

## Исследование параметров индуктивно связанной плазмы в процессе травления поликремниевого затвора

Ф. О. Оксаниченко\*

Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский институт),  
физтех-школа физики и исследований им. Ландау, 141701,  
Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.  
(Поступила в редакцию 07.06.2024; подписана в печать 17.07.2024)

Предложена самосогласованная 0-мерная модель плазмы смеси  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$  в условиях, типичных для плазмохимического травления поликремниевого затвора. Модель основана на совместном решении уравнений химической кинетики, квазинейтральности плазмы и баланса мощности для условий стационарной плазмы. Решение проводилось методом итераций. В рамках модели учитывались 3 вида нейтральных частиц ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Ar}$ , радикал  $\text{Cl}$ ) и 4 вида ионов ( $\text{Cl}^+$ ,  $\text{Cl}_2^+$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ). В качестве входных параметров использовались начальный состав смеси, вкладываемая мощность и давление газа. Получены расчётные данные по влиянию начального состава смеси на физические параметры плазмы и концентрации активных частиц. Результаты качественно согласуются с литературными данными.

PACS: 52.77.Bn, 52.20.Fs

УДК: 533.922, 533.924, 533.932.

Ключевые слова: плазмохимическое травление; неравновесная низкотемпературная газоразрядная плазма; моделирование плазмы; травление поликремния.

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из самых распространенных типов интегральных микросхем являются сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), изготовленные по МДП (металл-диэлектрик-проводник)-технологии. К таким схемам относятся, например, микропроцессоры, микросхемы логики и памяти, а также микроконтроллеры различного назначения. Одним из ключевых процессов при создании подобных изделий является формирование затвора МДП-транзистора. Так как физические размеры этого элемента меньше размеров всех остальных элементов на СБИС [1], требования к технологическому процессу для создания всей микросхемы не могут быть хуже тех, которые предъявляются к процессу формирования затвора. Одной из ключевых операций при этом является плазмохимическое травление (ПХТ) поликремния.

Основным направлением развития микроэлектроники в настоящее время является переход к технологическим нормам, характеризующимся увеличением степени интеграции СБИС и, следовательно, уменьшением размеров интегрального МДП-транзистора. Соответственно, возрастают и требования к выходным характеристикам ПХТ (скорость, селективность по отношению к материалу маски и анизотропия профиля), что приводит к необходимости оптимизации режимов данного процесса. Особенностью любого ПХТ является большое число управляющих параметров, а так же сложные нелинейные зависимости результатов травления от каждого из них. Поэтому эмпирический путь оптимизации является неэффективным из-за большого

количества экспериментов, необходимых для нахождения режима травления, удовлетворяющего требованиям процесса. Решением данной проблемы может являться совместное использование экспериментальных методов и моделирования плазмы. Достоинством моделирования является то, что данный метод позволяет не только установить зависимость между управляющими и выходными параметрами, но и объясняет какие физико-химические механизмы в плазме обуславливают эту зависимость. При травлении поликремниевого затвора зачастую используются многокомпонентные смеси, в состав которых входит  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Ar}$  и  $\text{HBr}$ . В отличие от первых двух компонентов экспериментальные данные по сечениям некоторых процессов с  $\text{Br}$ ,  $\text{HBr}$  и  $\text{Br}_2$  отсутствуют или недостаточно достоверны, что может негативно сказаться на точности расчёта температуры и концентрации электронов. Поэтому целью настоящей работы являлось создание модели для плазмы  $\text{Cl}_2 + \text{Ar}$  для проверки корректности алгоритма расчёта параметров плазмы, не опасаясь возникновения ошибок связанных с некорректными значениями скоростей реакции. Кроме этого в рамках нашей работы мы проводили модельный анализ влияния начального состава смеси на физические параметры и состав плазмы.

### 1. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАЗМЫ

Объектом моделирования являлась плазма индукционного ВЧ (13.56 МГц) разряда в смеси  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$ , возбуждаемая в цилиндрическом реакторе в диапазоне давлений менее 50 мтор и удельной мощности менее  $0.1 \text{ Вт/см}^3$ , что обеспечит плотность плазмы выше  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Из литературы известно, что данный диапазон условий является типичным для процессов

\* foksanichenko@niime.ru

реактивно-ионного травления кремния и его соединений, в том числе — поликремния [7, 15]. При разработке алгоритма моделирования принимались следующие допущения:

1. Приближение квази-однородной плазмы, подразумевающее отсутствие значительных пространственных градиентов напряженности электромагнитного поля и концентраций частиц. Этому приближению в полной мере отвечает 0-мерная (глобальная) модель, оперирующая параметрами плазмы, усредненными по объему реактора. Подобный подход был использован в ряде работ [2–4], в том числе и в работах такого автора как Mark Kushner [5]. Было показано, что 0-мерные и более сложные модели плазмы хлора обеспечивает удовлетворительное согласие результатов расчета с данными зондовой и оптико-спектральной диагностики плазмы.
2. Приближение Максвелловской функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). Справедливость данного приближения для рассматриваемого диапазона условий обусловлена существенным вкладом равновесных электрон-электронных соударений в формирование ФРЭЭ. Соответственно, в большом количестве работ было показано, что использование Максвелловской ФРЭЭ обеспечивает адекватное описание зависимостей физических параметров и состава плазмы от условий ее возбуждения. [4, 6–10].
3. Приближение квази-стационарной плазмы, подразумевающее отсутствие временных зависимостей физических параметров плазмы и ее состава. Фактически это обеспечивается стационарностью входных параметров, а также пренебрежимо малой длительностью (по сравнению с характерными временами целевых процессов) переходных режимов при включении и выключении разряда [11].
4. Приближение реактора идеального смешения (РИС). Последнее подразумевает, что характерное время пребывания частиц в реакторе много больше характерных времен химических реакций, определяемых частотой столкновения частиц в газовой фазе и с поверхностью разрядной камеры. Фактически это означает, что основным фактором, определяющим концентрации частиц в реакторе являются, химические реакции. Данное приближение характерно для процессов, используемых в химической технологии, в том числе для процессов ПХТ [11].

В качестве входных параметров модели использовались как управляющие параметры процесса травления (давление  $p_0$ , температура газа  $T_{gas}$ , доля  $Ag$  в смеси  $u_{Ag}$  и мощность источника возбуждения плазмы  $W$ ),

так и характеристики самого реактора: высота ( $L$ ), радиус ( $R$ ) и материал стенок рабочей камеры, определяющий величину вероятности гетерогенной рекомбинации радикалов  $Cl$  ( $\gamma_{Cl}$ ). При расчётах состава плазмы учитывали 3 вида нейтральные частицы ( $Cl_2$ ,  $Ag$ , радикал  $Cl$ ), 4 вида ионов ( $Cl^+$ ,  $Cl_2^+$ ,  $Ag^+$ ,  $Cl^-$ ) и электроны. Соответствующий набор процессов (табл. 1) был сформирован основываясь в предшествующих работах по моделированию плазмы в смеси хлора с аргонном. Кроме этого, учитывались процессы упругого взаимодействия и возбуждения (табл. 2), которые вызывают потери энергии электронов, но не приводят к изменению химического состава плазмы.

Константы скорости реакций под действием электронного удара (1-5, 13-35) находили при интегрировании известных сечений процесса [15, 16] с Максвелловской ФРЭЭ:

$$k_i = \left(\frac{2e}{m_e}\right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\infty} \sigma_i(\varepsilon) f(\varepsilon) \sqrt{\varepsilon} d\varepsilon \quad (1)$$

В отдельных случаях использовали готовые аналитические решения данного уравнения в псевдо-аррениусовской форме из работ [4, 6, 12]. Константы ион-ионной рекомбинации в объеме плазмы (6-8) принимались одинаковыми для различных типов ионов [4] и заменялись единым параметром  $k_{ii} = 5 \cdot 10^{-14} m^{-3}$ . Константа скорости гетерогенной рекомбинации радикалов хлора (9) определялась в предположении о первом кинетическом порядке данной реакции (механизм Или-Ридила) по уравнению:

$$k_9 = \frac{R+L}{2RL} \sqrt{\frac{8T_{gas}k_b}{\pi m}} \gamma_{Cl} \quad (2)$$

Константы скорости гетерогенной рекомбинации положительных ионов (10–12) оценивали по соотношению:

$$k_i = \frac{v_i}{d_c} \quad (3)$$

где  $v_i$  — скорость иона на внешней границе двойного электрического слоя у поверхности, контактирующей с плазмой (так называемая скорость Бома), а  $d_c$  — эффективная длина, определяемая геометрическим размерами реактора и длиной свободного пробега иона при данном давлении газа. Подробно эти величины будут рассмотрены ниже.

Математическое содержание модели было представлено системой уравнений, включающей:

- а) уравнения химической кинетики (равенство суммарных скоростей образования и гибели) для каждого вида частиц, включенных в модель;
- б) уравнение квазинейтральности плазмы;
- в) уравнение баланса вкладываемой мощности;
- г) уравнения, отражающие закон действующих масс и сохранения парциальных давлений в многокомпонентной системе частиц.

Таблица 1. Реакции, используемые для расчёта состава плазмы

N	Реакция	Источник	N	Реакция	Источник
1	$Ar + e \rightarrow Ar^+ + 2e$	[12]	8	$Ar^+ + Cl^- \rightarrow Ar + Cl$	[6]
2	$Cl_2 + e \rightarrow Cl_2^+ + 2e$	[6]	9	$Cl \xrightarrow{Wall} Cl(s)$	[4]
3	$Cl + e \rightarrow Cl^+ + 2e$	[6]	10	$Cl^+ \xrightarrow{Wall} Cl$	[4]
4	$Cl_2 + e \rightarrow Cl + Cl + e$	[6]	11	$Cl_2^+ \xrightarrow{Wall} Cl_2$	[4]
5	$Cl_2 + e \rightarrow Cl^- + Cl$	[6]	12	$Ar^+ \xrightarrow{Wall} Ar$	[4]
6	$Cl_2^+ + Cl^- \rightarrow 3Cl$	[6]	13	$Cl_2 + e \rightarrow Cl^- + Cl^+ + e$	[6]
7	$Cl^+ + Cl^- \rightarrow 2Cl$	[6]			

Таблица 2. Дополнительные реакции, используемые в уравнении баланса вкладываемой мощности

N	Реакция	Источник	N	Реакция	Источник
14	$Cl_2 + e \xrightarrow{\text{упругое}} e + Cl_2$	[15]	25	$Cl + e \rightarrow Cl(^4D) + e$	[6]
15	$Cl_2 + e \rightarrow e + Cl_2(b^3\Pi_u)$	[6]	26	$Cl + e \rightarrow Cl(^4P) + e$	[6]
16	$Cl_2 + e \rightarrow e + Cl_2(^1\Pi_u)$	[6]	27	$Cl + e \rightarrow Cl(^4S) + e$	[6]
17	$Cl_2 + e \rightarrow e + Cl_2(^1\Pi_g)$	[6]	28	$Cl + e \rightarrow Cl(^5D) + e$	[6]
18	$Cl_2 + e \rightarrow e + Cl_2(^1\Sigma_u)$	[6]	29	$Cl + e \rightarrow Cl(^5P) + e$	[6]
19	$Cl_2 + e \rightarrow e + Cl_2(Ryd)$	[6]	30	$Ar + e \xrightarrow{\text{упругое}} Ar + e$	[16]
20	$Cl_2 + e \rightarrow e + Cl_2(v_1)$	[6]	31	$Ar + e \rightarrow Ar(4s'_{1/2}4s_{3/2}) + e$	[12]
21	$Cl_2 + e \rightarrow e + Cl_2(v_2)$	[6]	32	$Ar + e \rightarrow Ar(3d'_{3/2}) + e$	[12]
22	$Cl_2 + e \rightarrow e + Cl_2(v_3)$	[6]	33	$Ar + e \rightarrow Ar(3d_{3/2}) + e$	[12]
23	$Cl + e \xrightarrow{\text{упругое}} Cl + e$	[16]	34	$Ar + e \rightarrow Ar(5s_{3/2}) + e$	[12]
24	$Cl + e \rightarrow Cl(^3D) + e$	[6]	35	$Ar + e \rightarrow Ar(5s'_{1/2}) + e$	[12]

Последовательность решения была следующей:

1) Расчет концентраций нейтральных и заряженных частиц при решении уравнений химической ( $Cl$ -(4),  $Cl^-$ -(5),  $Cl^+$ -(6),  $Cl_2^+$ -(7),  $Ar^+$ -(8)) и уравнений сохранения парциальных давлений (9), (10):

$$2k_4n_{Cl_2}n_e + k_5n_{Cl_2}n_e = k_9n_{Cl} \quad (4)$$

$$(k_5 + k_{13})n_{Cl_2}n_e = (k_6n_{Cl_2^+} + k_7n_{Cl^+} + k_8n_{Ar^+})n_{Cl^-} = k_{ii}n_+n_{Cl^-} \quad (5)$$

$$k_3n_{Cl}n_e + k_{13}n_{Cl_2}n_e = k_{ii}n_{Cl^+}n_{Cl^-} + k_{10}n_{Cl^+} \quad (6)$$

$$k_2n_{Cl_2}n_e = k_{ii}n_{Cl_2^+}n_{Cl^-} + k_{11}n_{Cl_2^+} \quad (7)$$

$$k_1n_{Ar}n_e = k_{ii}n_{Ar^+}n_{Cl^-} + k_{12}n_{Ar^+} \quad (8)$$

$$\frac{P_0}{k_b T_{gas}}(1 - y_{Ar}) = n_{Cl_2} + \frac{1}{2}n_{Cl} \quad (9)$$

$$\frac{P_0}{k_b T_{gas}}y_{Ar} = n_{Ar} + n_{Ar^+} \quad (10)$$

где  $P_0$  — давление рабочего газа;  $y_{Ar}$  — доля Ar в смеси.

2) Расчет температуры электронов при решении трансцендентного уравнения, объединяющего баланс ионов и электронов[13]:

$$2(k_2n_{Cl_2} + k_3n_{Cl} + k_1n_{Ar}) + (k_{13} - k_5)n_{Cl_2} = k_{ii}\beta n_e(1 + \beta) + \frac{2\sum v_i\alpha_i}{d_c} \quad (11)$$

где электроотрицательность плазмы  $\beta = \frac{n_{Cl^-}}{n_e}$ ,  $v_i = \sqrt{\frac{eT_e(1+\beta_s)}{m_i(1+\beta_s\gamma_T)}}$  [13],  $\gamma_T = T_e/T_i$ ,

$\beta = \beta_s \exp\left(\frac{(1+\beta_s)(\gamma_T-1)}{2(1+\beta_s\gamma_T)}\right)$ , для расчёта температуры ионов применялась эмпирическая формула[4]:  $T_i \approx T_{gas}[eV] + \frac{0.5-T_{gas}[eV]}{P[mtorr]}$ .

Эффективная длина  $d_c = \frac{0.5RL}{Rh_L + Lh_R}$  рассчитывалась с использованием поправок  $h_L$  и  $h_R$  [14]:

$$h_L = \frac{1 + 2\frac{\beta_s}{\gamma_T} \cdot 0.86 \left(3 + \frac{L}{2\lambda_i^*} + \left(\frac{0.86Lv}{\pi\gamma_T D_i}\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}}}{1 + \beta_s} \quad (12)$$

$$h_R = \frac{1 + 3\frac{\beta_s}{\gamma_T} \cdot 0.80 \left(4 + \frac{R}{\lambda_i^*} + \left(\frac{0.8Rv}{2.405 \cdot 0.43\gamma_T D_i}\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}}}{1 + \beta_s} \quad (13)$$

где  $\lambda_i$  — соответствующая длина свободного пробега, а  $D_i$  — соответственный коэффициент диффузии.

$$D_i = \lambda_i^* \sqrt{\frac{eT_i}{2m_{eff}}} \left( \frac{1+\gamma_T+2\beta\gamma_T}{1+\beta\gamma_T} \right). m_{eff} \text{ рассчитывается по}$$

формуле Бланка  $m_{eff}^{-1} = \frac{\frac{1}{m_{Cl^+}} n_{Cl^+} + \frac{1}{m_{Ar^+}} n_{Ar^+} + \frac{1}{m_{Cl_2^+}} n_{Cl_2^+}}{n_+}$ .  
 Решение уравнения (11) проводилось методом бинарного поиска.

3) Расчет концентрации электронов ( $n_e$ ) при решении уравнения баланса вкладываемой мощности[14]:

$$W = W_{\text{соуд}}^{\text{упр}} + W_{\text{соуд}}^{\text{нупр}} + W_{\text{и}} + W_{\text{эл}} \quad (14)$$

В данное уравнение входит 4 канала потери энергии (упругие(15) и неупругие(16) соударения (Таблица 2) и вылет из области реактора ионов(17) и электронов(18)):

$$W_{\text{соуд}}^{\text{упр}} = \omega_{\text{соуд}}^{\text{упр}} n_e = n_e \left( 3eT_e m_e V \left( k_{Cl_2}^m \frac{n_{Cl_2}}{m_{Cl_2}} + k_{Cl}^m \frac{n_{Cl}}{m_{Cl}} + k_{Ar}^m \frac{n_{Ar}}{m_{Ar}} \right) \right), \quad (15)$$

$$W_{\text{соуд}}^{\text{нупр}} = \omega_{\text{соуд}}^{\text{нупр}} n_e = n_e \left( eV \left( n_{Cl_2} \sum k_{Cl_2}^j E_{Cl_2}^j + n_{Cl} \sum k_{Cl}^j E_{Cl}^j + n_{Ar} \sum k_{Ar}^j E_{Ar}^j \right) \right), \quad (16)$$

$$W_{\text{и}} = eV \left( \frac{T_e}{2e} \ln \left( \frac{T_e m_{eff}}{T_i m_e} \right) + 0.5T_e \right) \frac{v_{Cl_2^+} n_{Cl_2^+} + v_{Cl^+} n_{Cl^+} + v_{Ar^+} n_{Ar^+}}{d_c}, \quad (17)$$

$$W_{\text{эл}} = 2eVT_e \frac{v_{Cl_2^+} n_{Cl_2^+} + v_{Cl^+} n_{Cl^+} + v_{Ar^+} n_{Ar^+}}{d_c}. \quad (18)$$

Из-за нелинейности данной системы, а так же из-за того, что в систему входят трансцендентные уравнения, аналитическое решение подобной системы невозможно. Поэтому мы воспользовались итерационным методом, в котором в качестве нулевого приближения задавались типичные для данных условий температура и концентрация электронов ( $T_e$  и  $n_e$ ).

Расчеты проводились при фиксированных условиях возбуждения плазмы ( $p_0 = 10$  мТорр,  $W = 600$  Вт) для рабочей камеры из анодированного алюминия ( $\gamma_{Cl} = 0.02$ ) с размерами  $R = 15$  см и  $L = 14$  см. В качестве варьируемого параметра выступал начальный состав плазмообразующей смеси, характеризуемый величиной доли аргона. В расчетах мы также оценивали погрешность, обусловленную погрешностью используемых данных по сечениям процессов под действием электронного удара. Поэтому результаты расчёта на всех графиках представлены с доверительным интервалом, определенным в предположении гаусовского распределения ошибки, на графиках, где доверительный интервал отсутствует погрешности пренебрежимо малы.

Начальный состав смеси влияет на интегральные характеристики электронной компоненты плазмы.

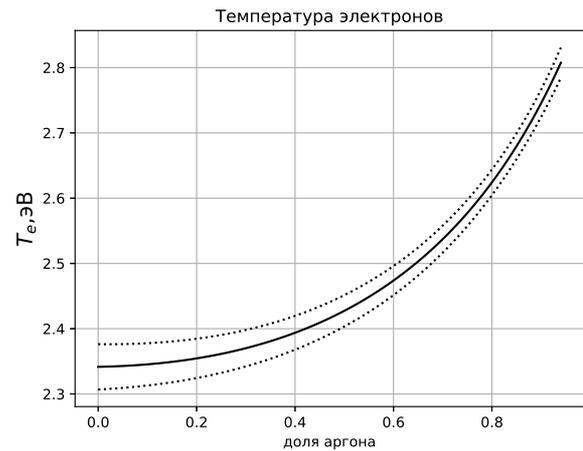


Рис. 1. Зависимость температуры электронов( $T_e$ ) от доли аргона в смеси в условиях  $p_0 = 10$  мТорр,  $T_{gas} = 600$  К,  $R = 15$  см,  $L = 14$  см,  $W = 600$  Вт,  $\gamma_{Cl} = 0.02$

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что основную роль в формировании стационарного состава плазмы играют процессы диссоциации и ионизации молекул плазмообразующего газа под действием электронного удара. Константы скоростей (а, следовательно, и скорости) таких процессов зависят от энергетического распределения электронов в плазме, определяющего среднюю энергию (температуру) электронов. Поэтому рассмотрим в первую очередь как на-

На рис. 1 показана расчетная зависимость температуры электронов от доли аргона в смеси. Из рисунка видно, что увеличение доли аргона приводит к монотонному росту величины  $T_e$ , которое становится более резким при содержаниях аргона более 50%. Отметим, что качественно подобные зависимости наблюдались ранее как для плазмы индукционного разряда в близком к нашему диапазону условий [4], так и в разрядах высокого давления, возбуждаемых от источника постоянного напряжения [17]. Это позволяет заключить,

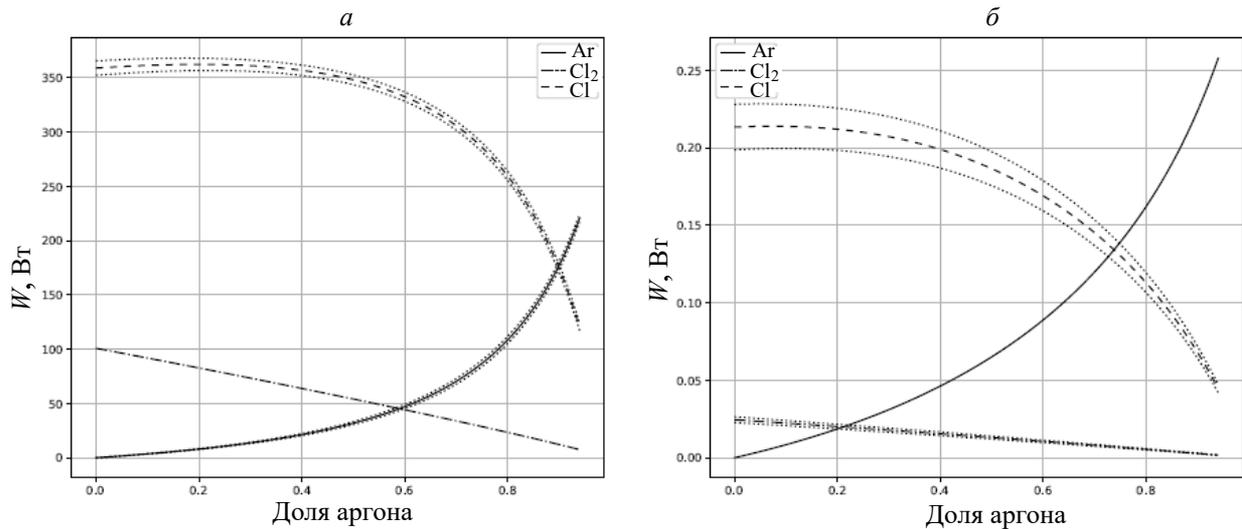


Рис. 2. Зависимость распределение потерей энергии на неупругие(а) и упругие(б) от доли аргона в смеси в условиях  $p_0 = 10$  мТорр,  $T_{gas} = 600$  К,  $R = 15$  см,  $L = 14$  см,  $W = 600$  Вт,  $\gamma_{Cl} = 0.02$

что отмеченное изменение  $T_e$  обусловлено фундаментальными причинами, не связанными с особенностями конструкции реактора и/или условиями возбуждения плазмы.

Очевидно, что в условиях постоянства вкладываемой мощности основной причиной изменения температуры электронов является перераспределение каналов потерь энергии электронов при изменении состава плазмы. Из рис. 2 можно заключить, что

- основным каналом потерь энергии электронов в рассматриваемом диапазоне условий являются неупругие столкновения с частицами газа;
- основные потери в неупругих процессах приходятся на столкновения электронов с атомами хлора;
- энергетический вклад атомов аргона в суммарное рассеяние электронов становится заметным только при содержании аргона в смеси более 80%.

Причиной последнего эффекта является то, что атомы аргона характеризуются более высокими пороговыми энергиями возбуждения, но низкими сечениями процесса по сравнению с атомами хлора. Поэтому увеличение доли аргона в смеси сопровождается снижением суммарных потерь энергии электронов (как это можно видеть из рис. 2(а)) и увеличением их температуры.

Рост температуры электронов закономерно приводит к увеличению констант скоростей процессов под действием электронного удара, в том числе — ионизации. Расчеты показали, что константа скорости ионизации аргона (реакция 1) выше, чем для атомов хлора (реакция 3) по абсолютной величине, а также демонстрирует более резкий рост при увеличении температуры электронов из-за более высокой пороговой

энергии. Поэтому увеличены доли аргона смеси приводит к росту эффективности ионизации и, как следствие, к увеличению концентраций результирующих частиц — электронов и положительных ионов (рис. 3). Очевидно также, что переход к смесям с высоким содержанием аргона соответствует переходу от электроотрицательной к электроположительной плазме. Физически это обеспечивается снижением скорости диссоциативного прилипания электронов к молекулам хлора (реакция 5) и концентрации отрицательных ионов из-за снижения содержания Cl<sub>2</sub> в плазмообразующем газе. Последний эффект наглядно иллюстрируется уменьшением «разрыва» между величинами  $n_e$  и  $n_+$  с ростом доли аргона в смеси.

Расчеты состава плазмы показали, что доминирующим активным компонентом газовой фазы являются атомы хлора (рис. 4), при этом концентрации молекул Cl<sub>2</sub> ниже в пределах порядка величины. Очевидно, что именно это факт и объясняет почему потери энергии электронов при столкновениях с атомами хлора существенно выше, чем с молекулами. Большие скорости и близкие к 100% степени диссоциации молекул хлора (рис. 5) обеспечиваются сочетанием высокой константы скорости диссоциации (реакция 4) и растущей концентрацией электронов, как показано на рис. 3. Такая ситуация является характерной для плазмы низкого давления с концентрацией заряженных частиц более  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  [2, 4, 6]. Из рис. 4 можно видеть также, что доминирующим положительным ионом в области до 80% аргона является Cl<sub>+</sub>, однако разница концентраций по сравнению с аналогичными молекулярными ионами заметно меньше, чем для нейтральных частиц. Это связано с тем, что константа скорости ионизации молекул хлора (реакция 3) значительно выше, чем для атомов (реакция 2).

Увеличение доли Ar приводит к ещё одному, на пер-

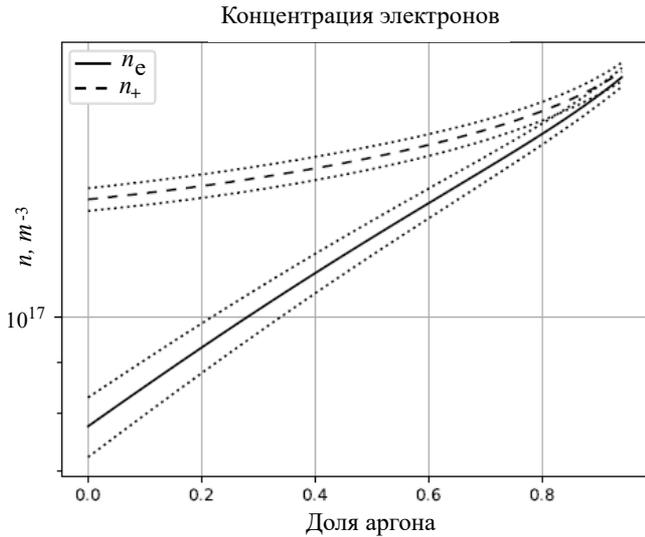


Рис. 3. Зависимость концентраций электронов ( $n_e$ ) и положительно заряженных ионов ( $n_+$ ) от доли аргона в смеси в условиях  $p_0 = 10$  мТорр,  $T_{gas} = 600$  К,  $R = 15$  см,  $L = 14$  см,  $W = 600$  Вт,  $\gamma_{Cl} = 0.02$

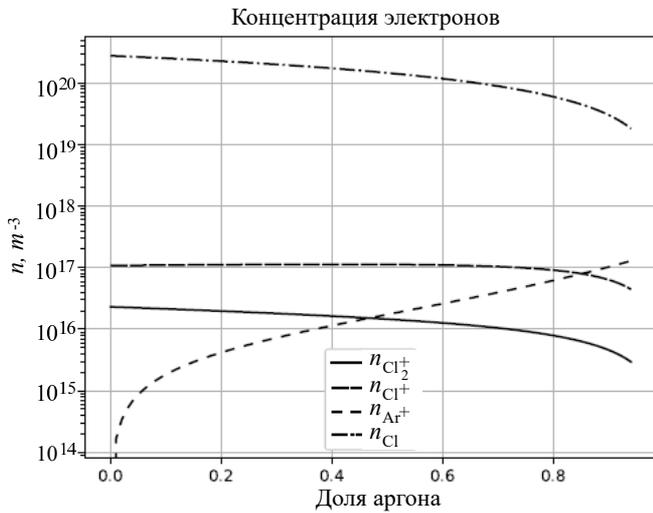


Рис. 4. Зависимость концентрации ионов ( $Cl^+$ ,  $Cl_2^+$ ,  $Cl^-$ ) и радикалов Cl от доли аргона в смеси в условиях  $p_0 = 10$  мТорр,  $T_{gas} = 600$  К,  $R = 15$  см,  $L = 14$  см,  $W = 600$  Вт,  $\gamma_{Cl} = 0.02$

вый взгляд неочевидному, результату. При повышении средней энергии электронов они эффективнее вступают в реакцию диссоциации и молекул  $Cl_2$  по сравнению с радикалами Cl становится меньше. Данный эффект подтверждается расчётными данными степени диссоциации молекул  $Cl_2$  (рис. 5)

В заключении отметим, что рассмотренные выше результаты не имеют прямого экспериментального подтверждения. В то же время, они имеют хорошее качественное согласие с данными других авторов, полученными как экспериментальным путем [8, 10], так и при моделировании плазмы [4, 6–10]. Это позволяет гово-

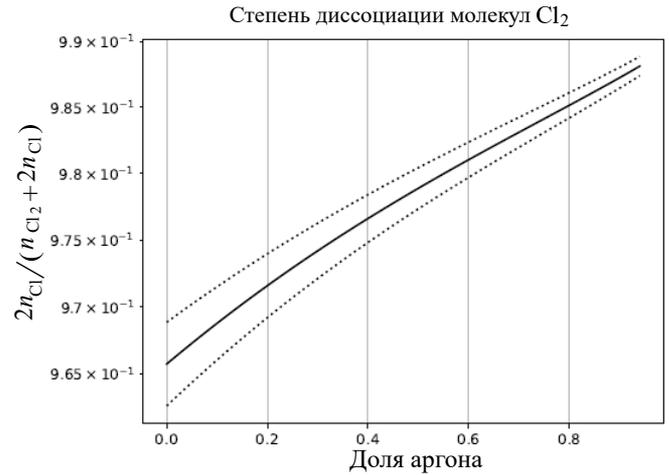


Рис. 5. Зависимость степени диссоциации молекул  $Cl_2$  ( $\frac{2n_{Cl}}{2n_{Cl} + n_{Cl_2}}$ ) от доли аргона в смеси в условиях  $p_0 = 10$  мТорр,  $T_{gas} = 600$  К,  $R = 15$  см,  $L = 14$  см,  $W = 600$  Вт,  $\gamma_{Cl} = 0.02$

рить о корректности используемой кинетической схемы, а также подтверждает применимость допущений, использованных при разработке алгоритма модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена самосогласованная модель, описывающая физико-химические процессы, протекающие в неравновесной низкотемпературной газоразрядной плазме низкого давления в смеси  $Cl_2/Ar$ . Получены расчетные данные по влиянию начального состава смеси на физические параметры плазмы, а также концентрации нейтральных и заряженных частиц. Установлено, что увеличены доли аргона в смеси приводит к увеличению температуры электронов (из-за снижения потерь энергии электронов в неупругих процессах) и способствует росту их концентрации (из-за увеличения скорости ионизации и снижения электроотрицательности плазмы). Показано, что степень диссоциации молекул хлора близка к 100 %, что обеспечивает доминирование радикалов Cl в газовой фазе. Полученные результаты качественно согласуются с литературными данными, полученными при диагностике и моделировании плазмы. Это свидетельствует о корректности кинетической схемы и предпосылок, использованных при построении алгоритма модели.

## Благодарности

Автор выражает благодарность профессору А. М. Ефремову за помощь в формировании кинетической схемы и поиске экспериментальных данных, подтверждающих её корректность.

- [1] Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов. (2011).
- [2] Lee C., Lieberman M.A. // J. Vac. Sci. Technol. **13**. 368. (1995).
- [3] Ashida S., Lee C., Lieberman M.A. // J. Vac. Sci. Technol. **13**. 2498. (1995).
- [4] Ефремов А.М., Kim G.-H., Kim J.-G. et al. // Microelectronic Engineering. **84**. 136. (2007).
- [5] Subramonium P., Kushner M.J. // J. Vac. Sci. Technol. **20**. 325. (2002).
- [6] Hsu C.-C., Nierode M.A., Coburn J.W., Graves D.B. // J. of Physics D: Appl. Phys. **39**. 3272. (2006).
- [7] Tinck S., Boullart W., Bogaerts A. // Plasma Sources Science and Technology. **20**. 045012. (2011).
- [8] Despiau-Pujo E., Brihoum M., Bodart P. et al. // J. of Physics D: Appl. Phys. **47**. 455201. (2014).
- [9] Ефремов А., Min N.-K., Choi B.-G. et al. // Journal of The Electrochemical Society. **155**. D777. (2008).
- [10] Tinck S., Boullart W., Bogaerts A. // J. of Phys. D: Appl. Phys. **41**. 065207. (2008).
- [11] Rossmagel S.M., Westwood W.D., Cuomo J.J. Handbook of Plasma Processing Technology: Fundamental, Etching, Deposition and Surface Interactions (Materials Science and Process Technology). 1991.
- [12] Bukowski J.D., Graves D.B., Vitello P. // J. of Appl. Phys. **80**. 2614. (1996).
- [13] Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. 2005.
- [14] Ефремов А.М., Светцов В.И., Рыбкин В.В. Вакуумно-плазменные процессы и технологии. 2006.
- [15] Lee C., Graves D.B., Lieberman M.A. // Plasma Chemistry and Plasma Processing **13**. 2498. (1996).
- [16] Griffin D.C., Pindzola M.S., Gorczyca T.W., Badnell N.R. // Phys. Rev. A. **51**. 2265. (1995).
- [17] Bassett N.L., Economou D.J. // J. of Appl. Phys. **75**. 1931. (1994).

## Investigation of inductively coupled plasma parameters during the etching of a polysilicon gate

F. V. Oksanichenko

*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)  
Landau Phystech School of Physics and Research  
Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia  
E-mail: foksanichenko@niime.ru*

A self-consistent 0-dimensional plasma model of the  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$  mixture is proposed under conditions typical for plasma chemical etching of a polysilicon gate. The model is based on the joint solution of the equations of chemical kinetics, plasma quasi-neutrality and power balance for steady-state plasma conditions. The solution was carried out by iteration method. The model took into account 3 types of neutral particles ( $\text{Cl}_2$ , Ar, radical Cl) and 4 types of ions ( $\text{Cl}^+$ ,  $\text{Cl}_2^+$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ). The initial composition of the mixture, the input power and the gas pressure were used as input parameters. Calculated data on the effect of the initial composition of the mixture on the physical parameters of the plasma and the concentration of active particles were obtained. The results are qualitatively consistent with the literature data.

PACS: 52.77.Bn, 52.20.Fs.

*Keywords:* plasma chemical etching; nonequilibrium low-temperature gas-discharge plasma; plasma modeling; polysilicon etching.

*Received 07 June 2024.*

### Сведения об авторе

Оксаниченко Федор Владимирович — студент, техник; e-mail: foksanichenko@niime.ru.