

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических работ по дисциплине «Запоминающие  
устройства на основе интегральных схем»  
для студентов направления  
12.03.01 «Приборостроение» (профиль «Приборостроение»)  
всех форм обучения

Воронеж 2021

УДК 621.3.049.7.002 (075)

ББК 38.54

**Составители:**

д-р. техн. наук А.В. Башкиров,

канд. техн. наук А.А. Пирогов

Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Запоминающие устройства на основе интегральных схем» для студентов направления 12.03.01 «Приборостроение» (профиль «Приборостроение») всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А.В. Башкиров, А.А. Пирогов. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021, 11 с.

Методические указания предназначены для выполнения практических работ по дисциплине «Запоминающие устройства на основе интегральных схем» студентами очной и заочной форм обучения.

Предназначены для студентов 3 курса обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ПР1.pdf.

Ил. 1. Библиогр.: 5 назв.

**УДК 621.3.049.7.002 (075)**

**ББК 38.54**

**Рецензент** - О. Ю. Макаров, д-р техн. наук, проф.  
кафедры конструирования и производства  
радиоаппаратуры ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАГРУЗКИ НА СКОРОСТЬ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ Si И SiO<sub>2</sub>

## 1.1. Общие указания по выполнению практической работы

### Цель работы

Изучение методов технологической оптимизации процесса плазмохимического травления Si и SiO<sub>2</sub>.

Перед выполнением практической работы слушатель должен выполнить задание для самостоятельной работы в соответствии с данными методическими указаниями.

## 1.2 Задание для самостоятельной работы

**Задание.** Исходя из того, что в стационарных условиях при однородном распределении концентрации химически активных частиц (ХАЧ) плазмы  $n_{\text{ХАЧ}}$  и скорости газового потока  $v_{\text{Г}}$  устанавливается равновесие между скоростями генерации ХАЧ в единице объема плазменной зоны реактора  $G$ ,  $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , и гибели ХАЧ в единице объема плазменной зоны, вызванной процессами гомогенной рекомбинации ( $R_{\text{Г}}$ ) и взаимодействия ХАЧ с со стенками реактора и рабочим материалом ( $R_{\text{Х.Р}}$ ), т. е.  $G=R_{\text{Г}}+R_{\text{Х.Р}}$ , получите уравнение, связывающее скорость травления материала  $v_{\text{тр}}$ ,  $\text{см}/\text{с}$ , со скоростью генерации ХАЧ. Рассмотрите случай одновременного травления  $n$  пластин, содержащих открытые области SiO<sub>2</sub> и Si, а также стенок цилиндрической кварцевой камеры реактора. Примите, что скорость травления материала  $i$  прямо пропорциональна концентрации ХАЧ, т. е.  $v_i=K_i n_{\text{ХАЧ}}$  (где  $K_i$  — коэффициент пропорциональности, имеющий смысл константы скорости реакции травления материала ХАЧ), которая в свою очередь определяется скоростью гомогенной рекомбинации  $R_{\text{Г}}$  и эффективным временем жизни  $\tau$  ХАЧ в объеме плазмы:  $R_{\text{Г}}=n_{\text{ХАЧ}}/\tau$ , и что отношение скоростей травления материалов  $i$  и  $j$  есть селективность травления материал  $i$  относительно  $j$ :  $S=v_i/v_j=K_i/K_j$ .

Определите систему координат, в которой эта зависимость будет иметь линейный характер, что позволило бы определить экспериментально значения феноменологического параметра  $G$  и произведения  $\tau K_i$ . Запишите расчетные соотношения.

Ответьте на контрольные вопросы, приведенные в конце описания работы.

### План отчета по работе:

1. Структурная схема реактора плазмохимического травления кремниевых пластин с групповой загрузкой;
2. Описание процесса выполнения травления и методики определения значений феноменологического параметра  $G$  и произведения  $\tau K_i$ .
3. Ответы на контрольные вопросы.

Источник 1

### Явление загрузочного эффекта

При групповой обработке пластин в установках с объемной обработкой, в которых кварцевые стенки реактора также подвергаются травлению, скорость плазмохимического травления на отдельной пластине уменьшается при увеличении числа одновременно обрабатываемых пластин. Это явление, получившее название *эффекта загрузки*, осложняет выбор времени обработки при необходимости изменять количество загружаемых пластин или при изменении площади обрабатываемой поверхности в ходе процесса травления.

Связь скорости травления с площадью обрабатываемой поверхности можно установить аналитически, используя такие феноменологические параметры, как  $G$  — скорость генерации химически активных частиц (ХАЧ) в единице объема плазменной зоны,  $\tau$  — время жизни ХАЧ в плазме,  $K_p$  — константа скорости реакции травления.

В низкотемпературной газоразрядной плазме концентрация ХАЧ определяется не термодинамическим равновесием, а стационарным состоянием, возникающим вследствие конкуренции различных процессов образования (генерации) и гибели (рекомбинации) ХАЧ. При скоростях генерации и рекомбинации ХАЧ в единице объема плазменной зоны соответственно  $G$  и  $R$  в общем случае изменение концентрации ХАЧ  $n_{\text{ХАЧ}}$  в элементе объема реактора

$$\partial n_{\text{ХАЧ}} / \partial t = -\text{div } \mathbf{J}_{\text{ХАЧ}} + G - R, \quad (1)$$

где  $\mathbf{J}_{\text{ХАЧ}}$  — полный поток ХАЧ, состоящий из диффузионного  $\mathbf{J}_d = -D_{\text{ХАЧ}} \text{grad} n_{\text{ХАЧ}}$  и газового  $\mathbf{J}_r = \mathbf{v}_r n_{\text{ХАЧ}}$ ;  $D_{\text{ХАЧ}}$  — коэффициент диффузии ХАЧ;  $\mathbf{v}_r$  — скорость газового потока. Под  $R$  подразумевается скорость гибели ХАЧ, вызванная процессами гомогенной рекомбинации в объеме плазмы ( $R_r$ ) и взаимодействием ХАЧ с материалом ( $R_{x,p}$ ) (травление).

В общем случае  $n_{\text{ХАЧ}}$ ,  $G$ ,  $R$ ,  $\mathbf{v}_r$  являются функциями времени и координат. Однако, если рассматриваются стационарные условия ( $\partial n_{\text{ХАЧ}} / \partial t = 0$ ) и если  $n_{\text{ХАЧ}}$  и  $\mathbf{v}_r$  не зависят от координат [ $\nabla^2 n_{\text{ХАЧ}} = 0$ ,  $\text{div}(\mathbf{v}_r n_{\text{ХАЧ}}) = 0$ ], уравнение непрерывно-

сти (1) приобретает вид

$$G=R_{\Gamma}+R_{x.p.} \quad (2)$$

Скорость гомогенной рекомбинации

$$R_{\Gamma}=n_{\text{ХАЧ}}/\tau, \quad (3)$$

где  $\tau$  — эффективное время жизни ХАЧ в объеме плазмы. Скорость травления материала  $v_{\text{тр}}$ , см/с, связана со скоростью химической реакции ХАЧ на его поверхности  $R_{x.p.}$ , см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>, уравнением

$$R_{x.p.} = \left( \frac{1}{Y} \rho N_A \frac{1}{M} \right) \frac{A}{V} v_{\text{тр}}, \quad (4)$$

где  $Y$  — коэффициент травления материала ХАЧ, показывающий, сколько ХАЧ требуется для удаления одного атома материала;  $\rho$  и  $M$  — соответственно плотность и молекулярный (атомный) вес материала;  $N_A$  — число Авогадро;  $A$  — общая площадь поверхности обрабатываемого материала;  $V$  — объем плазмы.

Одной из основных операций фотолитографии является травление слоя SiO<sub>2</sub> на Si, т. е. в момент окончания процесса травления вероятно одновременное травление как Si, так и SiO<sub>2</sub>. Кроме того, в установках с объемной обработкой, цилиндрические реакторы которых выполнены из кварца, наряду с процессом травления обрабатываемых пластин происходит травление стенок реактора. Оценим влияние травления стенок камеры на скорость плазмохимического процесса в установках с кварцевым реактором.

В самом общем виде реакции травления Si и SiO<sub>2</sub> в плазме фторсодержащих газов могут быть записаны следующим образом:



т. е. коэффициент  $Y=4$ .

В случае одновременного травления пластин, содержащих открытые области SiO<sub>2</sub>, Si, а также стенок цилиндрической кварцевой камеры

$$R_{x.p} = \frac{2\alpha\beta}{M_{SiO_2}l} \delta v_{SiO_2} + \frac{\alpha\gamma}{M_{SiO_2}l} \delta_1 n v_{SiO_2} + \frac{\alpha\gamma}{M_{Si}l} n \delta_2 v_{Si}, \quad (5)$$

где  $\alpha = \rho N_A / Y$  (для упрощения выражения и расчетов считаем  $\rho_{Si} \approx \rho_{SiO_2} = 2,32 \text{ г/см}^3$ );  $\beta = 1 + 2l/D$ ;  $\gamma = (d/D)^2$ ;  $d$  и  $D$  — диаметры обрабатываемых пластин и кварцевой камеры длиной  $l$  соответственно;  $\delta$  — доля поверхности камеры, подвергаемая интенсивному травлению;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — доли открытой поверхности  $SiO_2$  и  $Si$  соответственно на обрабатываемой пластине;  $n$  — число обрабатываемых пластин. Первый член уравнения (5) характеризует травление кварцевых стенок цилиндрической камеры, второй — областей с  $SiO_2$  на поверхности обрабатываемых пластин, третий — областей с  $Si$  на поверхности пластин.

Скорость травления прямо пропорциональна концентрации ХАЧ, т. е.

$$v_{Si} = K_{Si} n_{XACH}; \quad v_{SiO_2} = K_{SiO_2} n_{XACH}, \quad (6)$$

где  $K_i$  — коэффициент пропорциональности, имеющий смысл константы скорости реакции травления  $Si$  или  $SiO_2$  радикалами  $F^*$ . В плазмохимических системах скорости травления  $Si$  и  $SiO_2$  значительно отличаются. Обозначим

$$S = v_{Si} / v_{SiO_2} = K_{Si} / K_{SiO_2}; \quad (7)$$

значение селективности  $S$  определяют экспериментально для конкретных условий проведения плазмохимического процесса (см. рисунок).

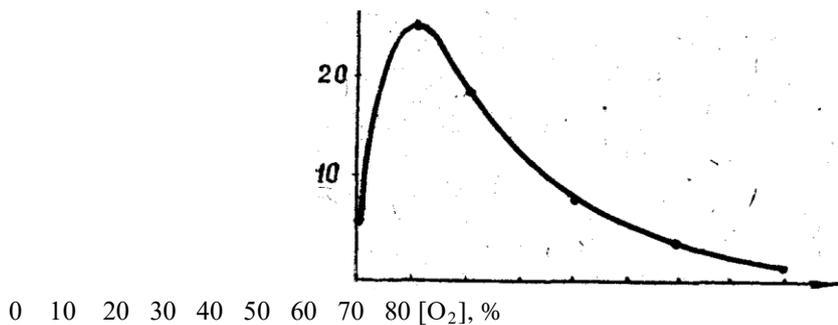


Рис. 1. Зависимость селективности травления  $Si$  относительно  $SiO_2$  от содержания кислорода в смеси  $CF_4 + O_2$

Учитывая соотношения (2), (3), (5), (7), имеем:

$$v_{Si} = \frac{G\tau K_{Si}}{1 + \frac{2\alpha\tau K_{Si}\beta\delta}{SM_{SiO_2}l} + \frac{\alpha\tau K_{Si}\gamma}{l} \left( \frac{\delta_1}{SM_{SiO_2}} + \frac{\delta_2}{M_{Si}} \right) n}; \quad (8)$$

$$v_{\text{SiO}_2} = \frac{G\tau K_{\text{SiO}_2}}{1 + \frac{2\alpha\tau K_{\text{SiO}_2}\beta\delta}{M_{\text{SiO}_2}l} + \frac{\alpha\tau K_{\text{SiO}_2}\gamma}{l} \left( \frac{\delta_1}{M_{\text{SiO}_2}} + \frac{S\delta_2}{M_{\text{Si}}} \right) n}. \quad (9)$$

**Инструмент проверки:**

№	Критерий оценки	Оценка
1	Представлена структурная схема реактора плазмохимического травления кремниевых пластин с групповой загрузкой	0/1
2	Описан процесс выполнения травления	0/1
3	Получено уравнение, связывающее скорость травления кремния и число обрабатываемых пластин (загрузку) в виде линейной зависимости	0/1
4	Описана методики определения значений феноменологического параметра $G$ и произведения $\tau K_i$	0/1
5	Есть ответы на контрольные вопросы	0/1

**Указания для подсчета баллов или прекращения процедуры оценивания:**

Процедура оценивания проводится по 5 критериям, если условие критерия оценки выполнено ставится 1 балл, если нет — 0. Процедура оценивания прекращается при невыполнении любого из критериев.

**Условия сертификации (положительного заключения):**

Суммарный балл в результате проверки — 5.

**1.2. Задание и методические указания по выполнению**

**Задание.** Обработка экспериментальных данных по плазмохимическому травлению кремния при различной загрузке реактора.

Ознакомьтесь с экспериментальными данными, являющимися исходными для исследования загрузочного эффекта при травлении партии кремниевых пластин (Источник 2). Ознакомьтесь с планом отчета по работе.

Постройте зависимости суммарной потери веса на всех пластинах  $r_{\text{Si}}$  от числа одновременно обрабатываемых пластин в установках «Плазма-600», «Плазма-600Т» (кассета без спинок) и «Плазма-600Т» (кассета со спинками), характеризующих скорость реакции взаимодействия активных радикалов с кремнием. Сделайте вывод о лимитирующей стадии процесса травления.

На основании измерений скорости удаления кремния  $r_{\text{Si}}$ , мг/мин, при различных загрузках (от 1 до 16 пластин) постройте график зависимости величины, обратной скорости травления,  $1/v_{\text{Si}}$ , с/см, от количества одновременно обрабатываемых пластин в установках «Плазма-600», «Плазма-600Т» (кассета без спинок) и «Плазма-600Т» (кассета со спинками).

По измерениям скорости травления при разных по величине загрузках

проверить выполнение полученного соотношения между скоростью травления и количеством обрабатываемых пластин, из полученных экспериментальных данных определить объемную скорость генерации ХАЧ  $G$  и произведение  $\tau K_{Si}$ . Для расчета использовать конструктивные данные установок «Плазма-600Т» ( $D=19$  см,  $l=36,5$  см,  $\delta=0,65$ ) или «Плазма-600» ( $D=11$  см,  $l=28$  см,  $\delta=0,7$ ). Поскольку в плазмохимических кварцевых реакторах наиболее интенсивно травятся области, находящиеся в непосредственной близости от электродов, величина  $\delta$  в установке «Плазма-600Т» оценена как отношение площади электродов к полной поверхности стенок, а в установке «Плазма-600» — как отношение поверхности камеры, охватываемой индуктором, к поверхности ее стенок.

#### План отчета по работе:

1. Графики экспериментальных зависимостей скорости удаления кремния  $r_{Si}$ , мг/мин, от размещения и числа обрабатываемых пластин;
2. Графики экспериментальных зависимостей скорости травления кремния  $v_{Si}$ , см/с, от размещения и числа обрабатываемых пластин в преобразованной системе координат, приводящей к линейному характеру этой зависимости;
3. Оценки величин объемной скорости генерации ХАЧ  $G$  и произведения  $\tau K_{Si}$ .
4. Сделать выводы по работе.

Источник 2

### Результаты экспериментального исследования явления загрузочного эффекта

В таблице представлены скорости удаления кремния со всех обрабатываемых немаскированных пластин (диаметр 40 мм)  $r_{Si}$ , мг/мин, в смеси 90 %  $CF_4+10$  %  $O_2$  при мощности разряда 300 Вт, давлении 80 Па, температуре 120 °С в установках «Плазма-600» (1), «Плазма-600Т» (2, кассета без спинок) и «Плазма-600Т» (3, кассета со спинками).

Таблица

Скорость удаления кремния  $r_{Si}$ , мг/мин, в зависимости от размещения и числа обрабатываемых пластин

Размещение	Число обрабатываемых пластин								
	1	2	3	4	6	8	10	12	16
1	6,6	8,0	8,8	9,4	10,3	10,9	11,2	11,5	11,9
2	8,9	9,4	—	12	12,6	13,0	13,5	14,2	14,6
3	2,9	4,2	—	6,0	7,0	7,9	8,5	9,1	10,0

Скорость травления определялась по изменению веса как среднее арифметическое скорости травления на каждой пластине с точностью измерения до десятых долей миллиграмма. Время травления порядка 10 мин, чтобы изменение веса составило десятки миллиграммов. При этом для установки «Плазма-600Т» коэффициент селективности травления  $S \approx 25$  (см. рисунок), а для установки «Плазма-600» — 15. В установке «Плазма-600Т» пластины обрабатывались как в открытой алюминиевой кассете, когда травлению подвергаются обе стороны пластины ( $\delta_2=2$ ), так и в кассете с вертикальными спинками, защищающими обратную сторону пластины от травления ( $\delta_2=1$ ).

#### Инструмент проверки:

№	Критерий оценки	Оценка
1	Построены графики экспериментальных зависимостей скорости удаления кремния $r_{Si}$ , мг/мин, от размещения и числа обрабатываемых пластин	0/1
2	Построены графики экспериментальных зависимостей скорости травления кремния $v_{Si}$ , см/с, от размещения и числа обрабатываемых пластин в преобразованной системе координат, приводящей к линейному характеру этой зависимости	0/1
3	Оценены величины объемной скорости генерации ХАЧ $G$ и произведения $\tau K_{Si}$	0/1
4	Сделаны выводы по работе	0/1

#### Указания для подсчета баллов или прекращения процедуры оценивания:

Процедура оценивания проводится по 4 критериям, если условие критерия оценки выполнено ставится 1 балл, если нет — 0. Процедура оценивания прекращается при невыполнении любого из критериев.

#### Условия сертификации (положительного заключения):

Суммарный бал в результате проверки — 4.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Угрюмов, Е.П. Цифровая схемотехника [Текст] : учеб. пособие / Е.П. Угрюмов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 800 с.
2. Солонина, А.И. Основы цифровой обработки сигналов [Текст] : учеб. пособие / А.И. Солонина, Д.А. Ухладович, С.М. Арбузов, Е.Б. Соловьева. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 768 с.
3. Солонина, А. И. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов [Текст] : учеб. пособие / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, Л.А. Яковлев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к выполнению практических работ по дисциплине «Запоминающие  
устройства на основе интегральных схем» для студентов направления  
12.03.01 «Приборостроение» (профиль «Приборостроение»)  
всех форм обучения

Составители:  
д-р. техн. наук А.В. Башкиров,  
канд. техн. наук А.А. Пирогов,

Компьютерный набор А.В. Башкиров

Подписано к изданию \_\_\_\_\_  
Уч.-изд. л. \_\_\_\_\_

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический универси-  
тет»

394026 Воронеж, Московский проспект, 14