранее разработанные модели, теории и расчетные программы оказываются непригодными для расчета характеристик низкочастотных индукционных разрядов трансформаторного типа. Для разработки новой модели низкочастотного

индукционного разряда трансформаторного типа необходимо глубже понять физику разряда, выявить основные процессы, определяющие характеристики исследуемого разряда.

Настоящая работа посвящена разработке численной модели, основанной на решении уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям в цилиндрически симметричной газоразрядной трубке в широком диапазоне давлений аргона и токов разряда. Для точного описания исследуемого разряда модель должна учитывать широкий спектр процессов возбуждения и тушения атомов аргона, процессы прямой, ступенчатой и пеннинговской ионизации, процессы диффузии заряженных и возбужденных частиц к стенкам газоразрядной трубки (и гибели на стенках), процессы объемной рекомбинации, электрон-электронные столкновения и т.д. При этом необходимо учитывать радиальные распределения всех параметров плазмы: концентрации нейтральных, возбужденных и заряженных частиц, температуры электронов, температуры газа и т.д.

Широкий диапазон исследуемых в эксперименте давлений аргона и токов разряда требует, чтобы разрабатываемая модель была очень гибкой. В предельном случае низких давлений и малых токов ( $p < 100$  Па,  $I \sim 0,1-1$  А) необходимо описывать разряд в условиях, близких к условиям тлеющих разрядов низкого давления. В этом случае доминирующим механизмом потерь заряженных частиц и метастабильных атомов является гибель на стенках газоразрядной трубки, плазма неравновесна, а ФРЭЭ может сильно отличаться от максвелловской функции распределения.

В другом предельном случае при давлении аргона  $p > 10$  Тор и токе разряда  $I > 1$  А в газовом разряде реализуются условия, близкие к условиям в контрагированном дуговом разряде. В этом случае основным механизмом потерь заряженных частиц является объемная рекомбинация, отрыв температуры электронов от температуры нейтральных частиц существенно уменьшается, нагрев газа приводит к заметному уменьшению концентрации атомов на оси разрядной трубки, а электрон-электронные столкновения приводят к максвеллизации ФРЭЭ.

В настоящей работе для выявления основных, ключевых особенностей разрабатываемой модели низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа были сделаны следующие упрощения: ФРЭЭ была аппроксимирована максвелловской функцией распределения во всем диапазоне исследованных параметров, а реальные радиальные распределения параметров плазмы были заменены их усредненными значениями по радиусу газоразрядной трубки.

Как видно из рис. 5, расчетная зависимость  $E(p)$  коррелирует с экспериментальными данными. Как расчетные, так и экспериментальные значения напряженности электрического поля низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа лежат в диапазоне 0,25–1 В/см. Расчетная зависимость  $E(p)$  имеет минимум в диапазоне давлений  $\sim 100-200$  Па, что также соответствует результатам экспериментов. Как и для экспериментальных данных, расчетная напряженность электрического поля уменьшается с ростом тока разряда (падающая вольт-амперная характеристика). Необходимо отметить, что столь хорошее совпадение экспериментальных и теоретических данных достигнуто при использовании упрощенной модели, основанной на ряде существенных допущений (предположение о максвелловской ФРЭЭ, переход от реальных радиальных распределений к их усредненным значениям). Также необходимо отметить, что правая “ветвь” расчетной зависимости  $E(p)$  (при давлениях выше 1 кПа) возрастает с увеличением давления существенно быстрее, чем правая “ветвь” экспериментальной зависимости. Это может быть обусловлено тем, что в расчетах не учитываются реальные радиальные профили параметров плазмы и, в частности, эффект контрагирования разряда при увеличении давления аргона. На рис. 6 показаны основные каналы ионизационного баланса. Из рис. 6 видно, что в области низких давлений основным каналом рождения электронов является прямая ионизация, а основным каналом гибели — потери на стенках газоразрядной трубки. В этом случае радиальное распределение плотности электронов вероятнее всего описывается функцией Бесселя (что и заложено в неявном виде в модель).

При высоких давлениях основным каналом гибели заряженных частиц является объемная рекомбинация электронов на молекулярных ионах  $\text{Ar}_2^+$ , образующихся в результате конверсии атомарных ионов [10], а основным каналом рождения — ступенчатая ионизация (рис. 6). В этом случае следует ожидать появления эффекта контрагирования разряда — заряженные частицы не успевают дойти до стенки газоразрядной трубки, рекомбинируя в объеме и формируя токопроводящий (контрагированный) канал, что не учитывается в рамках нашей упрощенной модели и должно привести к более точному совпадению между расчетными и экспериментальными данными.

С увеличением силы тока разряда и давления газа температура электронов уменьшается, тогда как температура газа возрастает (рис. 7). Уменьшение соотношения  $T_e/T_g$  приводит к уменьшению потерь на упругие соударения и потерь заряженных частиц на стенках за счет амбиполярной диффузии, что приводит к уменьшению напряженности электрического поля. Кроме того, увеличение температуры газа при фиксированном давлении приводит к уменьшению концентрации атомов в газоразрядной камере ( $N \sim p/T_g$ ), что также способствует существенному уменьшению величины напряженности электрического поля, необходимой для поддержания горения индукционного разряда трансформаторного типа при заданном токе разряда. Если в расчетах исключим фактор уменьшения концентрации частиц с ростом температуры газа (считаем, что  $N$  прямо пропорционально  $p$ ), то получим значения напряженности электрического поля порядка 10 В/см при давлениях аргона  $\sim 1000$  Па, что в двадцать раз превышает экспериментальные значения.

Таким образом, расчет показывает, что нагрев нейтральных частиц оказывает существенное влияние на характеристики исследуемого низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа. Более того, в контрагированном газовом разряде из-за сжатия токового канала и увеличения плотности тока разряда нагрев газа на оси разрядной трубки должен быть существенно выше, чем в неконтрагированном газовом разряде. Поэтому если учесть реальный (контрагированный) профиль тока разряда и температуры, то можно ожидать существенно лучшего совпадения между расчетом и экспериментом для давлений аргона свыше 1 кПа.

### Выводы

Выполнены измерения напряженности электрического поля низкочастотного (100 кГц) индукционного разряда трансформаторного типа в аргоне в диапазоне давлений аргона 15–6000 Па, существенно расширяющие исследованный ранее диапазон давлений аргона [5].

Показано, что зависимость напряженности электрического поля от давления аргона и тока разряда совпадает с литературными данными: обнаружен локальный минимум напряженности электрического поля при давлениях аргона 100–200 Па при падающей вольт-амперной характеристике разряда.

Разработана упрощенная модель низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа, основанная на предположении наличия максвелловской ФРЭЭ и усреднении радиальных профилей плазмы. Показано, что результаты расчетов соответствуют экспериментальным результатам и хорошо описывают ключевые особенности разряда — падающие вольт-амперные характеристики, наличие локального минимума в зависимости напряженности электрического поля от давления аргона.

Выполнен расчет ионизационного баланса низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа, плотностей метастабильных атомов и электронов, температуры газа и электронов для давлений аргона  $\sim 10$ –6000 Па и токов разряда 1–10 А. Показано, что объемная рекомбинация при давлениях аргона свыше 1000 Па преобладает над рекомбинацией на стенках газоразрядной трубки, а соотношение  $T_e/T_g$  уменьшается с ростом тока разряда и давления аргона. Также показано, что термализация плазмы сильно

уменьшает напряженность электрического поля разряда посредством нескольких механизмов: уменьшения пристеночных потерь заряженных частиц, уменьшения потерь энергии в упругих соударениях, уменьшения концентрации атомов при фиксированном давлении аргона.

Сделан вывод о том, что заметное отличие между численным расчетом и результатами эксперимента, наблюдаемое при давлении аргона свыше 1000 Па (и возрастающее с ростом давления), может быть объяснено тем, что в модели не учитываются реальные радиальные распределения параметров плазмы и, в частности, эффект контрагирования разряда. Предположение о максвелловской ФРЭЭ, по всей видимости, хорошо работает в исследованном диапазоне параметров разряда за исключением, быть может, области очень низких давлений. Полученные результаты позволили нам выявить основные физические процессы, обуславливающие наблюдаемые экспериментальные зависимости, и наметить основные пути для дальнейшего развития и улучшения модели — переход от усредненных радиальных характеристик к расчету реальных радиальных распределений параметров плазмы. Тем не менее, при всей своей простоте разработанная модель хорошо описывает ключевые особенности низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа в диапазоне давлений аргона 10–10000 Па и токов разряда 1–10 А.

### Список литературы

1. Дресвин С.В., Бобров А.А., Лелевкин В.М., Лысов Г.В., Паскалов Г.З., Сорокин Л.М. ВЧ- и СВЧ-плазмотроны. Новосибирск: Наука, 1992. 319 с.
2. Godyak V. Ferromagnetic enhanced inductive plasma sources // J. Phys. D.: Appl. Phys. 2013. Vol. 46. P. 1–23.
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. Vol. 40. P. 4561–4567.
4. Уланов И.М., Исупов М.В., Литвинцев А.Ю., Мищенко П.А. Трансформаторный плазмотрон — плазмохимический реактор // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48, № 2. С. 175–180.
5. Piejak R., Godyak V., Alexandrovich B. Electric field in inductively coupled gas discharges // J. of Applied Physics. 2001. Vol. 89. P. 3590–3593.
6. Кулумбаев Э.Б., Лелевкин В.М. Модель разряда трансформаторного типа // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35, № 3. С. 357–361.
7. Кулумбаев Э.Б., Лелевкин В.М. Расчет характеристик индукционного тороидального разряда трансформаторного типа // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37, № 2. С. 209–215.
8. Curry J., Lister G., Lawler J. Experimental and numerical study of a low-pressure Hg-Ar discharge at high current densities // J. Phys. D.: Appl. Phys. 2002. Vol. 35. P. 2945–2953.
9. Lister G., Curry J., Lawler J. Modelling of low-pressure barium-rare-gas discharges // Phys. Rev. E. 2000. Vol. 62. P. 5576–5583.
10. Petrov G., Ferreira C. Numerical modeling of the constriction of the dc positive column in rare gases // Phys. Rev. E. 1999. Vol. 59. P. 3571–3582.
11. Petrov G., Giuliani J. Inhomogeneous model of an Ar–Hg direct current column discharge // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 94. P. 62–75.
12. Shen Y., Ting S., Yang L., Yuming Ch. Modelling of Ar-Hg electrodeless lamps // Plasma Sci. and Technology. 2012. Vol. 14, No. 2. P. 147–151.
13. Morgan W., Boeuf J., Pitchford L. Siglo Data Base, CPAT and KINEMA software [http://www.siglo-kinema.com].
14. McDaniel E., Mason E. The mobility and diffusion of ions in gases. N.Y.: Wiley, 1973. 372 p.
15. Bogaerts A., Gijbels R. Modeling of metastable argon atoms in a direct-current glow discharge // Phys. Rev. A. 1995. Vol. 52, No. 5. P. 3743–3751.
16. Roberto M., Helen B., Verboncoeur J. Influence of metastable atoms in radio-frequency argon discharges // I EEE Trans. Plasma Sci. 2003. Vol. 31, No. 6. P. 1292–1298.
17. Sukhinin G., Fedoseev A., Khmel S. Role of secondary electrons and metastable atoms in the electron-beam activation of argon-silane mixtures // Plasma Physics Reports. 2008. Vol. 34, No. 1. P. 60–70.

*Статья поступила в редакцию 27 января 2014 г.*