

ЧИСЛЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

Ю. Н. ГРИГОРЬЕВ, А. Г. ГОРОБЧУК

Институт вычислительных технологий СО РАН

Новосибирск, Россия

e-mail: grigor@adm.ict.nsc.ru, accurate@net.ict.nsc.ru

The comparative computations of two most used plasma-chemical etching reactor (PCER) schemes pedestal and stadium, distinguished by organization of supply and exhaust of gases, were carried out. The reacting gas medium was considered in hydrodynamic approach as binary gas mixture. The parameters of RF-discharge and rate constants of the main processes are assumed as known. The dependence of the etching uniformity on the protector geometry and regime parameter was studied. It was shown that the distribution of diffusion flows in reactor volume exert the main influence on the etching uniformity of wafer. The optimum geometry of protector have been found for wide range of operating regimes. The results of computations allow us to optimize the choice of PCER parameters for considered schemes.

1. Введение

В производственных процессах получения микросхем с помощью плазмохимического травления используются вредные химические вещества, представляющие серьезную опасность для окружающей среды. Для того, чтобы уменьшить экологический ущерб, необходимо максимально оптимизировать процесс в ПХР. Так, например, определенным подбором конструкции реактора, состава, давления и расхода рабочих газов можно управлять ходом и характеристиками плазмохимического травления (ПХТ), получать геометрически совершенные поверхности, имеющие высокую степень гладкости и плоскопараллельности. Однако большое число определяющих параметров ПХТ затрудняет изучение комплекса физико-химических процессов в планарных реакторах.

В настоящей работе для двух конструктивных схем ПХР сделан переход от исследования зависимости скорости и однородности травления как функции внешних параметров (давления, расхода рабочего газа и ионного тока) к изучению механизмов процесса травления.

2. Постановка задачи и основные уравнения

Описание моделируемых ПХР. Реакторы состоят из двух параллельных дисковых электродов [1–3], между которыми приложено высокочастотное (ВЧ) напряжение (рис. 1).

Активная среда возникает в межэлектродном пространстве. На одном из электродов (аноде) размещаются полупроводниковая подложка и кольцевой протектор [2, 3], являющийся механическим средством управления процессом травления. Исходный газ равномерно подается в рабочее пространство через перфорированную поверхность противоположного электрода (катода). Недиссоциированные молекулы исходного газа, продукты диссоциации, рекомбинации и травления удаляются либо в радиальном направлении по всей высоте реактора (stadium), либо в аксиальном направлении через щель на периферии электрода, несущего образец (pedestal). Предполагается, что течение газа ламинарное, изотермическое и аксиально симметричное.

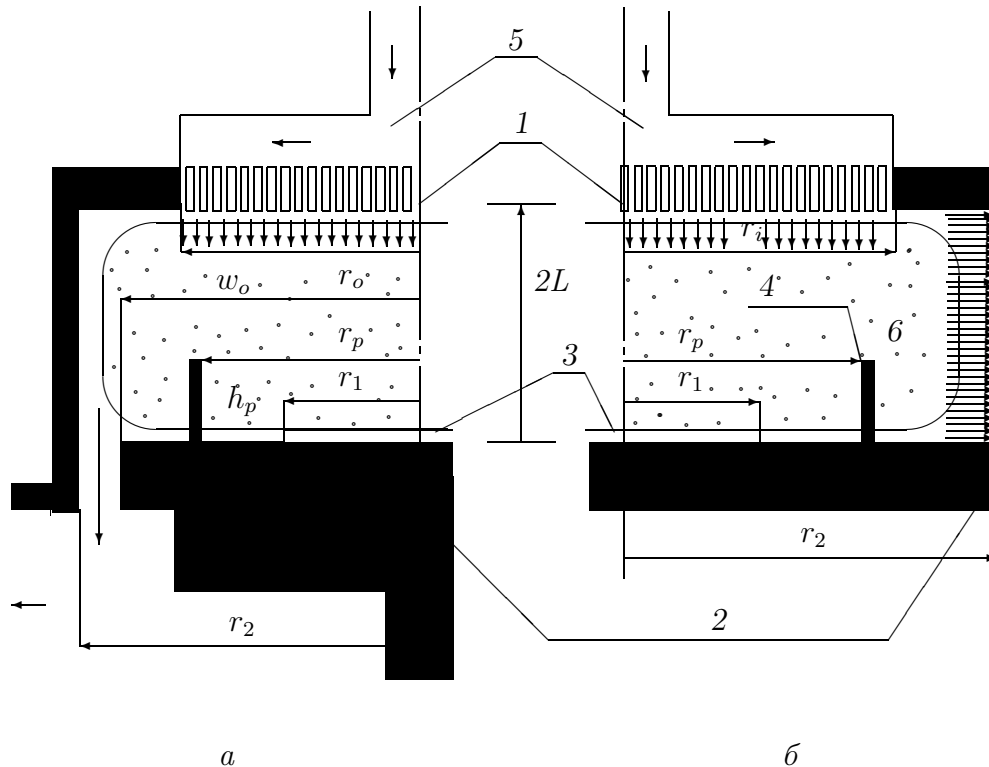


Рис. 1. Конструктивные схемы ПХР: а — pedestal, б — stadium.

1 — верхний электрод (катод), 2 — нижний электрод (анод), 3 — образец, 4 — протектор, 5 — исходный газ, б — зона плазменного разряда; r_1 — радиус образца, r_2 — максимальный радиус рабочей камеры, $2L$ — высота реактора, w_0 — скорость потока газа на входе.

Кинетические процессы в реакторах. Под действием электронных ударов в плазме ВЧ-разряда из молекул рабочего газа образуются требуемые химически активные частицы (за счет ионизации, диссоциации и т. д.), с помощью которых производится очистка и травление полупроводниковой подложки [1–3]. Основным каналом гибели активных частиц являются объемная и гетерогенная рекомбинации в рабочем пространстве реактора и на поверхностях, контактирующих с плазмой. В настоящих расчетах использовалась математическая модель, в которой многокомпонентная рабочая среда в реакторе рассматривалась как бинарная газовая смесь. Кроме исходного газа в ней выделялась активная компонента, поддерживающая процесс травления образца.

Движение газовой смеси. Движение газовой смеси в целом описывалось системой уравнений Навье — Стокса [1–5]. В цилиндрической системе координат безразмерные

уравнения движения газа представляются в форме

$$u \frac{\partial u}{\partial \xi} + w \frac{\partial u}{\partial \zeta} = -\frac{1}{\rho w_0^2} \frac{\partial p}{\partial \xi} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} - \frac{u}{\xi} + A^2 \frac{\partial^2 u}{\partial \zeta^2} \right), \quad (1)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial \xi} + w \frac{\partial w}{\partial \zeta} = -\frac{A}{\rho w_0^2} \frac{\partial p}{\partial \zeta} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial w}{\partial \xi} + A^2 \frac{\partial^2 w}{\partial \zeta^2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{u}{\xi} + A \frac{\partial w}{\partial \zeta} = 0, \quad (3)$$

$$\text{Re} = \frac{w_0 r_2 \rho}{\kappa}, \quad A = \frac{r_2}{2L}$$

Здесь ξ, ζ — безразмерные радиальная и осевая координаты, u, w — соответствующие компоненты вектора скорости, Re — число Рейнольдса, ρ, p — плотность и давление смеси, κ — коэффициент динамической вязкости. Радиальная и осевая координаты масштабированы на r_2 и $2L$ соответственно. Скоростные переменные обезразмерены на скорость газа на входе w_0 .

Применив к уравнению (1) оператор $A\partial/\partial\zeta$, а к (2) — $\partial/\partial\xi$, перейдем к переменным функция тока ψ — вихрь ω . Система (1)–(3) принимает вид

$$u \frac{\partial \omega}{\partial \xi} + w \frac{\partial \omega}{\partial \zeta} - \frac{u\omega}{\xi} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial \omega}{\partial \xi} - \frac{\omega}{\xi^2} + A^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial \zeta^2} \right), \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} - \frac{1}{\xi} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} + A^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \zeta^2} \right) + \xi \omega = 0, \quad (5)$$

$$\omega = -\frac{\partial w}{\partial \xi} + A \frac{\partial u}{\partial \zeta}, \quad u = -\frac{1}{\xi} \frac{\partial \psi}{\partial \zeta}, \quad w = \frac{1}{\xi} \frac{\partial \psi}{\partial \xi}$$

Для уравнений (1)–(3) на границах расчетной области ставятся следующие краевые условия:

на непроницаемой поверхности анода, включая образец, для реакторов типа pedestal ($0 \leq r \leq r_o$) и stadium ($0 \leq r \leq r_2$) —

$$u = 0, \quad w = 0, \quad z = 0;$$

на протекторе в реакторах обоих типов —

$$u = 0, \quad w = 0, \quad r = r_p, \quad 0 \leq z \leq h_p;$$

на аноде для реактора типа pedestal (поверхность откачки) —

$$u = \frac{r_i^2}{(1 - r_o^2)}, \quad r_o < r < r_2, \quad z = 0;$$

на боковой непроницаемой поверхности для реактора типа pedestal —

$$u = 0, \quad w = 0, \quad r = r_2, \quad 0 \leq z \leq 2L;$$

на боковой поверхности откачки для реактора типа stadium —

$$w = 0, \quad r = r_2, \quad 0 < z < 2L;$$

на катоде в реакторах обоих типов (непроницаемые поверхности) —

$$u = 0, \quad w = 0, \quad r_i < r \leq r_2, \quad z = 2L;$$

на катоде в реакторах обоих типов (поверхность напуска рабочего газа) —

$$u = 0, w = -1, 0 \leq r \leq r_i, z = 2L;$$

на оси симметрии в реакторах обоих типов ставится условие —

$$u = 0, r = 0, 0 < z < 2L.$$

Распределение концентрации активной компоненты. Распределение концентрации активной компоненты рассчитывалось из уравнения конвективно-диффузионного переноса

$$2\text{Pe} \left(u \frac{\partial C}{\partial \xi} + w \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right) = \left(\frac{\partial^2 C}{\partial \zeta^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial C}{\partial \xi} + A^2 \frac{\partial^2 C}{\partial \zeta^2} \right) + \text{Da}(1 - C). \quad (6)$$

Числа Пекле и Дамкеллера определены следующим образом:

$$\text{Pe} = \frac{w_0 r_2}{2D}, \quad \text{Da} = \frac{k_e \bar{n}_e r_2^2}{D}.$$

Концентрация C отнесена к молярной концентрации, определяемой параметрами смеси; \bar{n}_e — средняя плотность электронов, k_e — константа скорости ударной диссоциации.

В правую часть уравнения (6) включены источниковые члены, описывающие производство активных частиц в объеме реактора. В реакторе типа stadium использовались симметричные конструкции ВЧ-электродов, поэтому в расчетах распределение концентрации электронов предполагалось однородным в радиальном и аксиальном направлениях по объему реактора. Скорость генерации химически активных частиц также считалась постоянной. В реакторе типа pedestal анод и катод имели различные диаметры электродов. Плотность электронов по объему реактора принималась постоянной в подобласти ограниченной конической поверхностью [2, 3]. Вне этой подобласти предполагалось отсутствие производства активных частиц электронным ударом.

Процессы химического травления и реакции рекомбинации на поверхностях учитываются в граничных условиях, в которые введены безразмерные комплексы

$$\mu = 1 - \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad \gamma_a = \frac{k_a r_2}{D}, \quad \gamma_c = \frac{k_c r_2}{D}, \quad \Phi_s = \frac{k_s r_2}{D}, \quad \Phi_i = \frac{k_i r_2}{D}.$$

Здесь k_a — константа рекомбинации на аноде; k_c — константа рекомбинации на катоде; k_s — константа скорости спонтанного травления; k_i — константа скорости ионно-индуцированного травления; D — коэффициент диффузии; μ_1, μ_2 — молекулярные веса активной компоненты и исходного газа соответственно. Влияние ионной бомбардировки представляется константой ионно-индуцированного травления, добавляемой к константе спонтанного травления.

Граничные условия для концентрации активной компоненты имеют следующий вид: на поверхности образца для реакторов pedestal и stadium —

$$\frac{\partial C}{\partial \zeta} = \frac{(\Phi_s + \Phi_i)}{A} C(1 - \mu C), \quad 0 \leq r \leq r_1, \quad z = 0;$$

на аноде для реакторов типа pedestal ($r_1 < r \leq r_o$) и stadium ($r_1 < r \leq r_2$) —

$$\frac{\partial C}{\partial \zeta} = \frac{\gamma_a}{A} C(1 - \mu C), \quad z = 0;$$

на поверхности протектора в реакторах обоих типов (внутренний и внешний диаметры соответственно) —

$$\frac{\partial C}{\partial \xi} = \pm \gamma_a C(1 - \mu C), \quad r = r_p, \quad 0 \leq z \leq h_p;$$

на поверхности откачки для реактора типа pedestal —

$$\frac{\partial C}{\partial \zeta} = 0, \quad r_o < r < r_2, \quad z = 0;$$

на боковой поверхности для реактора типа pedestal —

$$\frac{\partial C}{\partial \xi} = \gamma_c C(1 - \mu C), \quad r = r_2, \quad 0 \leq z \leq 2L;$$

на боковой поверхности для реактора типа stadium (поверхность откачки) —

$$\frac{\partial C}{\partial \xi} = 0, \quad r = r_2, \quad 0 < z < 2L;$$

на катоде в реакторах pedestal и stadium —

$$\frac{\partial C}{\partial \zeta} = -\frac{\gamma_c}{A} C(1 - \mu C), \quad r_i < r \leq r_2, \quad z = 2L;$$

на катоде в реакторах обоих типов (поверхность напуска рабочего газа) —

$$\frac{\partial C}{\partial \zeta} = -\frac{\gamma_c + 2Pe}{A} C(1 - \mu C), \quad 0 \leq r \leq r_i, \quad z = 2L;$$

на оси симметрии в реакторах pedestal и stadium —

$$\frac{\partial C}{\partial \xi} = 0, \quad r = 0, \quad 0 < z < 2L.$$

Для численного решения использовались итерационные конечно-разностные схемы на неравномерных сетках. Гидродинамика рассчитывалась в переменных функция тока — вихрь. По найденным распределениям скоростей потока газа вычислялась концентрация активных частиц в объеме реакторов. Далее определялись скорость и неоднородность спонтанного травления, а также рассчитывались векторные поля конвективных и диффузионных потоков активной компоненты.

3. Результаты численного моделирования

Исходные данные. Конструкционные размеры реакторов, использованные в расчетах, приведены в табл. 1. Определяющие параметры процесса изменялись в диапазоне, характерном для промышленных реакторов: давление в рабочей камере реактора (p) 0.1–1 торр, средняя температура газа (T_g) 400 К, температура электродов (T_w) 300 К, расход рабочего газа (Q) 30–100 см³/мин, объемная плотность электронов (n_e) $10^9 - 10^{11}$ см⁻³, плотность ионного тока (I^+) 5–10 мкА/см³. За основу был принят процесс травления кремния Si в плазме тетрафторида углерода CF₄. Константы физико-химических процессов и безразмерные параметры брались аналогично [1–3].

Т а б л и ц а 1

Тип реактора	Размерность	r_i	r_2	r_p	h_p	r_1	r_0	$2L$
Pedestal	мм	60	105	38–60	5–15	38	96	40
Stadium	мм	75	75	38–60	5–15	38	–	40

Неоднородность травления. По найденному распределению концентрации фтора в ПХР на основе зависимости [6] рассчитывалась скорость спонтанного травления полупроводниковой пластины. Типичные профили скорости травления по радиусу образца представлены на рис. 2.

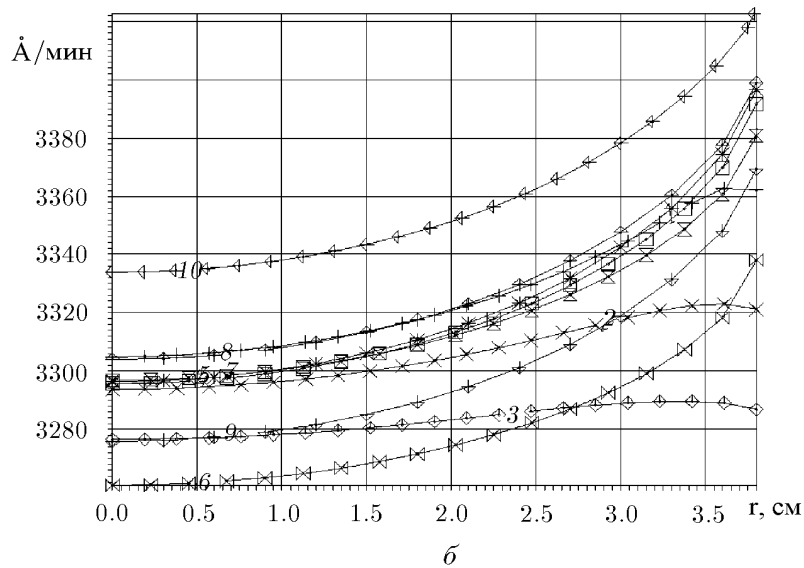
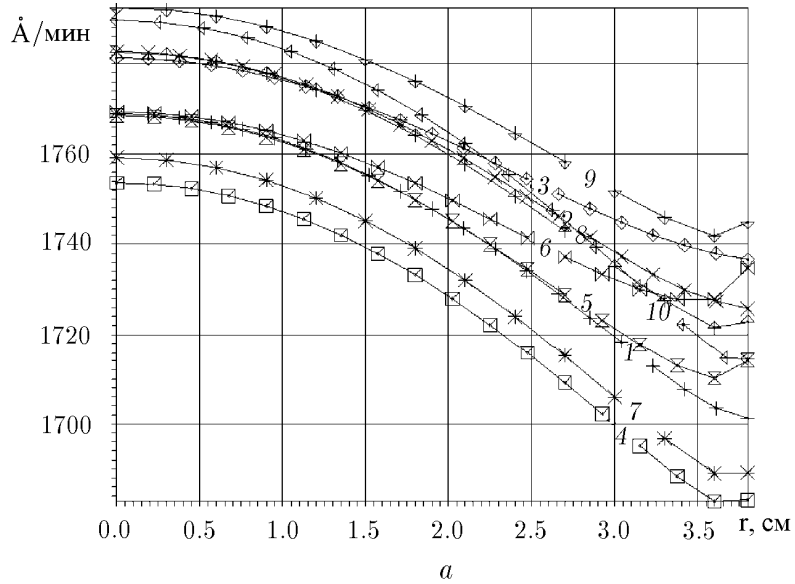


Рис. 2. Скорости спонтанного травления для различных высот и диаметров протектора: *a* — pedestal, *b* — stadium.

Параметры: $p = 0.2$ торр, $Q = 30 \text{ см}^3/\text{мин}$, $Re = 0.053$, $Pe = 0.143$, $Da = 2.88$. (Усл. обозн. см. в табл. 2.)

Для анализа полученных зависимостей были использованы следующие интегральные характеристики:

$$C_m = \frac{2}{r_1^2} \int_0^{r_1} C(r)rdr \quad -$$

среднее значение концентрации фтора на поверхности образца;

$$I_n = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2C_m} -$$

индекс неоднородности травления.

Для схемы stadium зависимости скорости и индекса неоднородности спонтанного травления в общих чертах совпадают с результатами работ [1–3] для всех размеров протектора.

При фиксированном ионном токе и давлении индекс неоднородности весьма слабо зависит от расхода газа. Ионный ток оказывает на неоднородность профиля наиболее сильное влияние. При всех значениях других параметров режима и независимо от размеров протектора с ростом ионного тока индекс неоднородности травления растет из-за роста градиента концентрации на краю образца. Скорость спонтанного травления (концентрация фтора) с ростом ионного тока уменьшается вследствие расходования фтора в процессе ионно-индуцированного травления.

Рост давления в пределах порядка приводит к пропорциональному возрастанию скорости спонтанного травления (величины C_m). Одновременно растет индекс неоднородности. Действие протектора в схеме stadium можно характеризовать следующим образом (см. рис. 2, б). Скорость спонтанного травления в реакторе без протектора всегда выше, чем в реакторе с протектором, хотя это превышение не слишком велико. Если радиус протектора совпадает с радиусом образца $r_p = r_1$, то индекс неоднородности травления I_n при любой высоте протектора оказывается меньшим, чем в отсутствие протектора. При этом с увеличением высоты протектора в диапазоне 0.5 – 1.5 см индекс неоднородности существенно уменьшается, а скорость спонтанного травления понижается незначительно.

Т а б л и ц а 2

N	Mr	r_p	h_p	C_m		I_n	
				pedestal	stadium	pedestal	stadium
1	+	38	0.5	0.37652	0.72591	0.01956	0.00867
2	×	38	1.0	0.38047	0.72072	0.01627	0.00443
3	⊕	38	1.5	0.38160	0.71504	0.01274	0.00199
4	☑	45	0.5	0.37250	0.72534	0.02068	0.01439
5	⊗	45	1.0	0.37700	0.72452	0.01686	0.01261
6	⊗	45	1.5	0.37900	0.71597	0.01193	0.01173
7	*	60	0.5	0.37380	0.72595	0.02044	0.01503
8	⊕	60	1.0	0.37991	0.72716	0.01749	0.01422
9	⊕	60	1.5	0.38326	0.72092	0.01434	0.01412
10	⊕	–	–	0.38021	0.73354	0.02251	0.01316

Для протекторов большего радиуса, рассматривавшихся в расчетах (см. табл. 2), было показано, что при минимальной их высоте $h_p = 0.5$ см индекс неоднородности профиля оказывается бóльшим, чем в реакторе без протектора, а увеличение высоты приводит к монотонному убыванию индекса I_n . Такое воздействие протектора имело место на всех рассмотренных режимах. Это позволяет заключить, что геометрия протектора, радиус которого совпадает с радиусом образца, а высота примерно равна полувысоте реактора, является оптимальной для схемы stadium в смысле достижения наилучшей однородности травления.

Для схемы pedestal зависимость индекса неоднородности травления образца от размеров протектора и параметров режима оказывается более сложной. Например, во всех режимах при $I^+ = 0$ в отличие от схемы stadium скорость спонтанного травления максимальна в центре образца (см. рис. 2, а). Затем по мере возрастания I^+ профиль скорости (концентрации) становится немонотонным и, наконец, повторяет вид, характерный для схемы stadium. Однако можно заметить, что зависимости индекса неоднородности и скорости спонтанного травления от ионного тока и давления в смысле тенденций близки к схеме stadium.

Относительно характера действия протектора для схемы pedestal необходимо отметить, что протектор, радиус которого совпадает с радиусом образца, наиболее близок к оптимальному в смысле получения однородных образцов при всех значениях рассмотренных параметров. В частности, только при $r_p = r_1$ на всех режимах получаются образцы с монотонным профилем. При этом индекс неоднородности всегда оказывается близким к минимальному на данном режиме. Протекторы большего радиуса чаще приводят к возрастанию неоднородности. Это косвенно свидетельствует о том, что механизм действия протектора в первую очередь связан с ослаблением диффузии активной примеси из приосевой области на периферию. Большие по размерам кольца сильнее снижают скорость травления. Следует также отметить, что более сложные взаимосвязи параметров режима и геометрии протектора с качеством обработки образца определяются здесь неоднородностью разряда [2, 3], которая закладывалась в модель. Расчеты схемы pedestal с однородным по объему разрядом показали, что в этом случае распределение концентрации активной компоненты, профили скорости травления и характер влияния протектора мало отличаются от схемы stadium. Таким образом, форма и однородность ВЧ-разряда может существенно влиять на качество обработки в ПХР.

Конвективный и диффузионный перенос активной компоненты. Для понимания возможностей оптимизации однородности травления с помощью механических протекторов и механизма их действия необходимо иметь картину распределения потоков активной компоненты в объеме реактора. С этой целью для ряда режимов и различных размеров протекторов рассчитывались векторные поля потоков

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_c + \mathbf{Q}_d,$$

где конвективный поток \mathbf{Q}_c и диффузионный \mathbf{Q}_d определены соотношениями

$$\mathbf{Q}_c = C(r, z)\mathbf{V}(r, z), \quad \mathbf{Q}_d = -\frac{A}{2Pe} \text{grad } C(r, z),$$

$C(r, z), \mathbf{V}(r, z)$ — расчетные поля концентрации и скорости.

Анализ полученных результатов позволяет выделить характерные особенности процесса переноса в рассматриваемых реакторах.

На рис. 3–6 показано распределение потоков в схеме stadium. Стрелки указывают направление и величину потока. Отображение величины потока длиной стрелки имеет качественный характер.

Рис. 3 дает картину диффузионных потоков в реакторе без протектора. Вблизи катода и полупроводниковой пластинки диффузионный поток направлен по нормали к их поверхностям. Из-за большой разницы реакционной способности материалов образца и анода в окрестности $r_p = 1.5$ см возникает характерная область **A**, где интенсивный поток направлен от периферии к образцу. Видно также, что в диффузионных потоках в большей части реактора преобладает аксиальная составляющая. Маркеры выделяют слой, в котором $\partial C/\partial z = 0$ и z -компонента диффузионного потока меняет знак. Его положение

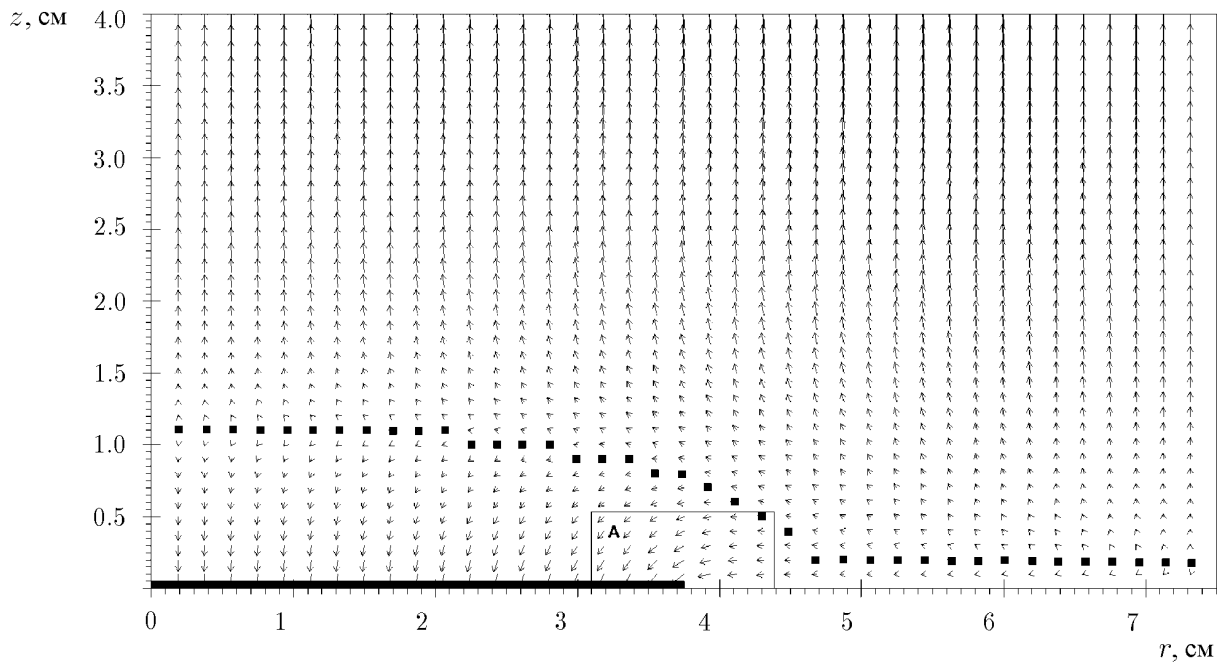


Рис. 3. Распределение диффузионных потоков активной компоненты в реакторе типа stadium в отсутствие кольцевого протектора. (Параметры см. на рис. 2.)

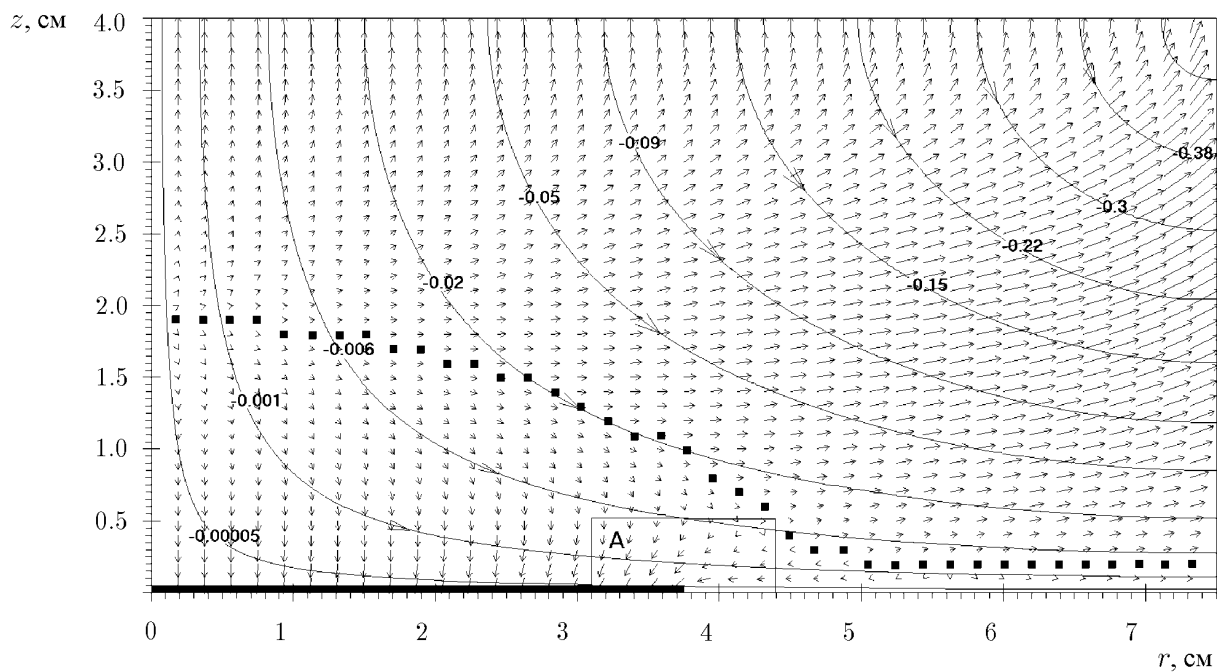


Рис. 4. Изолинии функции тока и полные потоки активной компоненты в реакторе типа stadium в отсутствие кольцевого протектора. (Параметры см. на рис. 2.)

зависит от соотношения реакционных способностей катода, анода и образца, а также влияния конвекции на распределение концентрации фтора.

Рис. 4 показывает распределение полных потоков при отсутствии протектора. Здесь же нанесены линии тока, позволяющие представить направление конвективного переноса. Из сравнения рис. 3 и 4 видно, что конвекция оказывает заметное влияние только на периферии реактора, откуда идет откачка, а также в зоне слоя $\partial C/\partial z = 0$, где диффузионные потоки малы. В результате возникает отмеченная маркерами граница, на которой $Q_z = 0$, то есть нет переноса фтора в направлении оси z . По отношению к слою $\partial C/\partial z = 0$ на рис. 3 она сдвигается к катоду, так как здесь конвективные потоки имеют преимущественно обратное направление. Можно заметить, что конвекция почти не влияет на распределение полных потоков в зоне **A**, хотя в определенной мере направлена здесь против диффузии. Отсюда следует, что неравномерное травление в данном случае определяется неоднородностью диффузии вблизи края образца.

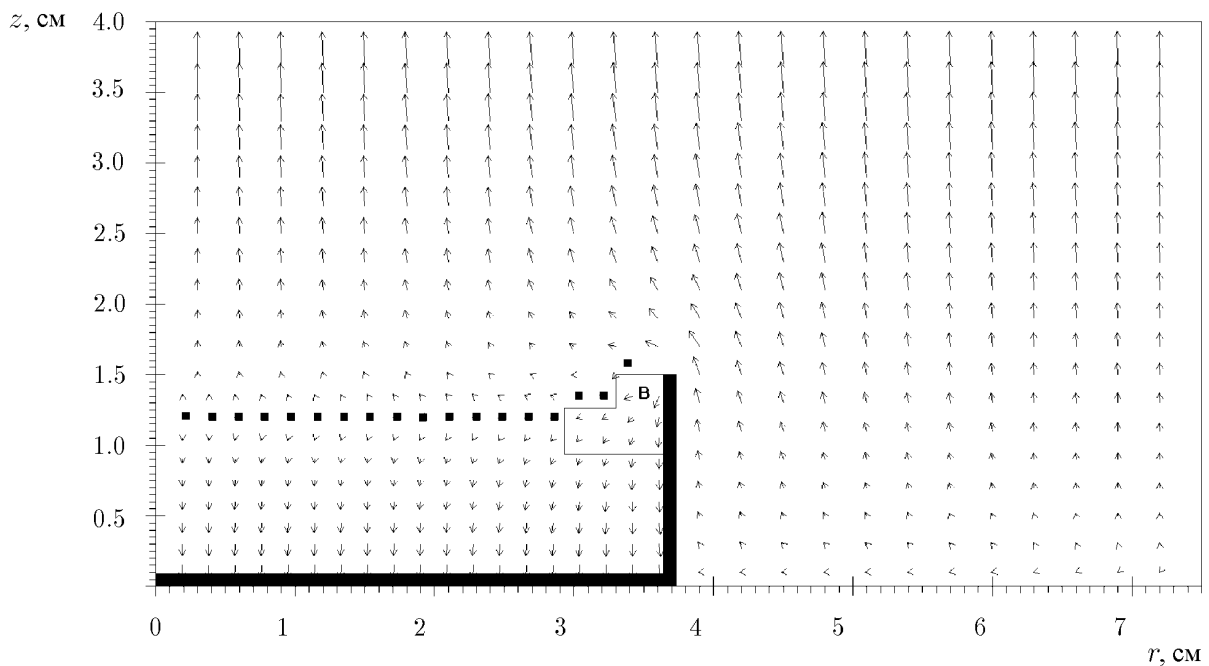


Рис. 5. Распределение диффузионных потоков активной компоненты в реакторе типа stadium с протектором оптимальных размеров $r_p = 3.8$ см, $h_p = 1.5$ см. (Параметры см. на рис. 2.)

На рис. 5 и 6 приведено распределение диффузионных и полных потоков в реакторе stadium с протектором оптимальных размеров. Материал протектора имеет низкую реакционную способность. Как показывает рис. 5, протектор, радиус которого совпадает с радиусом образца, прерывает диффузионный поток, возникающий из-за разности реакционных способностей образца и анода. При этом зона **A** (см. рис. 3) полностью исчезает, а отмеченная маркерами граница $\partial C/\partial z = 0$ становится почти прямой ($z = \text{const}$) над большей частью образца. Только у верхней кромки протектора появляется небольшая зона **B**, где влияние малой реакционной способности анода продолжает сказываться.

Нанесенные на рис. 6 линии тока показывают, что в приосевой области, ограниченной протектором, создается структура, подобная течению во впадине. В результате вклад конвекции в полные потоки в этой части еще более ослабляется. Это можно увидеть, сравнивая форму границы $Q_z = 0$ с границей $\partial C/\partial z = 0$ на рис. 5. Полные потоки в зоне **B** также определяются диффузией.

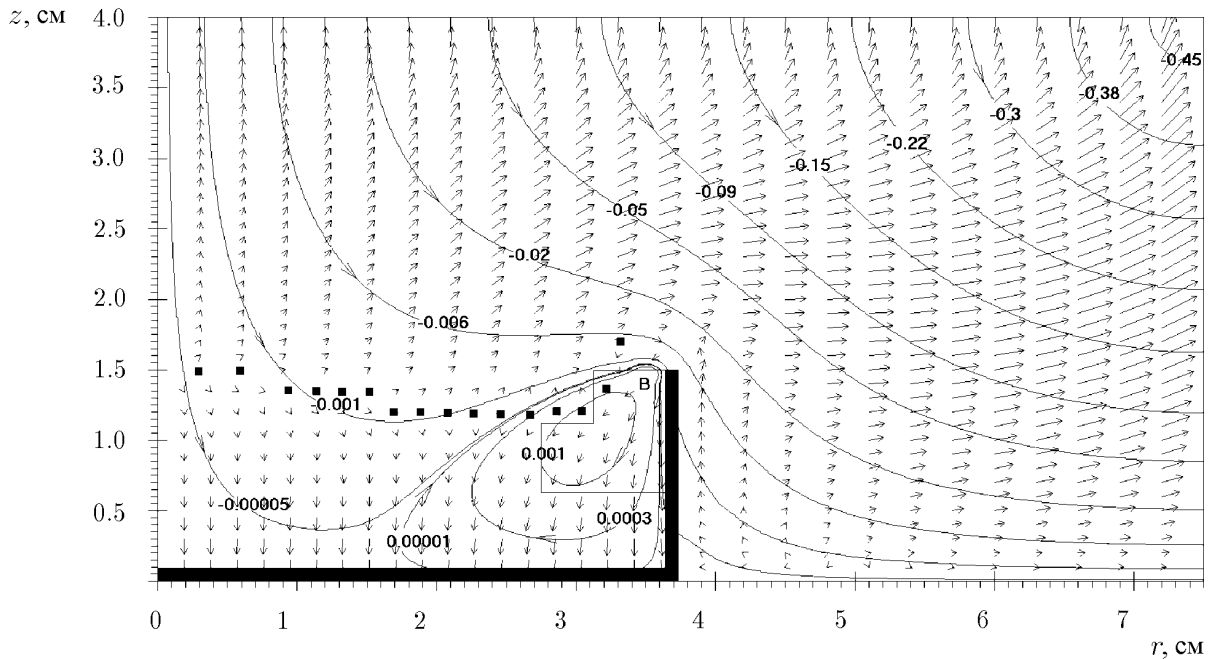


Рис. 6. Изолинии функции тока и полные потоки активной компоненты в реакторе типа stadium с протектором оптимальных размеров $r_p = 3.8$ см, $h_p = 1.5$ см. (Параметры см. на рис. 2.)

При уменьшении высоты протектора возрастает влияние неоднородности в зоне **В**. С увеличением радиуса протектора между ним и краем образца зарождается зона **А** неоднородной диффузии. Поэтому изменение размеров протектора по сравнению с оптимальными приводит к возрастанию неоднородности травления.

Таким образом, механизм действия оптимального кольцевого протектора в схеме stadium состоит в том, что в цилиндрической области над образцом создается замкнутая зона однородных по радиусу потоков, огражденная от диффузии с периферии.

С понижением давления возрастает роль диффузионных потоков, а увеличение расхода несколько повышает вклад конвекции. Однако общая картина распределения потоков мало меняется, и оптимальные размеры сохраняются для рассмотренного диапазона режимов.

В схеме pedestal без протектора, если ВЧ-разряд горит во всем объеме, распределение диффузионных и полных потоков в области над образцом близки к приведенным на рис. 3 и 4. В частности, на обоих распределениях границы раздела аксиальных потоков имеют подобную форму и выделяется зона **А** неоднородной диффузии вблизи границы между образцом и анодом. Даже на периферии реактора картина распределения полных потоков совпадает с показанной на рис. 4. Отличие состоит в том, что здесь основную долю составляет диффузионная компонента. Это связано с расходом фтора на непроницаемой боковой поверхности, выполненной из того же материала, что и катод (γ_c). Поэтому механизм действия и оптимальные размеры протектора полностью совпадают в данном случае со схемой stadium.

Когда зона производства активной компоненты ограничена конической областью [2, 3], картина потоков в реакторе без протектора заметно меняется. Она определяется интенсивной диффузией к границе раздела. В диффузионных потоках появляется значительная радиальная компонента, направленная к периферии, в том числе у поверхности образца.

Зона **A** на краю образца исчезает. Границы раздела аксиальных потоков проявляют более резкое падение. При введении оптимального кольцевого протектора диффузионный поток к границе раздела в области над образцом исчезает. Это создает более однородное распределение концентрации фтора на образце, которое становится монотонным, но сохраняет некоторое убывание от центра к краю образца. Изменение размеров протектора в пределах $r_p = 3.8 - 6.0$ см, $h_p = 0.5 - 1.5$ см увеличивает неоднородность травления, но в меньшем диапазоне, чем в схеме stadium. Видно, что и в этом случае действие протектора сводится к созданию более однородного распределения активной компоненты в приосевой зоне над образцом, которое достигается перекрыванием диффузионного потока от оси к периферии.

Итак, детальное исследование процессов переноса в рассматриваемых схемах ПХР показывает, что на однородность травления основное влияние оказывает распределение диффузионных потоков. Это распределение, в свою очередь, зависит от геометрии реактора, соотношения реакционных способностей отдельных поверхностей, однородности ВЧ-разряда. При этом вклад каждого фактора варьируется так, что может стать определяющим. Поэтому оптимизировать процесс травления можно только на основе математического моделирования.

Таким образом, в статье:

показано, что неоднородность травления образцов определяется в основном диффузией активной компоненты к поверхностям реактора и образца и кинетикой поверхностных реакций на них;

определен механизм действия и найдены оптимальные размеры кольцевого протектора, позволяющие практически минимизировать неоднородность травления образцов во всем диапазоне режимов.

Результаты могут быть использованы при проектировании ПХР.

Список литературы

- [1] БАКЛАНОВ М. Р., ГРИГОРЬЕВ Ю. Н., МЕЛЕШКО С. В., ПЛЮХИН В. Г. Влияние массопереноса на равномерность травления в планарном реакторе. *Поверхность. Физика, химия, механика*, №12, 1992, 61–69.
- [2] ГРИГОРЬЕВ Ю. Н., ГОРОБЧУК А. Г. Управление однородностью травления в планарном плазмохимическом реакторе. В *“Вычис. технологии”*, Новосибирск, 4, №12, 1995, 87–98.
- [3] ГРИГОРЬЕВ Ю. Н., ГОРОБЧУК А. Г. Численная оптимизация планарных реакторов индивидуального плазмохимического травления. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, №2, 1996, 47–63.
- [4] ECONOMOU D. J., SANG-KYU PARK, WILLIAMS G. D. Uniformity of etching in parallel plate plasma reactors. *J. Electrochem. Soc.*, **136**, No. 1, 1989, 188–198.
- [5] KOBAYASHI J., NAKAZATO N., HURATSUKA K. Numerical simulation for gas flow and mass transfer in dry etching chamber. *Ibid.*, **136**, No. 6, 1989, 1781–1786.
- [6] FLAMM D. L., DONNELLY V. M., MUCHA J. A. The reaction of fluorine atoms with silicon. *J. Appl. Phys.*, **52**, No. 5, 1981, 3633–3639.

Поступила в редакцию 18 октября 1995 г.,
в переработанном виде 31 октября 1997 г.