

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-01

**О ПРИМЕНИМОСТИ 0-МЕРНОЙ (ГЛОБАЛЬНОЙ) МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПЛАЗМЫ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА В РЕАКТОРАХ РЕАКТИВНО-ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ****А. М. Ефремов<sup>1,a</sup>, С. А. Смирнов<sup>2,b</sup>, В. Б. Бетелин<sup>3,c</sup>**<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, Зеленоград, г. Москва, Российская Федерация<sup>2</sup> Ивановский государственный химико-технологический университет, г. Иваново, Российская Федерация<sup>3</sup> Федеральное государственное автономное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация<sup>a</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9125-0763>, ✉ [aefremov@niime.ru](mailto:aefremov@niime.ru)<sup>b</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0375-0494>, [sas@isuct.ru](mailto:sas@isuct.ru)<sup>c</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6646-2660>, [betelin@niisi.msk.ru](mailto:betelin@niisi.msk.ru)

**Аннотация:** проведен анализ и обобщение предпосылок, используемых для моделирования плазмы индукционного разряда в диапазоне условий, характерном для реакторов реактивно-ионного травления кремния и его соединений. Подтверждено, что применение функции Максвелла для энергетического распределения электронов обеспечивает корректное описание кинетики процессов под действием электронного удара. Показано, что реализация как прямого (основанного на решении уравнений химической кинетики с привлечением данных зондовой диагностики плазмы в качестве входных параметров), так и самосогласованного (дополненного уравнениями баланса вкладываемой мощности и скоростей процессов ионизации/рекомбинации заряженных частиц) алгоритма моделирования обеспечивает удовлетворительное согласие результатов расчета с данными независимых экспериментов. Приведены примеры сравнения расчета с экспериментом для плазмы  $Ar$ ,  $Cl_2$  и  $CF_4$ . Отмечено, что применение самосогласованного алгоритма в сложных многокомпонентных системах затруднено отсутствием или низкой достоверностью данных по сечениям процессов под действием электронного удара и транспортным характеристикам (коэффициентам диффузии, подвижностям) нестабильных продуктов плазмохимических реакций.

**Ключевые слова:** реактивно-ионное травление, плазма, диагностика, моделирование, активные частицы.

**Благодарности:** публикация выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ (Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП)) по теме № 1023032900380-3-1.2.1 «Фундаментальные и прикладные исследования в области литографических пределов полупроводниковых технологий и физико-химических процессов травления 3D нанометровых диэлектрических структур для развития критических технологий производства ЭКБ. Исследование и построение моделей и конструкций элементов микроэлектроники в расширенном диапазоне температур (от  $-60$  °C до  $+300$  °C) (FNEF-2024-0004)».

**Для цитирования:** Ефремов А. М., Смирнов С. А., Бетелин В. Б. О применимости 0-мерной (глобальной) модели для описания плазмы индукционного разряда в реакторах реактивно-ионного травления. *Успехи кибернетики*. 2024;5(4):10–17. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-01.

Поступила в редакцию: 15.10.2024.

В окончательном варианте: 24.11.2024.

**APPLICABILITY OF 0-DIMENSIONAL (GLOBAL) MODEL TO THE CHARACTERIZATION OF INDUCTIVELY-COUPLED PLASMA IN REACTIVE-ION ETCHING SYSTEMS****A. M. Efremov<sup>1,a</sup>, S. A. Smirnov<sup>2,b</sup>, V. B. Betelin<sup>3,c</sup>**<sup>1</sup> Molecular Electronics Research Institute, Zelenograd, Moscow, Russian Federation<sup>2</sup> Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russian Federation<sup>3</sup> Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation<sup>a</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9125-0763>, ✉ [aefremov@niime.ru](mailto:aefremov@niime.ru)

<sup>b</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0375-0494>, [sas@isuct.ru](mailto:sas@isuct.ru)

<sup>c</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6646-2660>, [betelin@niisi.msk.ru](mailto:betelin@niisi.msk.ru)

*Abstract:* we summarized and analyzed the assumptions used for simulating inductive discharge plasmas under typical reactive-ion etching conditions. We confirmed that applying the Maxwellian approximation to the electron energy distribution function provides an accurate description of the kinetics of electron impact processes. We demonstrated that both direct simulation (based on solving chemical kinetics equations with Langmuir probe diagnostics data as input) and self-consistent simulation (incorporating input power balance and ionization/recombination balance equations for charged particles) achieve satisfactory agreement with data from independent experiments. We provided examples comparing simulation predictions with experimental data for  $Ar$ ,  $Cl_2$  and  $CF_4$  plasmas. However, the application of self-consistent simulation in complex multi-component systems is limited by the lack or low reliability of data on electron impact cross-sections and transport characteristics, such as diffusion coefficients and mobilities for unstable plasma chemical reaction products.

*Keywords:* reactive-ion etching, plasma, diagnostics, modeling, active species.

*Acknowledgements:* this study is a part of FNEF-2024-0004 government order contracted to the NRC “Kurchatov Institute” – SRISA (Basic Research Project 47 GP, No. 1023032900380-3-1.2.1 Basic and Applied Research Aimed at Expanding the Limits of Lithographic Semiconductor Technologies, Physical and Chemical Processes Associated with the Etching of 3D Nanoscale Dielectric Structures for the Development of Critical Electronic Components Manufacturing Technologies. Research, Simulation, and Design of Microelectronic Components in an Extended Temperature Range (-60 °C to +300 °C)).

*Cite this article:* Efremov A. M., Smirnov S. A., Betelin V. B. Applicability of 0-Dimensional (Global) Model to the Characterization of Inductively-Coupled Plasma in Reactive-Ion Etching Systems. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(4):10–17. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-01.

*Original article submitted:* 15.10.2024.

*Revision submitted:* 24.11.2024.

## Введение

Неравновесная низкотемпературная плазма традиционно используется в технологии интегральной микроэлектроники для очистки и структурирования поверхности полупроводниковых пластин и функциональных слоев различной природы [1–3]. Основным инструментом при проведении таких операций является реактивно-ионное травление (РИТ) в условиях плазмы индукционного ВЧ (13.56 МГц) разряда, возбуждаемого при давлениях  $p < 50$  мтор и удельной вкладываемой мощности  $\omega > 0.05$  Вт/см<sup>3</sup>. Последнее условие обеспечивает степень ионизации частиц газа  $\sim 0.1\%$  и плотность плазмы (концентрацию заряженных частиц) на уровне более  $10^{10}$  см<sup>3</sup> [4]. Еще одной характерной чертой современных реакторов РИТ является наличие второго независимого источника питания для формирования дополнительного (по отношению к плавающему потенциалу) отрицательного смещения на подвергаемой травлению поверхности. Таким образом, независимое регулирование концентраций активных частиц и энергии ионной бомбардировки (по сути, соотношения химической и физической составляющих скорости травления) обуславливает широкие возможности оптимизации выходных параметров РИТ (скорости, селективности по отношению к материалу маски, анизотропии профиля травления) под требования конкретного процесса.

Очевидно, что выбор оптимальных условий проведения РИТ требует знания особенностей и понимания физико-химической сути взаимосвязей между входными параметрами процесса (состав плазмообразующего газа, его расход, давление и вкладываемая мощность), электрофизическими параметрами плазмы и концентрациями различных типов активных частиц. Предшествующий опыт исследования плазменных систем показал, что плазма представляет собой сложную самоорганизующуюся систему, внутреннее состояние которой (электрофизические параметры и концентрации частиц) само зависит от скоростей инициируемых в плазме гомогенных и гетерогенных процессов через изменение функции распределения электронов по энергиям и кинетики реакций электронного удара. В такой ситуации использование чисто экспериментального подхода к исследованию плазмы затруднено либо возмущающим характером метода (зонды Лангмюра, плоский стеночный зонд), либо сложностью обработки и последующей интерпретации первичных данных (масс-спектрометрия, оптическая эмиссионная спектроскопия). Еще одна проблема заключается в том, что любой из экспериментальных методов характеризует лишь определенную группу частиц плазмы и/или связанных с ними явлений,

при этом взаимосвязи с другими подсистемами остаются неясными. Поэтому получение достоверной и комплексной информации о физико-химических свойствах плазмы возможно лишь при сочетании методов диагностики и моделирования. Роль эксперимента в этом «тандеме» заключается как в формировании набора входных параметров, так и в соблюдении критериев адекватности модели, обеспечивающих ее качество.

### 0-мерная (глобальная) модель плазмы: предпосылки и базовые уравнения

В общем случае моделирование плазмы преследует три основные цели, а именно: а) получение информации по параметрам и составу плазмы, которая не может (или может, но с недостаточной точностью) быть получена экспериментальным путем; б) установление взаимосвязей между условиями и результатом плазменной обработки через фундаментальные законы химической кинетики и электродинамики; в) предиктивный анализ влияния условий проведения процесса и геометрии реактора на выходные характеристики РИТ данного материала в данном плазмообразующем газе. Одним из наиболее доступных решений здесь является использование 0-мерных (глобальных) моделей, оперирующих величинами, усредненными по объему рабочей камеры реактора. Согласно данным работ [5–11] для типичного диапазона условий РИТ такие модели базируются на следующей системе предпосылок:

1) рассматривается квази-стационарный режим горения разряда, характеризующийся отсутствием временных флуктуаций концентраций частиц и напряженности электрического поля при постоянстве объемного расхода газа ( $q$ ), его давления ( $p$ ) и вкладываемой мощности ( $W$ ). Очевидность такого приближения обусловлена тем, что характерные времена переходных процессов при включении и выключении плазмы ( $\sim 10^{-6}$  с) много меньше характерных времен проведения процесса РИТ;

2) рассматривается режим идеального смешения (РИС), характеризующийся доминированием химической (по сравнению с транспортной) составляющей при формировании стационарных концентраций нейтральных и заряженных частиц. Физически это обеспечивается выполнением условия  $1/\tau_{res} \ll \nu_{chem}$ , где  $\tau_{res} = (V/q)(p/p_0)$  — время пребывания частиц в реакторе,  $V = \pi r^2 l$  — объем цилиндрической камеры реактора радиусом  $r$  и высотой  $l$ ,  $p_0 = 10^5$  Па и  $\nu_{chem}$  — частоты образования и гибели частиц в химических реакциях;

3) функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) аппроксимируется распределением Максвелла. Допустимость такого упрощения объективно обусловлена значительным вкладом равновесных электрон-электронных соударений в формирование ФРЭЭ при высоких степенях ионизации плазмообразующего газа ( $n_+/N > 10^{-4}$ , где  $n_+$  — суммарная концентрация положительных ионов, а  $N = p/k_B T_{gas}$  — общая концентрация частиц газа при температуре  $T_{gas}$ ). Это позволяет оперировать понятием температуры электронов ( $T_e$ ) при описании свойств электронного газа, а также определять константы скоростей процессов под действием электронного удара (ионизация, диссоциация, диссоциативное прилипание, возбуждение различных групп внутренних состояний частиц) по аналитическим выражениям вида  $k = AT_e^B \exp(-C/T_e)$ . Коэффициенты этого уравнения, зависящие от пороговой энергии, формы и абсолютной величины сечения соответствующего процесса, для большинства используемых в РИТ плазмообразующих газов известны по литературным данным;

4) в качестве основного канала гибели атомов и радикалов рассматривается их рекомбинация на стенках разрядной камеры (в силу низкой эффективности трехчастичного объемного процесса  $A + B + M \rightarrow AB + M$  в области  $p < 500$  мтор), протекающая по механизму Или-Ридила. Последний предполагает высокую степень покрытия поверхности адсорбированными частицами и описывается уравнением первого кинетического порядка по газовой фазе:  $A + B(s) \rightarrow AB$ , где индекс (s) отвечает адсорбированному состоянию. При характерных значениях вероятностей гетерогенной рекомбинации  $\gamma \ll 1$  [12] константа скорости (частота) рекомбинации определяется соотношением  $k \approx ((r+l)/2rl) \gamma v_T$ , где  $v_T = \sqrt{8RT_{gas}/\pi M}$  — скорость теплового движения частиц в газовой фазе;

5) в качестве основного канала гибели положительных ионов рассматривается их нейтрализация при столкновениях со стенками разрядной камеры,  $A^+ \rightarrow A$ . Константа скорости такого процесса определяется соотношением  $k \approx 2((rh_L + lh_R)/rl) v_B$ , где  $v_B = \sqrt{eT_e(1 + \beta_s)/m_i(1 + \beta_s \gamma_T)}$  — скорость ионов на внешней границе двойного электрического слоя у поверхности, контактирующей с плазмой (известная также как скорость Бома),  $m_i$  — эффективная (усредненная по типам частиц) масса ионов,  $\beta_s$  — электроотрицательность в поверхностном слое, связанная с объемной величиной  $\beta = n_-/n_e$  уравнением вида  $\beta = \beta_s \exp((1 + \beta_s)(\gamma_T - 1)/2(1 + \beta_s \gamma_T))$ ,  $\gamma_T = T_e/T_i$  — отношение температур электронов и ионов. Безразмерные коэффициенты  $h_L$  и  $h_R$  характеризуют степень снижения концен-

трации ионов на внешней границе двойного электрического слоя в осевом и радиальном направлениях. Они могут быть определены как:

$$h_L = \frac{1 + 2\beta_s/\gamma_T}{1 + \beta_s} 0.86 \left( 3 + \frac{l}{2\lambda_i} + \left( \frac{0.86lv_B}{\pi\gamma_T D_i} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (1)$$

и

$$h_R = \frac{1 + 3\beta_s/\gamma_T}{1 + \beta_s} 0.80 \left( 4 + \frac{r}{\lambda_i} + \left( \frac{0.80rv_B}{2.405J_1(2.405)\gamma_T D_i} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (2)$$

где  $\lambda_i = 1/\sigma N$  – длина свободного пробега ионов,  $\sigma$  – эффективное сечение рассеяния ионов на нейтральных частицах,  $D_i = \lambda_i \sqrt{eT_i/2m_i}(1 + \gamma_T + 2\beta\gamma_T)/(1 + \beta\gamma_T)$  – коэффициент диффузии ионов и  $J_1(2.405) \approx 0.43$  – корень функции Бесселя первого рода нулевого порядка. Кроме этого, в плазмообразующих газах с высокой электроотрицательностью (например,  $Cl_2$ ,  $O_2$ ,  $HBr$ ) в условиях  $\beta > 1$  нельзя пренебрегать объемной ион-ионной рекомбинацией  $A^+ + B^- \rightarrow A + B$ . Полагается, что соответствующая константа скорости лежит в диапазоне  $5 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-7}$  см<sup>3</sup>/с и не зависит как от типа ионов, так и от условий возбуждения плазмы. Для упрощения расчетов допускается использование эффективных (усредненных по типам частиц) параметров  $\lambda_i$  и  $D_i$ .

Математическое содержание самосогласованной (т. е. не требующей результатов диагностики плазмы в качестве входных параметров) модели формируется системой уравнений, включающей в себя: а) уравнения химической кинетики для каждого типа частиц плазмы, устанавливающие равенство суммарных скоростей их образования и гибели; б) обобщенное уравнение баланса заряженных частиц и квазинейтральности плазмы, необходимое для независимого расчета температуры электронов; в) уравнение баланса вкладываемой мощности, необходимое для расчета концентрации электронов. Последнее в общем виде может быть записано как  $W = W_{col} + W_{ion} + W_e$ , где  $W$  – вкладываемая (поглощенная) мощность от источника питания, возбуждающего плазму, а слагаемые правой части представляют потери мощности за счет столкновений электронов с частицами газа, с потоком ионов на стенку реактора и с потоком электронов на стенку реактора соответственно [4]. Эти величины могут быть определены по следующим соотношениям:

$$W_{col} = en_e V \left( 3T_e m_e \sum_j k_{el} \frac{n}{m} + \sum_j \sum_k k_{inel} \varepsilon_{th} \right) \quad (3)$$

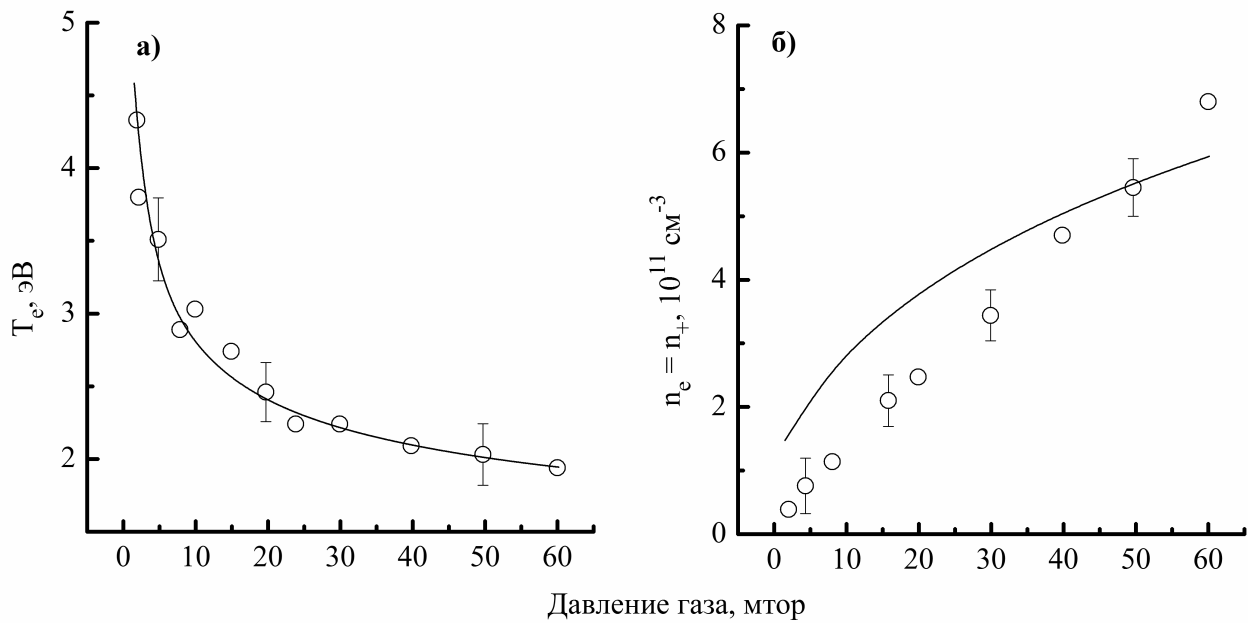
$$W_{ion} = e (U_f + 0.5T_e) \frac{2(rh_L + lh_R)}{rl} v_B n_+ \quad (4)$$

$$W_{ion} = 2eT_e \frac{2(rh_L + lh_R)}{rl} v_B n_+ \quad (5)$$

где  $V = \pi r^2 l$  – объем разрядной камеры,  $U_f$  – плавающий потенциал,  $k_{el}$  – константа скорости упругого взаимодействия (передачи импульса),  $k_{inel}$  – константа скорости неупругого взаимодействия и  $\varepsilon_{th}$  – пороговая энергия неупругого процесса. Соответственно, индексы « $j$ » и « $k$ » в уравнении (3) отражают суммирование по типам частиц и видам неупругих процессов для данной частицы.

### Результаты моделирования: интерпретация и сравнение с экспериментом

Для оценки возможностей модели при описании плазмы электроположительных ( $\beta = 0$ ) газов мы использовали экспериментальные данные зондовой диагностики плазмы  $Ar$ , полученные в реакторе планарного типа (с верхним расположением плоского спиралевидного индуктора) с ВЧ 13.56 МГц источником питания [13]. В расчетах использовалась кинетическая схема (набор реакций и констант скоростей), рекомендованная в работах [7, 11]. Из рисунка 1 можно видеть, что имеет место удовлетворительное качественное и количественное (в пределах точности эксперимента и исходных данных по сечениям процессов под действием электронного удара) согласие измеренных значений температуры и концентрации электронов с их расчетными аналогами. Это позволяет заключить, что предложенная модель адекватно описывает взаимосвязи между внешними и внутренними параметрами плазмы аргона.

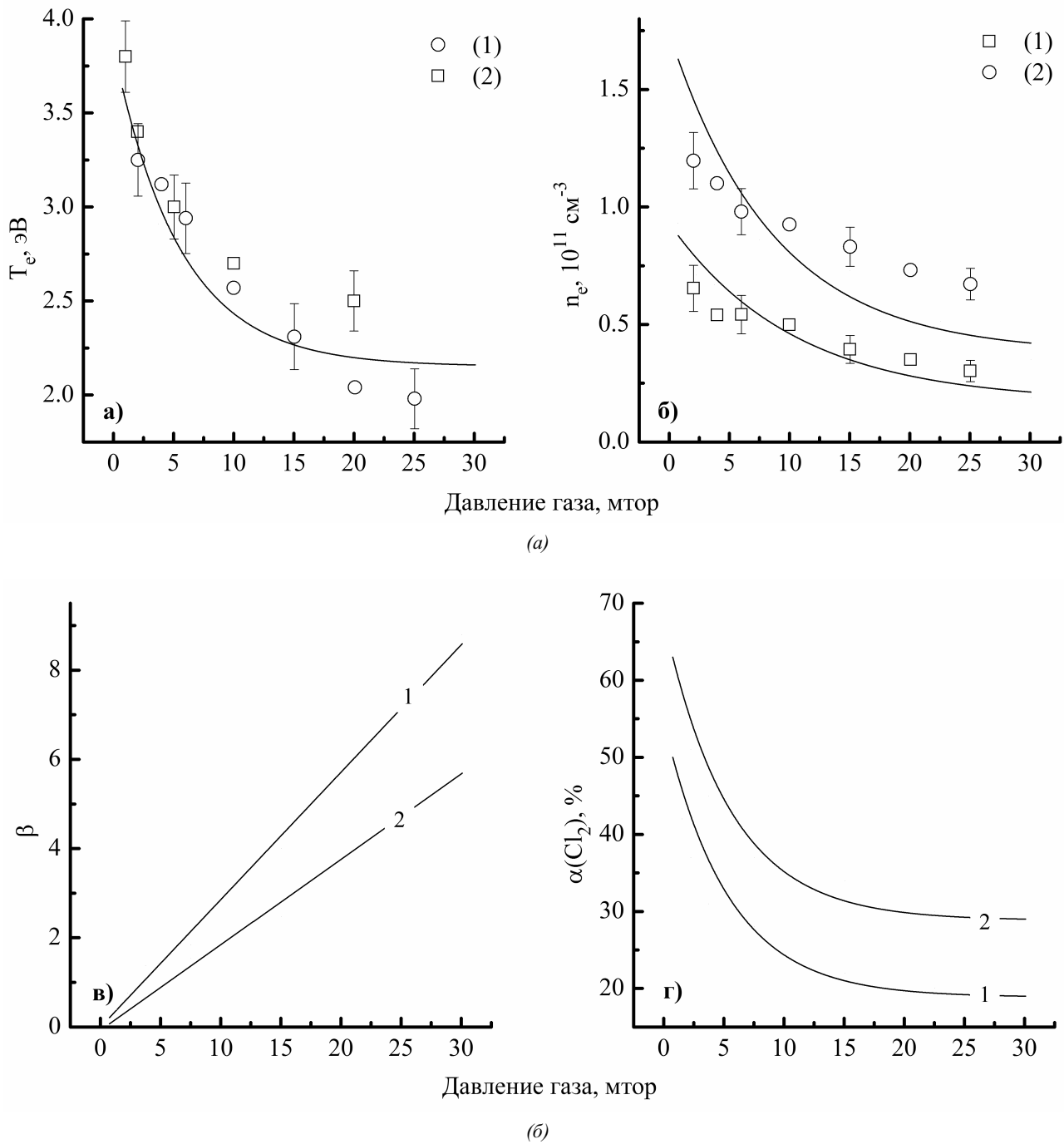


**Рис. 1.** Зависимости температуры (а) и концентрации (б) электронов в плазме аргона от давления газа. Точки — эксперимент из работы [13], линии — расчет

Отметим также, что характер изменения параметров  $T_e$  и  $n_e$  при варьировании давления газа представляется вполне ожидаемым и имеет разумное объяснение. Так, спадающая зависимость  $T_e = f(p)$  связана с тем, что с ростом давления увеличиваются концентрация частиц газа и частота столкновений электронов с атомами  $Ar$ . Это приводит к увеличению потерь энергии электронов и, как следствие, к снижению доли «быстрых» электронов и их средней энергии (температуры). Соответственно, растущий характер зависимости  $n_e = f(p)$  является результатом совместного действия двух факторов, а именно: а) роста частоты ионизации атомов  $Ar$  при увеличении плотности частиц газа; б) снижения частоты (коэффициента скорости) гетерогенной гибели ионов и электронов из-за аналогичного изменения их коэффициентов диффузии. Последний эффект обусловлен влиянием давления на длины свободного пробега частиц и температуру электронов.

Для тестирования модели в условиях плазмы с высокой электроотрицательностью ( $\beta > 1$ ) были привлечены экспериментальные данные зондовой диагностики плазмы  $Cl_2$  из нашей работы [14]. Предметом исследования здесь также служил индукционный реактор планарного типа, работающий на частоте 13.56 МГц. В расчетах использовалась кинетическая схема, рекомендованная в работах [7, 11]. Эксперименты и расчеты показали, что характер зависимости температуры электронов от давления газа (рис. 2(а)) аналогичен таковой для плазмы аргона. Данный факт подтверждает многочисленные литературные данные, свидетельствующие о том, что влияние давления газа на вид ФРЭЭ обусловлено фундаментальными причинами, не зависящими от типа плазмообразующего газа.

Другим принципиальным моментом является удовлетворительное количественное согласие результатов зондовой диагностики и моделирования плазмы, при этом найденный нами диапазон  $T_e$  подтверждается данными независимых экспериментов. В частности, Malyshev M. V. и др. [15] по результатам зондовых измерений в плазме  $Cl_2$  получили  $T_e = 3.8\text{--}2.5$  эВ при  $p = 1\text{--}20$  мтор и удельной мощности  $\sim 0.3$  Вт/см<sup>3</sup>. Кроме этого, в работе [16] сообщается о  $T_e = 3.5\text{--}1.5$  эВ в диапазоне давлений 5–60 мтор и удельной мощности  $\sim 0.45$  Вт/см<sup>3</sup>. Это позволяет заключить, что зондовая диагностика плазмы является объективным методом для получения критериев адекватности модели. Из рисунка 2(б) можно видеть также, что модель удовлетворительно описывает экспериментальную зависимость  $n_e = f(p)$ , при этом тенденция изменения концентрации электронов противоположна отмеченной выше для плазмы аргона. Причина снижения  $n_e$  с ростом давления газа в данном случае связана с: а) ростом частоты гибели электронов по механизму диссоциативного прилипания к молекулам хлора,  $R1: Cl_2 + e \rightarrow Cl + Cl^-$ ; б) увеличением коэффициента диффузии электронов из-за изменения режима диффузии от амбиполярного к свободному с ростом электроотрицательности плазмы. Причиной



**Рис. 2.** Зависимости температуры электронов (а), концентрации электронов (б), относительной концентрации отрицательных ионов (в) и степени диссоциации молекул  $\text{Cl}_2$  (г) в плазме хлора от давления газа. Точки — эксперимент, линии — расчет. На рис. а): эксперимент из работ [14] (1) и [15] (2) для вкладываемой мощности 700 Вт. На рис. б): эксперимент из работы [14] для вкладываемой мощности 400 Вт (1) и 700 Вт (2). На рис. в) и г): расчет для реактора из работы [14] для вкладываемой мощности 400 Вт (1) и 700 Вт (2)

последнего эффекта является увеличение абсолютной и относительной (рис. 2(в)) концентрации электронов, в том числе — по причине снижения степени диссоциации молекул  $\text{Cl}_2$  (рис. 2(г)). Хотя две последние зависимости не имеют прямого экспериментального подтверждения в рамках данной работы, по характеру они полностью соответствуют данным других авторов, полученным в результате как моделирования, так и диагностики плазмы [6–8, 11, 17, 18]. Поэтому с достаточной степенью уверенности можно утверждать, что предложенная модель удовлетворительно описывает параметры и состав плазмы хлора в типичном диапазоне условий РИТ. Отметим также, что увеличение вкладываемой мощ-

ности при любом фиксированном давлении газа вызывает увеличение концентрации электронов (как это следует из уравнений (3)–(5) при  $W_{col} \gg W_{ion} + W_e$ ), что способствует росту степени диссоциации молекул  $Cl_2$  и снижению электроотрицательности плазмы. Причиной первого явления служит увеличение скорости диссоциации по механизму R2:  $Cl_2 + e \rightarrow 2Cl + e$ , а второго — опережающий рост  $n_e$  по сравнению с концентрацией отрицательных ионов.

Очевидно, что особенностью рассмотренного самосогласованного алгоритма моделирования является необходимость полных и достоверных данных по сечениям процессов под действием электронного удара для всех частиц плазмы. Приведенные выше примеры плазмы  $Ar$  и  $Cl_2$  рассматривают, по сути, простейшие плазменные системы с хорошо известными физико-химическими свойствами всех нейтральных и заряженных компонентов. В то же время использование в реальных технологических процессах многоатомных плазмообразующих газов и/или многокомпонентных газовых смесей обуславливает наличие в газовой фазе нестабильных мало- или неизученных продуктов плазмохимических реакций. Так как экспериментальные измерения и/или верифицированные квантовохимические расчеты сечений процессов под действием электронного удара для таких частиц в большинстве случаев отсутствуют, корректная запись уравнения (3) объективно не представляется возможной. Соответственно, первичная погрешность определения температуры и концентрации электронов по уравнениям баланса заряженных частиц и вкладываемой мощности неизбежно отражается и на результатах расчета состава плазмы. Наглядным примером здесь может служить ситуация с моделированием плазмы тетрафторметана, где в качестве «проблемных» частиц выступают радикалы  $CF_x$  ( $x = 1, 2$  и  $3$ ), а также их окисленные формы  $FO$  и  $CF_xO$ , образующиеся в смесях с кислородом. В частности, серия работ Kimura и др. [19–21] демонстрирует удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом по температуре электронов и неудовлетворительное, вплоть до отличающихся тенденций, — по их концентрации. Соответственно, сомнительной достоверностью обладают и расчетные данные по составу нейтральной и ионной компонент плазмы. Простейшим решением проблемы здесь может служить переход от самосогласованного к прямому алгоритму расчета, который использует экспериментальные данные по температуре и концентрации электронов (или суммарной концентрации положительных ионов) в качестве входных параметров. Так, в нашей работе [22] было показано, что прямой алгоритм обеспечивает лучшее совпадение расчета с экспериментом по концентрации атомов фтора в смеси  $CF_4 + O_2$ . Более поздние исследования показали применимость прямого алгоритма и для описания плазмы других фторуглеродных газов, характеризующейся сложным многокомпонентным составом —  $CHF_3 + O_2$  и  $C_4F_8 + O_2$  [23].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Nojiri K. *Dry Etching Technology for Semiconductors*. Tokyo: Springer International Publishing; 2015. 116 p.
2. Wolf S., Tauber R. N. *Silicon Processing for the VLSI Era. Volume 1. Process Technology*. New York: Lattice Press; 2000. 416 p.
3. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм. *Nanoindustry Russia*. 2020;13(5):13–19. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.13.19.
4. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. New York: John Wiley & Sons Inc.; 2005. 757 p.
5. Thorsteinsson E. G., Gudmundsson J. T. A Global (Volume Averaged) Model of a Chlorine Discharge. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2010;19:015001 (1–15). DOI: 10.1088/0963-0252/19/1/015001.
6. Tinck S., Boullart W., Bogaerts A. Simulation of an  $Ar/Cl_2$  Inductively Coupled Plasma: Study of the Effect of Bias, Power and Pressure and Comparison with Experiments. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2008;41:065207 (1–12). DOI: 10.1088/0022-3727/41/6/065207.
7. Hsu C. C., Nierode M. A., Coburn J. W., Graves D. B. Comparison of Model and Experiment for  $Ar$ ,  $Ar/O_2$  and  $Ar/O_2/Cl_2$  Inductively Coupled Plasmas. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2006;39:3272–3284. DOI: 10.1088/0022-3727/39/15/009.
8. Corr C. S., Despiau-Pujo E., Chabert P., Graham W. G., Marro F. G., Graves D. B. Comparison between Fluid Simulations and Experiments in Inductively Coupled Argon/Chlorine Plasmas. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2008;41:185–202. DOI: 10.1088/0022-3727/41/18/185202.
9. Efremov A. M., Kim D. P., Kim C. I. Simple Model for Ion-Assisted Etching Using  $Cl_2 - Ar$  Inductively Coupled Plasma: Effect of Gas Mixing Ratio. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2004;32(3):1344–1351. DOI: 10.1109/TPS.2004.828413.

10. Efremov A., Lee J., Kwon K. H. A Comparative Study of  $CF_4$ ,  $Cl_2$  and  $HBr + Ar$  Inductively Coupled Plasmas for Dry Etching Applications. *Thin Solid Films*. 2017;629:39–48. DOI: 10.1016/j.tsf.2017.03.035.
11. Lee C., Lieberman M. A. Global Model of  $Ar$ ,  $O_2$ ,  $Cl_2$  and  $Ar/O_2$  High Density Plasma Discharges. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1995;13(2):368–377. DOI: 10.1116/1.579366.
12. Chantry P. J. A Simple Formula for Diffusion Calculations Involving Wall Reflection and Low Density. *J. Appl. Phys.* 1987;62:1141–1148. DOI: 10.1063/1.339662.
13. Nakagawa H., Morishita S., Noda S., Okigawa M., Inoue M., Sekine M., Ito K. Characterization of 100 MHz Inductively Coupled Plasma (ICP) by Comparison with 13.56 MHz ICP. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1999;17(4):1514–1525. DOI: 10.1116/1.581845.
14. Efremov A. M., Kim G. H., Kim J. G., Bogomolov A. V., Kim C. I. Applicability of Self-Consistent Global Model for Characterization of Inductively Coupled  $Cl_2$  Plasma. *Vacuum*. 2007;81(5):669–675. DOI: 10.1016/j.vacuum.2006.09.017.
15. Malyshev M. V., Donnelly V. M. Diagnostics of Chlorine Inductively Coupled Plasmas. Measurement of Electron Temperatures and Electron Energy Distribution Functions. *J. Appl. Phys.* 2000;87:1642–1650. DOI: 10.1063/1.372072.
16. Ullal S., Godfrey A., Edelberg E., Braly L., Vahedi V., Aydil E. Effect of Chamber Wall Conditions on  $Cl$  and  $Cl_2$  Concentrations in an Inductively Coupled Plasma Reactor. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2002;20:43–52. DOI: 10.1116/1.1421602.
17. Malyshev M. V., Donnelly V. M. Diagnostics of Inductively Coupled Chlorine Plasmas: Measurement of Electron and Total Positive Ion Densities. *J. Appl. Phys.* 2001;90:1130–1137. DOI: 10.1063/1.1381044.
18. Malyshev M. V., Fuller N. C. M., Bogart K. H. A., Donnelly V. M. Diagnostics of Inductively Coupled Chlorine Plasmas: Measurement of  $Cl_2^+$  and  $Cl^+$  Densities. *J. Appl. Phys.* 2000;88:2246–2453. DOI: 10.1063/1.1288156.
19. Kimura T., Ohe K. Model and Probe Measurements of Inductively Coupled  $CF_4$  Discharges. *J. Appl. Phys.* 2002;92:1780–1787. DOI: 10.1063/1.1491023.
20. Kimura T., Ohe K. Probe Measurements and Global Model of Inductively Coupled  $Ar/CF_4$  discharges. *Plasma Sources Sci. Technol.* 1999;8:553–560. DOI: 10.1088/0963-0252/8/4/305.
21. Kimura T., Noto M. Experimental Study and Global Model of Inductively Coupled  $CF_4/O_2$  Discharges. *J. Appl. Phys.* 2006;100:063303 (1–9). DOI: 10.1063/1.2345461.
22. Efremov A., Lee J., Kim J. On the Control of Plasma Parameters and Active Species Kinetics in  $CF_4+O_2+Ar$  Gas Mixture by  $CF_4/O_2$  and  $O_2/Ar$  Mixing Ratios. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2017;37:1445–1462. DOI: 10.1007/s11090-017-9820-z.
23. Baek S. Y., Efremov A., Bobylev A., Choi G., Kwon K.-H. On Relationships between Plasma Chemistry and Surface Reaction Kinetics Providing the Etching of Silicon in  $CF_4$ ,  $CHF_3$ , and  $C_4F_8$  Gases Mixed with Oxygen. *Materials*. 2023;16:5043 (1–18). DOI: 10.3390/ma16145043.