

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра электронной техники и технологии

## **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

### **Лабораторный практикум**

по дисциплинам

«Конструирование и технология изделий интегральной электроники»,  
«Физико-химические основы материалов и электронных компонентов»

для студентов специальностей

«Проектирование и производство РЭС»,  
«Электронно-оптические системы и технологии»,  
«Электронные системы безопасности»

Под редакцией академика НАН Беларуси А. П. Достанко

Минск БГУИР 2011

УДК 621.3.049.77(076.5)

ББК 32.844.1я73

Ф50

**А в т о р ы:**

Л. П. Ануфриев, А. П. Достанко, Н. К. Касинский, Н. С. Ковальчук,  
А. О. Коробко, В. Л. Ланин, Я. А. Соловьев, А. М. Русецкий,  
В. С. Томаль

**Р е ц е н з е н т:**

заведующий кафедрой химии учреждения образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»  
доктор химических наук, профессор И. В. Боднарь

Ф50

**Физико-химические** процессы производства изделий интегральной электроники: лабораторный практикум по дисциплинам «Конструирование и технология изд. интеграл. электроники», «Физ.-хим. основы материалов и электрон. компонентов» для студ. спец. «Проектирование и пр-во РЭС», «Электронно-оптические системы и технологии», «Электронные системы безопасности» / Л. П. Ануфриев, А. П. Достанко, Н. К. Касинский, Н. С. Ковальчук, А. О. Коробко, В. Л. Ланин, Я. А. Соловьев, А. М. Русецкий, В. С. Томаль ; под ред. акад. НАН Беларуси А. П. Достанко. – Минск БГУИР, 2011. – 47 с.

ISBN 978-985-488-749-4

Лабораторный практикум включает в себя исследования процессов формирования легированных областей диффузией, химической обработки и плазмохимического травления кремниевых пластин.

Предназначен для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков работы с технологическим оборудованием и приборами контроля параметров слоев полупроводниковых приборов.

УДК 621.3.049.77 (076.5)

ББК 32.844.1я73

ISBN 978-985-488-749-4

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

### Лабораторная работа №1

ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ ОБЛАСТЕЙ МЕТОДОМ ДИФФУЗИИ И КОНТРОЛЬ ИХ ПАРАМЕТРОВ.....	4
---	---

### Лабораторная работа №2

ХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПЛАСТИН В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.....	18
---	----

### Лабораторная работа №3

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ СЛОЕВ НИТРИДА КРЕМНИЯ.....	34
---	----

Библиотека БГУИР

## ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ ОБЛАСТЕЙ МЕТОДОМ ДИФФУЗИИ И КОНТРОЛЬ ИХ ПАРАМЕТРОВ

### Цель работы

Изучить закономерности диффузии примесей в кремний, овладеть практическими навыками получения твердотельных структур термической диффузией и контроля их параметров.

### Теоретические сведения

Диффузия в полупроводниках – процесс последовательного перемещения атомов примеси в кристаллической решётке, обусловленный тепловым движением. В полупроводниках существует два вида диффузии:

– самодиффузия в кристалле, находящемся в состоянии химического равновесия (однородный химический состав и распределение собственных дефектов);

– химическая диффузия в условиях, когда градиенты химических потенциалов вызывают появление результирующих химических потоков.

Назначение процесса диффузии – внедрение атомов легирующего элемента в кристаллическую решётку полупроводника для образования области с противоположным относительно исходного материала типом проводимости. Образованная область оказывается ограниченной *p-n*-переходом. Количество вводимой примеси должно компенсировать влияние примеси в исходном материале, а также создавать избыток примеси для обеспечения проводимости противоположного типа. Значение проводимости диффузионной области определяется концентрацией избыточной (нескомпенсированной примеси).

Концентрация введённой примеси монотонно убывает в направлении от поверхности, через которую происходит диффузия, вглубь кристалла. Переход образуется на глубине  $X_j$ , где концентрация введённой примеси оказывается равной концентрации исходной примеси  $C_{исх}$  (рис. 1.1).

Особенности формирования конфигурации диффузионных областей:

1. Размеры диффузионных областей в плоскости определяются размерами окна в слое окисла кремния (т.к. скорость диффузии в  $SiO_2$  на несколько порядков ниже, чем в кремнии);

2. Диффузия примеси происходит изотропно, т.е. боковые стенки *p-n*-перехода всегда расположены под слоем окисла, а размеры диффузионных областей больше размеров окна по всему периметру.

3. Смещение *p-n*-перехода за счёт боковой диффузии принимают равным глубине диффузионной области, что учитывают при проектировании шаблонов.

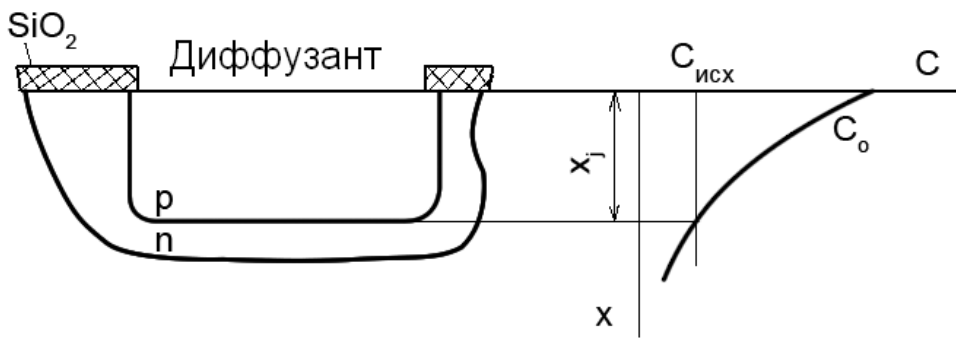


Рис. 1.1. Изменение концентрации диффузанта в процессе диффузии в кристалле

Модель диффузии – при повышенной температуре атомы в узлах решётки колеблются вблизи равновесного положения. Перемещение примеси в решётке происходит посредством последовательных скачков, осуществляемых в трёх направлениях. Основные механизмы диффузии (рис. 1.2):

- вакансионный, при котором мигрирующий атом (примесный или собственный) перемещается на место вакансии, а на его месте в узле кристаллической решетки образуется новая вакансия;
- межузельный механизм сопровождается переходом мигрирующего атома (как правило примесного) из одного междоузлия в другое без его локализации в узлах кристаллической решетки;

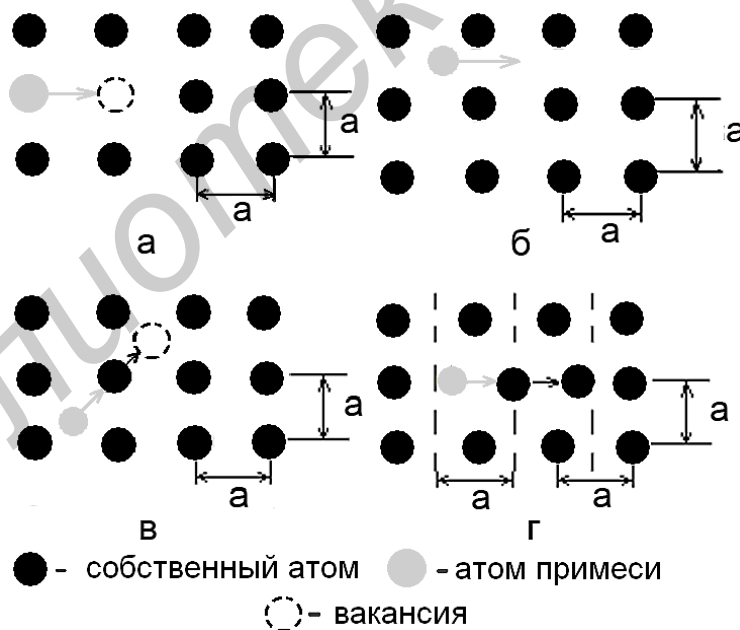


Рис. 1.2. Некоторые механизмы диффузии:  
а – вакансионный, б – межузельный, в – эстафетный, г – краудинный

- эстафетный, где в отличие от междоузельного механизма диффузии, примесные атомы внедряются в узлы кристаллической решетки, вытесняя при этом собственные атомы в междоузельное пространство;

– краудсионный механизм тесно связан с эстафетным. При этом междуузельный атом, расположенный посередине между двумя узлами решетки, перемещается в направлении одного из них, смещая его из положения в узле решетки. Вытесненный атом становится междуузельным и занимает промежуточное положение в решетке.

– Диссоциативный механизм связан с распадом комплексов молекул и диффузией составляющих их компонент (атомов или ионов) в кристаллической решетке.

**Количественные закономерности диффузии.** В связи с малой толщиной диффузионных областей по сравнению с размерами плоскости задачу диффузии рассматривают как одномерную. Первый закон Фика:

$$J = -D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x}, \quad (1.1)$$

где  $J$  – скорость переноса вещества через сечение единичной площади (диффузионный поток) [ $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ],  $D$  – коэффициент диффузии [ $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ],  $C$  – концентрация растворенного вещества,  $x$  – ось координат, совпадающая с направлением потока вещества,  $t$  – время.

Уравнение Аррениуса

$$D = D_0 \exp(-E_a/kT), \quad (1.2)$$

где  $D_0$  – коэффициент, зависящий от рода полупроводника и диффундирующей примеси,  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура процесса,  $E_a$  – энергия активации процесса диффузии. Значения коэффициентов диффузии для некоторых элементов представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Значения коэффициентов для уравнения Аррениуса

Элемент	$D_0, \text{см}^2/\text{с}$	$E_a \cdot 10^{-19}, \text{Дж}$	Тип проводимости
B	10,6	5,76	$p$
P	10,5	5,92	$n$
Sb	5,6	6,24	$n$
As	0,32	5,76	$n$

Второй закон Фика описывает изменение концентрации растворенного вещества во времени.

1. При низкой концентрации примеси и малых  $x_j$  коэффициент диффузии не зависит от концентрации:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}. \quad (1.3)$$

2. В случае высокой концентрации примеси и больших  $x$ ; коэффициент диффузии зависит от концентрации:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D \left( \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right) \right]. \quad (1.4)$$

### Диффузия из неограниченного источника.

Начальные условия:

$$C(x, 0) = 0. \quad (1.5)$$

Граничные условия:

$$C(0, t) = N_0; \quad (1.6)$$

$$C(x \gg 0, t) = 0. \quad (1.7)$$

Решение 2-го закона Фика:

$$C(x,t) = C_0 \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (1.8)$$

где  $C_0$  – концентрация примеси на поверхности пластины,  $\operatorname{erfc}(z)$  – дополнительная функция ошибок (рис. 1.3). При этом количество введенной примеси может быть определено из 1-го закона Фика:

$$S = \int_0^t J dt = 2C_0 \sqrt{Dt} / \pi.$$

Как правило, поверхностная концентрация примеси при диффузии из бесконечного источника определяется пределом ее растворимости в полупроводнике (рис. 1.4). Зависимости пределов растворимости в кремнии бора и фосфора представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2  
Зависимость пределов растворимости бора и фосфора от температуры

Температура, °C	Предел растворимости, $\times 10^{20} \text{ см}^{-3}$	
	Бор	Фосфор
900	2,8	6,0
950	3,2	7,8
1000	3,6	9,6
1050	4,0	10,8
1100	4,4	12,2
1150	4,8	13,6
1200	5,2	15,0

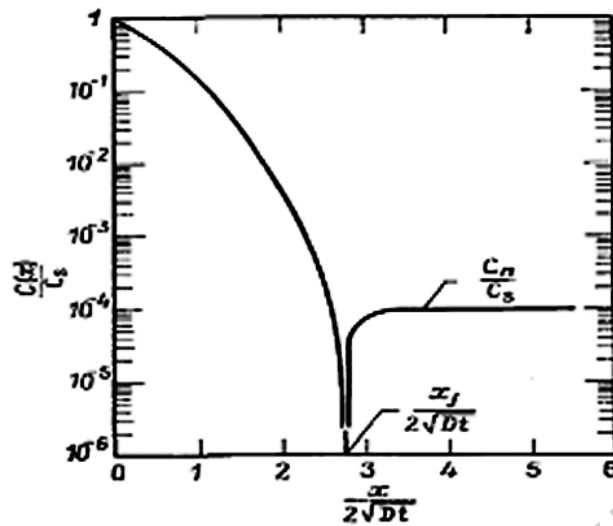


Рис. 1.3. Нормированное распределение дополнительной функции ошибок

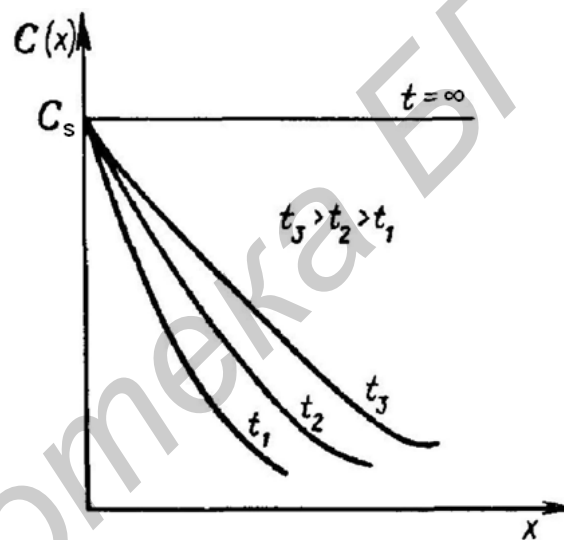


Рис. 1.4. Распределение примеси при диффузии из бесконечного источника

**Диффузия из ограниченного источника.** Начальные условия:

$$C(x, 0) = 0. \quad (1.9)$$

Граничные условия:

$$\int_0^x C(x, t) dx = S, \quad (1.10)$$

$$C(x, \infty) = 0. \quad (1.11)$$

$$C(x, t) = \frac{S}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (1.12)$$

где  $S$  – количество атомов примеси на единицу площади (доза).

В таком случае решение 2-го закона Фика описывается распределением Гаусса (рис. 1.5).



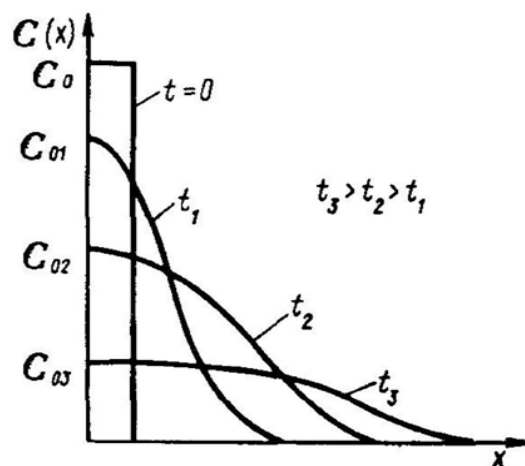


Рис. 1.5. Распределение примеси при диффузии из бесконечного источника

Как правило, процесс изготовления приборных структур сопровождается проведением нескольких высокотемпературных операций. Поэтому необходимо учитывать, что диффузия примеси продолжается на всех высокотемпературных операциях (диффузия, окисление и т.д.). Данный эффект учитывается введением в распределение Гаусса (1.12) вместо множителя  $Dt$  суммы:

$$C(x, t) = \frac{S}{\sqrt{\pi \sum_{i=1}^n D_i t_i}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \sum_{i=1}^n D_i t_i}\right), \quad (1.13)$$

где  $i$  – порядковый номер операции,  $t_i$  – время ее выполнения,  $n$  – число операций, связанных с нагревом пластины.

**Источники примеси для диффузии.** Использование чистых легирующих элементов в качестве источников примеси в процессах диффузии затруднительно по следующим причинам:

- бор является тугоплавким элементом и при температуре диффузии имеет крайне малую упругость пара;
- фосфор легко воспламеняется при нагреве;
- мышьяк – высокотоксичен.

Поэтому в качестве источников примеси применяют различные соединения (ангидриды, галогениды, гидриды легирующего элемента (т.н. диффузанты)).

По способу нанесения диффузанта различают:

1. Процесс нанесения диффузанта на пластины в ходе диффузии из внешнего источника, который может быть твёрдым, жидким и газообразным.

2. Процесс нанесения диффузанта на пластины кремния до диффузии (примесные покрытия).

При диффузии из жидкого источника диффузانت подается в реактор в виде парогазовой смеси потоком газа-носителя (см. рис. 1.6).

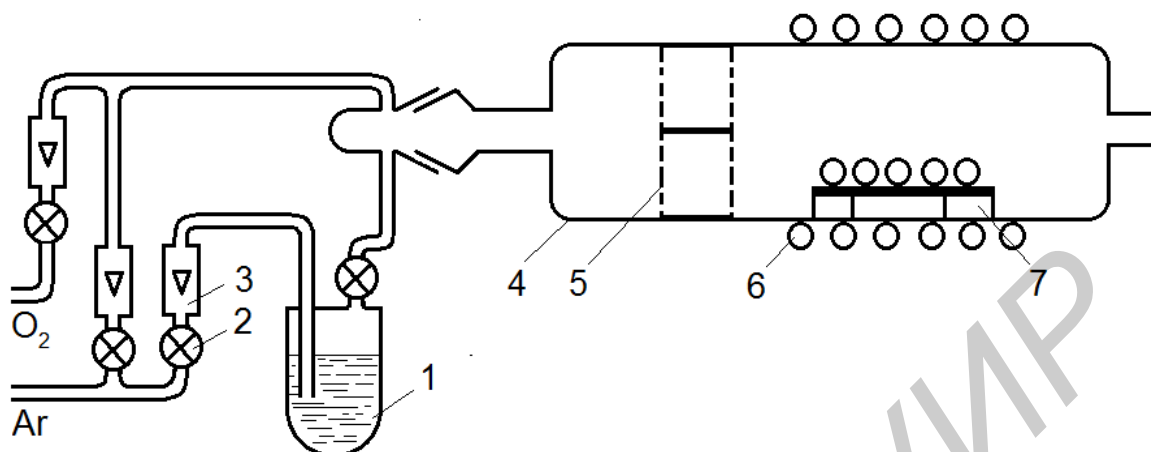


Рис. 1.6. Схема диффузии из жидкого источника: 1 – источник жидкого диффузанта, 2 – вентиль, 3 – ротаметр, 4 – кварцевая труба, 5 – газосмеситель, 6 – нагреватель, 7 – кварцевая кассета с пластинами

При диффузии из газообразного источника (рис. 1.7) примеси подают из баллона со сжатым газом ( $B_2H_6$ ,  $PH_3$ ). Метод характеризуется высокой технологичностью, воспроизводимостью и легкостью управления концентрацией примеси. Недостатком метода является высокая токсичность гидридов, что требует тщательной герметизации элементов установки, сбора продуктов реакции на выходе, контроля производственной атмосферы.

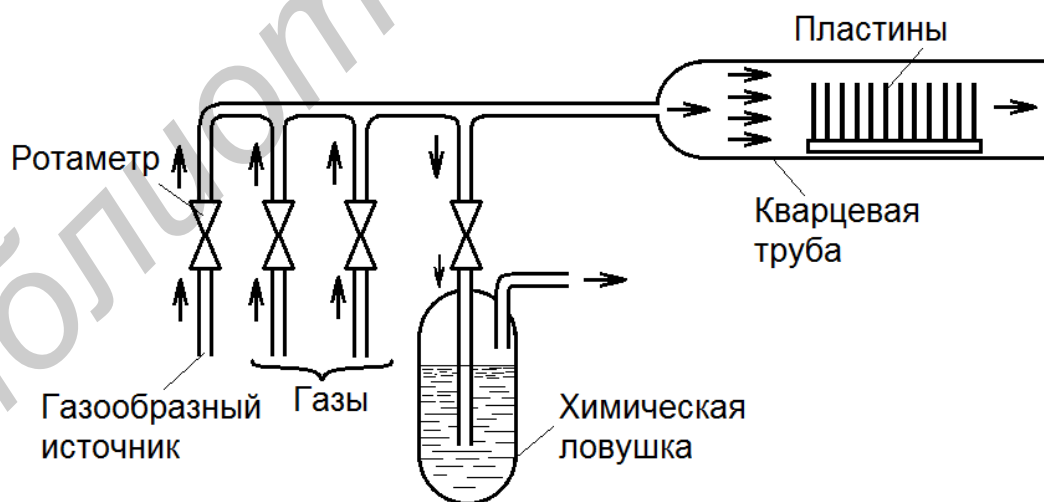


Рис. 1.7. Схема диффузии из газообразного источника

Твёрдый планарный источник (ТПИ) – пластина, содержащая твёрдый диффузонт ( $B_2O_3$  или  $P_2O_5$ ) и инертную тугоплавкую основу. ТПИ располагают непосредственно в зоне диффузии между кремниевыми пластинами (рис. 1.8).

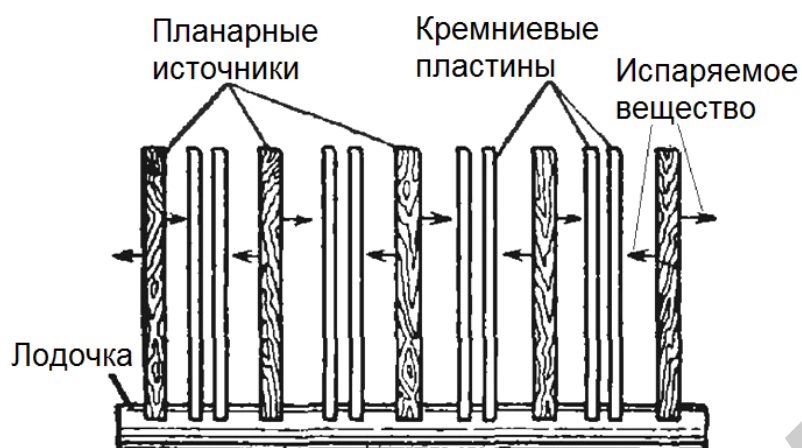


Рис. 1.8. Схема диффузии из твердого планарного источника

**Технология процессов диффузии.** Диффузионные процессы проводятся в кварцевой трубе, снабженной резистивным нагревателем. В зоне диффузии длиной 40 – 60 см поддерживается температура до 1250 °С с точностью  $\pm 0,25 - 0,5$  °С. При температурах более 1200 °С в качестве материала реактора предпочтительно использовать вместо кварца карбид кремния (SiC).

Для групповой загрузки пластин применяют кассеты из кварцевого стекла или карбида кремния. Для загрузки-выгрузки кассет используют стержень с крючком либо консольный загрузчик (рис. 1.9).

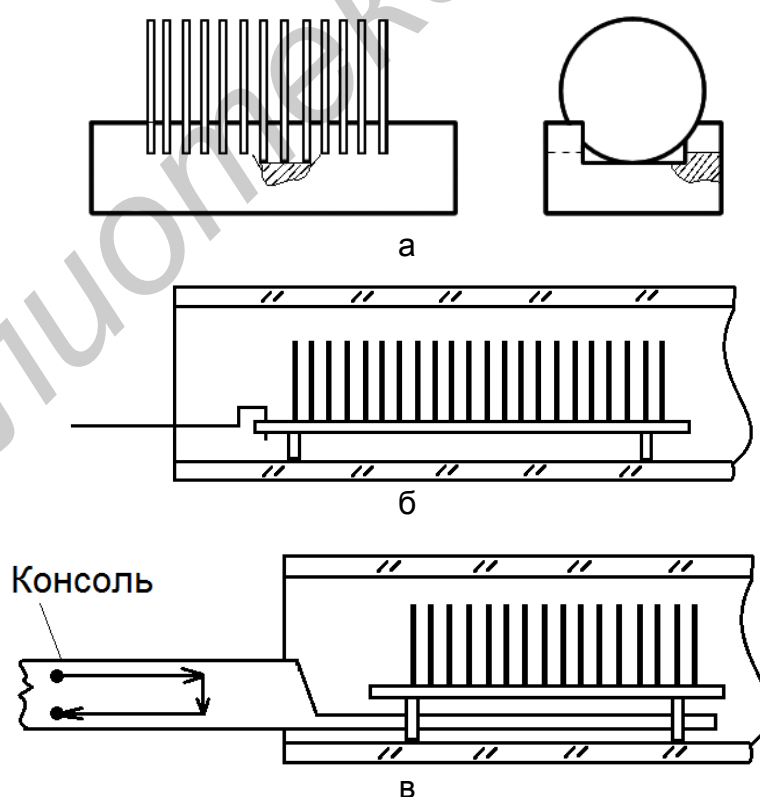


Рис. 1.9. Оснастка для проведения процессов диффузии:  
а – кассета для расстановки пластин, б – загрузка при помощи крючка,  
в – консольный загрузчик

**Загонка примеси.** Для насыщения парами диффузанта транспортирующий газ ( $N_2$ , Ar) пропускается над жидкостью либо барботируется через нее. Питатель источника диффузанта как правило помещают в термостат. Расход транспортного газа составляет 0,5 – 1,5 л/ч. При постоянном расходе транспортирующего газа концентрация диффузанта в нем регулируется температурой источника. При необходимости окисления кремния кислород подают в смеси с транспортным газом.

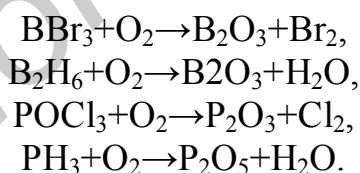
Перед загонкой примеси стенки трубы и пустые кассеты насыщают примесью при температуре диффузии (для исключения обеднения рабочей смеси в рабочем процессе).

Операционный цикл процесса загонки включает в себя следующие этапы:

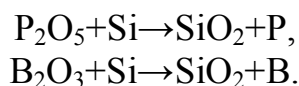
- 1) продувка реактора азотом с расходом до 150 л/ч;
- 2) вывод реактора на заданную температуру (2 – 3 ч);
- 3) загрузка кассеты с пластинами и прогрев ее в течение 10 мин с подачей азота;
- 4) подача азота с парогазовой смесью (диффузانت, кислород);
- 5) выдержка при постоянной температуре в течение контролируемого времени (процесс диффузии);
- 6) отключение подачи ПГС и извлечение кассеты с пластинами.

Первоначально загонку примеси производят в присутствии кислорода. Растущая в процессе загонки плёнка  $SiO_2$  предохраняет поверхность кремния от эрозии и нежелательных химических реакций, что повышает воспроизводимость параметров диффузионных областей. Процесс загонки примеси в присутствии кислорода включает в себя следующие стадии:

1. Взаимодействие диффузанта с кислородом в газовой фазе с выделением ангидрида легирующего элемента:



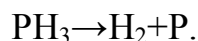
2. Диффузия ангидрида через растущий окисел к границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>;
3. Взаимодействие молекул ангидрида с кремнием и выделение атомарной примеси:



4. Диффузия атомов легирующего элемента в кристаллической решетке кремния.

Окисление происходит за счёт диффузии молекул кислорода через окисел и последующего взаимодействия с кремнием ( $Si + O_2 \rightarrow SiO_2$ ). Коэффициент диффузии ангидрида в окисле крайне мал. Поэтому при достижении плёнкой  $SiO_2$  толщины, достаточной для защиты кремния, подачу кислорода прекраща-

ют. В этом случае выделение атомарного фосфора или бора из диффузанта будет происходить за счёт термической диссоциации:



Образующийся в процессе загонки окисел кремния с примесью  $\text{P}_2\text{O}_5$  или  $\text{B}_2\text{O}_3$  представляет собой фосфоросиликатное стекло (ФСС) или боросиликатное стекло (БСС). Поскольку ФСС или БСС при разгонке примеси может служить внешним (неучтенным) источником примеси, то их в обязательном порядке стравливают после процесса диффузии.

**Разгонка примеси.** Операционный цикл процесса разгонки примеси включает в себя следующие этапы:

1. Загрузка кассеты с пластинами в реактор, нагретый до температуры  $850^\circ\text{C}$ , и прогрев ее в течение 10 мин в среде азота.

2. Подъём температуры в реакторе до требуемой температуры диффузии ( $1050 - 1200^\circ\text{C}$ ) в среде  $\text{N}_2$ .

3. Выдержка при постоянной температуре в течение контролируемого времени в среде азота (процесс разгонки).

4. Снижение температуры в реакторе до  $1000^\circ\text{C}$ .

5. Пирогенное окисление пластин (кислород увлажняется сжиганием в нем водорода).

6. Снижение температуры в реакторе до первоначального уровня.

7. Выгрузка пластин из реактора.

Основные этапы технологического процесса диффузии проиллюстрированы на рис. 1.10.

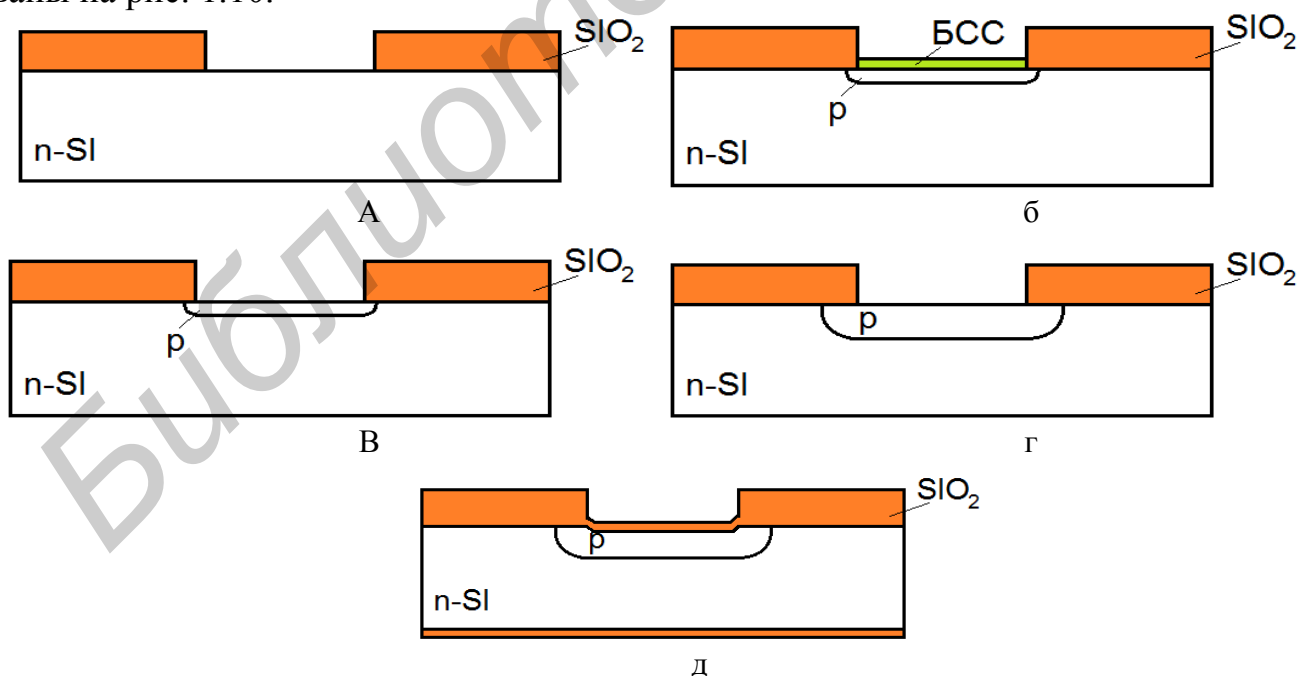


Рис. 1.10. Основные стадии формирования структуры с  $p-n$ -переходом методом диффузии:

а – структура после фотолитографии, б – загонка бора, в – снятие БСС,

г – разгонка бора, д – окисление

## Используемое оборудование

Диффузионные процессы проводят в специальных электропечах, позволяющих осуществлять групповую газотермическую обработку кремниевых пластин с заданными технологическими параметрами процесса. Оборудование данного класса обеспечивает работу в автоматическом режиме автономно и в составе технологических модулей с управлением из чистой зоны. Общий вид диффузионной установки представлен на рис. 1.11. Схема канала пирогенного окисления представлена на рис. 1.12.



Рис. 1.11. Общий вид системы диффузионной однозонной пирогенного и сухого окисления "Оксид-ЗПО"

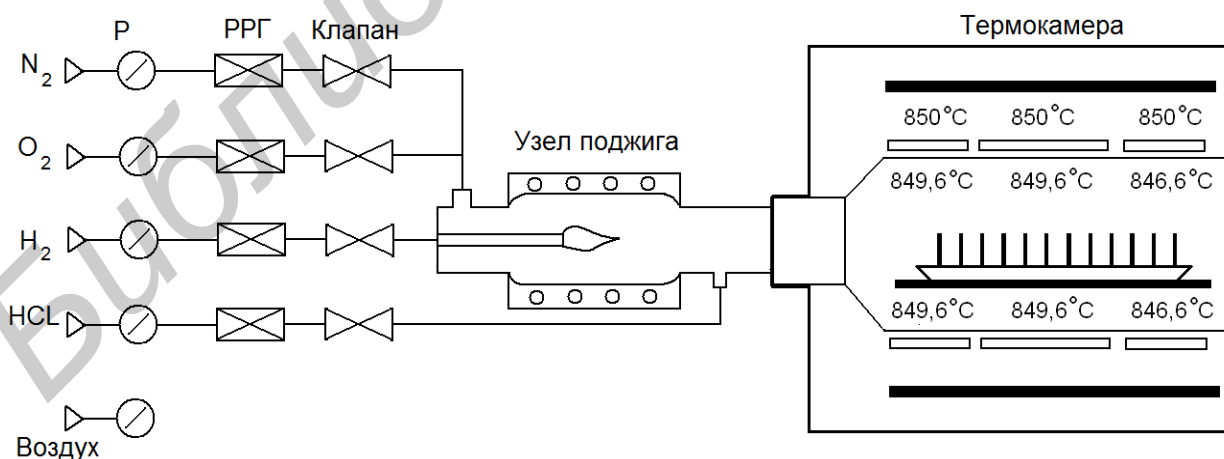


Рис. 1.12. Схема канала пирогенного окисления диффузионной системы "Оксид-ЗПО"

## Технические характеристики

Режим работы.....	автоматический
Максимальный диаметр обрабатываемых пластин.....	150 мм
Количество реакторов.....	3
Количество одновременно обрабатываемых пластин в каждом реакторе .....	до 150
Длина рабочего хода загрузочного устройства.....	не менее 1900 мм
Диапазон скоростей перемещения загрузочного устройства.....	75–1500 мм/мин
Диапазон рабочих температур.....	400–1250°C
Длина рабочей тепловой зоны.....	не менее 900 мм
Неравномерность распределения температуры в пределах длины рабочей тепловой зоны в диапазоне температур:	
от 400 до 600 °С.....	±1,5°C
свыше 600 до 800 °С.....	±1°C
свыше 800 до 1250°C.....	±0,5°C
Нестабильность поддержания температуры в рабочей тепловой зоне в течение 72 ч в диапазоне температур:	
от 400 до 600 °С.....	1,5°C
свыше 600 до 800 °С.....	0,75°C
свыше 800 до 1250°C.....	0,5°C
Время разогрева электропечи до максимальной рабочей температуры.....	2,5 ч
Средняя скорость нагрева рабочей тепловой зоны в диапазоне температур свыше 600 до 1250 °С.....	не менее 15°C/мин
Средняя скорость охлаждения рабочей тепловой зоны в диапазоне температур от 1250 до 800 °С.....	не менее 5°C/мин
Электропитание установки:	
Трёхфазная сеть переменного тока с нулевым проводом:	
напряжением.....	380/220 В
частотой.....	50 Гц
Мощность потребления	
в режиме разогрева.....	не более 90 кВА
в устоявшемся режиме 1250°C.....	не более 60 кВА

### Порядок выполнения работы (1-й вариант)

1. Ознакомиться с теоретическими основами процессов диффузии.
2. Ознакомиться с устройством установки «Оксид – ЗПО».
3. Надеть перчатки. Под контролем преподавателя загрузить 4 кварцевые кассеты с чистыми балластными пластинами.
4. Достать с помощью вакуумного пинцета несколько балластных пластин из центра загрузки.
5. Поставить на их место пластины КДБ10 легированные фосфором.
6. Под контролем преподавателя установить с помощью захвата кассеты на консольный загрузчик.
7. Перевести переключатель ДИСПЛЕЙ на панели управления в положение для работы с выбранным каналом.
8. Нажать кнопку РАР на панели управления выбранного канала.
9. Запустить на исполнение соответствующую технологическую программу последовательным нажатием клавиш



10. Провести процесс в автоматическом режиме.
11. Проводить контроль стыковки камеры и реактора после прохождения интервала ГОРЕНИЕ.
12. Выдержать кассеты с пластинами после окончания процесса на консольном загрузчике в течение 10–15 мин.
13. Перегрузить пинцетом пластины в контейнер.
14. Определить толщину окисла на пластинах.
15. Под контролем преподавателя осуществить полное удаление окисла.
16. Измерить величину поверхностного сопротивления диффузионного слоя в 5 точках, оценить разброс.
17. Измерить глубину залегания *p-n*-перехода.
18. Оформить отчет по лабораторной работе.

### Порядок выполнения работы (2-й вариант)

1. Ознакомиться с теоретическими основами процессов диффузии.
2. Получить от преподавателя пластины с выращенным слоем окисла на поверхности.
3. Определить толщину окисла на пластинах.
4. Под контролем преподавателя осуществить полное удаление окисла.
5. Измерить величину поверхностного сопротивления диффузионного слоя в 5 точках, оценить разброс.
6. Измерить глубину залегания *p-n*-перехода.
7. Оформить отчет по лабораторной работе.



## Содержание отчета

1. Цель работы
2. Краткие теоретические сведения.
3. Структурная схема установки «Оксид – ЗПО».
4. Последовательность выполнения операций, технологические режимы процесса.
5. Результаты контроля полученных диффузионных параметров.
6. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1. Определение и назначение диффузии.
2. Модель и механизмы диффузии.
3. Количественные закономерности диффузии.
4. Диффузия из неограниченного источника.
5. Диффузия из ограниченного источника.
6. Источники примеси для диффузии.
7. Технология процессов диффузии
8. Загонка и разгонка примеси.

## Литература

1. Технология СБИС: в 2-х кн. Кн. 1 ; пер. с англ. / К. Пирс [и др.] ; под ред. С. Зи. – М. : Мир, 1986. – 404 с.
2. Курносов, А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А. И. Курносов, В. В. Юдин. – М. : Высш. шк., 1986. – 358 с.
3. Готра, З. Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник / З. Ю. Готра. – М. : Радио и связь, 1991. – 528 с.
4. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники / И. П. Степаненко. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2000. – 488 с.
5. Никифорова-Денисова, С. Н. Термические процессы / С. Н. Никифорова-Денисова. – М. : Высш. шк., 1989. – 96 с.
6. Кабардин, О. Ф. Физика: Справочные материалы / О. Ф. Кабардин. – М. : Просвещение, 1991. – 367 с.
7. Техническое описание на установку «Оксид – ЗПО».

## ХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПЛАСТИН В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

### Цель работы

Изучить разновидности загрязнений и их влияние на технологические характеристики полупроводниковых структур, источники загрязнения поверхности, методы очистки в различных травителях, принцип работы установки химической обработки, входящей в комплекс «Лада-1 Электроника», провести процесс химической обработки пластин и осуществить контроль качества химической обработки.

### Теоретические сведения

Химическая обработка поверхности полупроводниковых пластин предшествует операциям технологического процесса изготовления полупроводниковых приборов и ИМС или является их продолжением и подразделяется на очистку и травление. Современные технологические процессы изготовления СБИС состоят из нескольких сотен операций, среди которых почти половина – очистка и травление.

**Разновидности загрязнений и их влияние на технологические характеристики полупроводниковых структур, источники загрязнения поверхности.** Выбор метода очистки поверхности подложек зависит от характера загрязнений поверхности. Примеси на поверхности подложки делят на *физические* и *химические* загрязнения.

*Физические* (молекулярные) загрязнения обусловлены физической адсорбцией и слабо связаны с поверхностью полупроводника. Физическая адсорбция загрязнений к поверхности происходит в результате межмолекулярного взаимодействия, обусловленного силами Ван-дер-Ваальса либо в результате электростатической поляризации (кулоновского взаимодействия заряженных частиц). Иногда адсорбированные частицы могут преодолевать силы адсорбции и десорбироваться. Таким образом, физические загрязнения имеют обратимый характер.

Физические загрязнения подразделяются на *неорганические* и *органические*. К *неорганическим* загрязнениям относятся: пыль различного происхождения и абразивные частицы. *Органические* загрязнения, в свою очередь, подразделяют на *полярные* и *неполярные* загрязнения.

К *полярным* загрязнениям относятся жиры, белки, жирные кислоты, следы поверхностно-активных веществ, остатки синтетических плёнок. Молекулы данных веществ обладают дипольными моментами и, как правило, ориентированы на поверхности. Ориентация таких молекул приводит к росту плотности их упаковки на поверхности и к сокращению площади загрязнения.

К *неполярным* загрязнениям относятся минеральные масла, парафин, остат-

ки битумов, вазелины. Из-за малого дипольного момента данные вещества обладают высокой поверхностной энергией и способны покрывать большие площади.

*Химические загрязнения* связаны с поверхностью подложки силами хемосорбции. При этом образуются прочные ковалентные или ионные связи атомов адсорбированного вещества с поверхностью. Таким образом, химические загрязнения имеют необратимый характер.

Химические загрязнения подразделяются на *ионные* и *атомные*. К *ионным* загрязнениям относятся растворимые в воде соли, кислоты и основания, которые осаждаются на поверхность пластин из очищающих растворов и травителей, а также из окружающей среды.

*Атомные* загрязнения осаждаются на поверхности подложек в виде микрочастиц из атомов золота, железа, меди, серебра, присутствующих в реактивах. Данные загрязнения могут покрывать всю поверхность подложки и даже образовывать макроскопические слои.

К химическим загрязнениям также относят остатки оксидных, нитридных или сульфидных плёнок.

Наличие на поверхности неорганических загрязнений приводит к росту дефектности осаждаемых слоёв. Кроме того, данные загрязнения являются маской при ионной имплантации примесей, а также травлении технологических слоёв и приводят к искажению топологического рисунка слоёв ИС.

Органические загрязнения при термических операциях (например, в процессе эпитаксии или диффузии) разлагаются с образованием атомов углерода, которые являются активными центрами дефектообразования в кристаллической решётке формируемых слоёв и областей. Кроме того, нерастворимые в воде органические жировые загрязнения делают поверхность подложки гидрофобной, плохо смачиваемой водой, что затрудняет удаление химических загрязнений в водных растворах.

Химические загрязнения в виде примесей ионов и атомов металлов оказывают влияние на ряд важнейших электрических параметров приборных структур. Атомы металлов имеют аномально высокие коэффициенты диффузии в полупроводниках и существенно влияют на время жизни неосновных носителей, а также скорость поверхностной рекомбинации. Это приводит к росту токов утечки *p-n*-переходов. Ионные примеси способны изменять поверхностный потенциал, что приводит к несанкционированному появлению областей обогащения или обеднения в полупроводниковых структурах. Это, как правило, обуславливает дрейф важнейших электрофизических параметров структур: токов утечки, обратных напряжений, а также пороговых напряжений МОП-структур и снижает надёжность ИС.

Основными источниками загрязнений являются:

- абразивные и клеящие материалы, используемые при механической обработке полупроводниковых подложек;
- пыль и аэрозольные частицы, содержащиеся в воздушной среде производственных помещений;
- технологическое оборудование и оснастка, операционная и транспортная

тара для подложек;

- технологические среды, органические и неорганические реагенты, промывочная вода;

- одежда, эпителий, косметика, бактерии и вирусы, жировые отпечатки пальцев оператора.

Из вышесказанного следует, что борьба с загрязнениями поверхности полупроводниковых подложек является крайне важной задачей в технологии интегральной электроники, которая должна осуществляться на всех стадиях технологического цикла изготовления ИС, начиная от изготовления подложек. Данную задачу решают в трёх аспектах:

- очистка подложек перед выполнением ответственных технологических операций;

- соблюдение чистоты воздушной среды и самих производственных помещений во время техпроцесса;

- тщательная подготовка технологического оборудования путем использования чистых технологических сред в технологических установках.

**Классификация процессов удаления загрязнений с поверхности твёрдых тел.** Методы, применяемые для очистки полупроводниковых подложек должны удовлетворять следующим требованиям:

- инертность по отношению к обрабатываемому материалу;
- пожаробезопасность и минимальная токсичность;
- высокая степень чистоты используемых химреактивов, газов и воды;
- оборудование для очистки должно конструироваться по принципу «бесконечного разбавления».

Классификация методов очистки представлена на рис. 2.1. Как видно из рисунка, все методы классифицируются по двум признакам: по физическому состоянию используемых для очистки веществ – на жидкостные и сухие; по механизму процессов – на физические и химические. К физическим методам очистки относят обезжиривание в органических растворителях, смывание загрязнений жидкостью, обработку ионами, обработку в вакууме или инертных средах при высокой температуре.

К химическим методам очистки относят: растворение загрязнений в очищающих растворах, а также травление загрязнений вместе с тонким приповерхностным слоем полупроводникового материала в кислотных и щелочных травителях, в газовой среде либо в химически активной плазме. На практике физические и химические методы очистки дополняют друг друга и трудно разделимы.

Основу процессов обезжиривания в органических растворителях составляют процессы замещения адсорбированных молекул примесей молекулами растворителей. В результате десорбции молекулы загрязнений переходят с очищаемой поверхности подложки в приповерхностный слой растворителя и далее равномерно распределяются в его объёме. В качестве растворителей для обезжиривания используют трихлорэтилен, толуол, спирты, бензин, ацетон. Существен-

ным недостатком обработки в органических растворителях является неполное удаление загрязнений вследствие наступления равновесия в процессе очистки и уравнивания скоростей десорбции и адсорбции. Таким образом, наблюдается вторичное загрязнение поверхности из объема растворителя, что особенно характерно для однофазных систем.

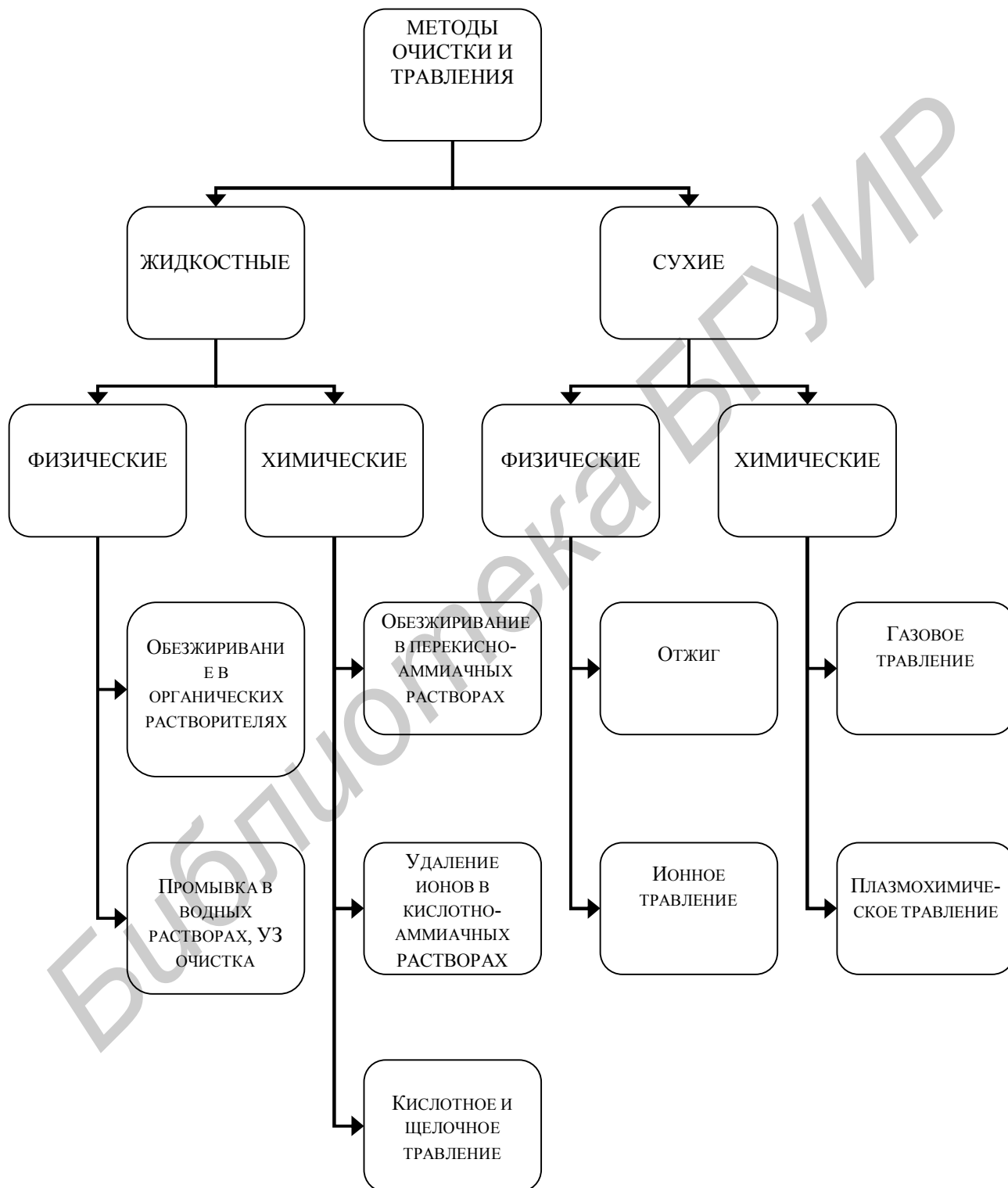


Рис. 2.1. Классификация методов очистки и травления

Процесс очистки подложек в очищающих растворах основан на химическом взаимодействии компонентов растворов с загрязнениями поверхности. В случае очистки от органических загрязнений происходит их разрушение, окисление до легкорастворимых форм или до газообразных веществ и воды. Обработка в щелочных растворах основана на разложении жиров щелочью и переводе их в легкорастворимые мыла. Очистку поверхности от атомов и ионов металлов, а также оксидных, сульфидных и нитридных пленок проводят в кислотных растворах. Удаление атомных и ионных загрязнений с помощью кислот основано на вытеснении атомов и ионов металлов ионами водорода.

Как отмечалось выше, в ряде случаев удаление загрязнений проводят травлением с удалением тонкого приповерхностного слоя очищаемого материала. Процессы травления будут рассмотрены в практикуме ниже, на с. 24.

Для повышения эффективности очистки используют различные методы интенсификации. При этом ускоряются более медленные стадии процесса (например, подвод свежего реагента в зону обработки, отвод продуктов химических реакций от обрабатываемой поверхности), обеспечивается десорбция атомов или ионов и т.д.

Методы интенсификации подразделяются на физические, химические и комбинированные. К физическим методам интенсификации относят нагрев, кипячение, обработку струёй, гидроциркуляцией, протоком, гидромеханическую отмывку, центрифугирование, обработку ультра- и мегазвуком, плазменную обработку. К химическим методам – очистку поверхностно-активными веществами (ПАВ), комплексообразователями. Комбинированные методы интенсификации объединяют в себе физические и химические методы (обработка горячей струёй, подогрев ультразвуковой ванны, использование травителей в сочетании с использованием ультразвука).

По способу реализации обработка поверхности подложек подразделяется на объёмную химическую и химическую обработку в аэрозолях.

**Объёмная химическая обработка** поверхности подложек реализуется погружением кассет с пластинами в ванну, заполненную технологическим раствором. Для объёмной химической обработки характерны следующие отличительные особенности:

- для каждого технологического раствора, используемого в техпроцессе, должна быть отдельная ванна;
- для каждого технологического раствора устанавливается регламент замены, исходя из количества обработанных в одном объёме раствора пластин и срока годности раствора;
- нагрев технологического раствора осуществляется непосредственно в ванне;
- отмывка пластин от технологического раствора производится в специальных ваннах с проточной деионизованной водой;
- сушка пластин после отмывки осуществляется на специальном оборудовании, чаще всего в центрифуге.

**Химическая обработка в аэрозолях** реализуется путем обработки пластин

в специальной ванне в виде центрифуги, в которую в виде аэрозолей вначале подается технологический раствор или его компоненты, затем деионизованная вода, а в конце – очищенный азот для высушивания пластин. Для обработки пластин в аэрозолях характерны следующие особенности:

- каждая пластина проходит обработку в новой порции технологического раствора;
- в одной ванне реализуются все стадии процесса химической обработки подложек.

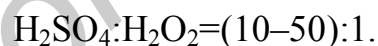
Большинство методов очистки полупроводниковых подложек требует последовательного использования нескольких очищающих растворов. Как правило, очистку поверхности подложек от загрязнений проводят в следующей последовательности:

- 1) удаление органических загрязнений;
- 2) удаление слоёв оксида;
- 3) удаление механических частиц;
- 4) удаление металлических и ионных примесей.

Для реализации данной последовательности необходима следующая очередность применения технологических растворов:

- травитель Каро;
- раствор плавиковой кислоты;
- перекисно-аммиачный раствор (ПАР);
- перекисно-соляной раствор (ПСР).

**Очистка кремниевых пластин в травителе Каро.** Смесь Каро представляет собой раствор, состоящий из концентрированной серной кислоты и перекиси водорода. Для химической очистки поверхности кремния и оксида кремния объемное соотношение компонент находится в пределах

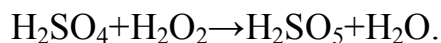


Химическая очистка в смеси Каро проводится при температуре 90 – 150 °С. Уже при приготовлении смеси Каро происходит саморазогрев раствора. Это связано с тем, что растворение серной кислоты в воде – процесс экзотермический и при этом выделяется большое количество тепла. Поскольку перекись водорода, выпускаемая промышленностью, представляет собой 30–35 %-ный водный раствор, то при смешивании  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$  наблюдается повышение температуры приготавливаемой смеси. Этот факт делает невозможным приготовление смеси Каро на централизованных участках приготовления растворов и данный технологический раствор всегда приготавливают непосредственно в ванне установки химической обработки. При приготовлении смеси Каро в ванну вначале заправляют перекись водорода, а затем добавляют серную кислоту. Это необходимо для исключения разбрызгивания капелек воды при саморазогреве смеси в процессе приготовления.

Химическая обработка в смеси Каро позволяет очистить поверхность полупроводниковой пластины от органических загрязнений и, частично, от ион-

ных и атомарных примесей.

При взаимодействии серной кислоты и перекиси водорода в растворе происходит образование пероксомоносерной кислоты с химической формулой  $H_2SO_5$ . Эта кислота имеет также названия: моноадсерная кислота или кислота Каро. Образование кислоты Каро описывается следующим уравнением:



Чем выше концентрация серной кислоты, тем быстрее происходит образование пероксомоносерной кислоты. Литературные данные свидетельствуют о том, что образование  $H_2SO_5$  происходит при концентрации серной кислоты в растворе не менее 67 %. Кислота Каро устойчива в кислых средах и является очень сильным окислителем. Присутствие в смеси Каро одновременно пероксомоносерной кислоты и серной кислоты, которая также является достаточно сильным окислителем, позволяет разлагать органические примеси до  $CO_2$  и воды или переводить их в легко растворимые в воде формы.

Десорбция ионных и атомарных примесей с поверхности пластины происходит благодаря тому, что серная кислота образует два ряда солей: кислые сульфаты (гидросульфаты)  $M^1HSO_4$  и нормальные (нейтральные) сульфаты  $M^1_2SO_4$  ( $M^1$  – одновалентный ион металла).

Кислые сульфаты известны только для щелочных металлов и образуются при взаимодействии серной кислоты с солями щелочных металлов других кислот при умеренно повышенных температурах. Например:



Концентрированная серная кислота на металлы действует как сильный окислитель, при этом сама, восстанавливаясь до  $SO_2$ , серы или  $H_2S$  в зависимости от активности металла, например:

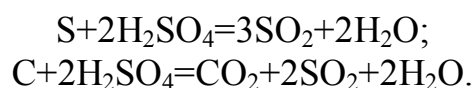


Большинство сульфатов хорошо растворимы в воде. Трудно растворимыми являются сульфаты щелочноземельных металлов (Ca, Ba, Mg) и сульфат свинца. Довольно плохо растворяется в воде и сульфат серебра.

Более эффективная десорбция атомарных и ионных примесей с поверхности пластин в смеси Каро объясняется тем, что пероксомоносерная кислота также способна к солеобразованию. Все соли пероксомоносерной кислоты хорошо растворимы в воде, при этом кислота  $H_2SO_5$  не образует труднорастворимую бариевую и свинцовую соль. Однако все соли пероксомоносерной кислоты малоустойчивы.

Смесь Каро способна очищать поверхность кремниевой пластины и от неметаллических загрязнений. Это объясняется тем, что при нагревании концентрированная серная кислота может окислять и неметаллы, например, серу, углерод и др.:



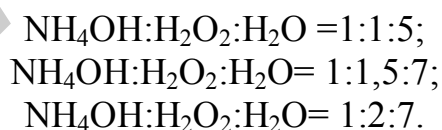


Смесь Каро – очень агрессивная жидкость. При работе с ней необходимо соблюдать осторожность и аккуратность и четко выполнять существующие инструкции по охране труда. Кроме этого, смесь Каро может стать источником загрязнения поверхности пластин ионными и механическими загрязнителями. Источником ионных загрязнений данная смесь становится в том случае, если нарушается герметичность защитного чехла нагревательного элемента или термомпары ванны химической обработки, в которой производится очистка полупроводниковых пластин в смеси Каро.

Основным недостатком очистки пластин в смеси Каро является то, что данный технологический раствор не обеспечивает требуемого уровня чистоты поверхности по механическим загрязнениям. Поэтому для снижения количества светящихся точек, появляющихся на поверхности пластин, при обработке их в смеси Каро, данный технологический процесс интенсифицируется обычно введением барботажа в ванне с технологическим раствором, промывки пластин с помощью водяного душа и т. д.

**Очистка кремниевых пластин в перекисно-аммиачных растворах (ПАР).** Наиболее универсальной обработкой поверхности кремния и диоксида кремния является обработка в перекисно-аммиачных растворах. Перекисно-аммиачные растворы с высокой эффективностью обеспечивают удаление с поверхности пластин механических и органических загрязнений, а так же десорбцию атомарных и ионных примесей.

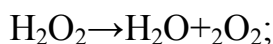
Основными компонентами перекисно-аммиачных растворов являются перекись водорода (обычно 30–35 %-ный раствор  $\text{H}_2\text{O}_2$ ), аммиак водный (обычно 20–25 %-ный раствор  $\text{NH}_3$  в воде) и деионизованная вода. Соотношение компонент перекисно-аммиачных растворов, используемых на разных предприятиях, различны. Наиболее часто встречаются следующие составы растворов (объемные соотношения):



Очистку поверхности в перекисно-аммиачных растворах проводят при температуре 60–80 °С.

Механизм очистки поверхности пластин в перекисно-аммиачном растворе следующий:

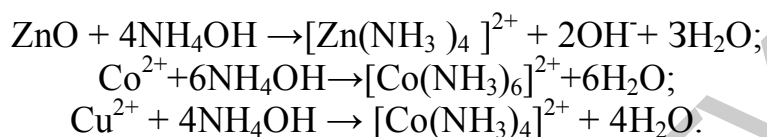
1) разложение перекиси водорода, которое в значительной мере наблюдается при повышенных температурах и высоких значениях рН (рН перекисно-аммиачных растворов находится в пределах 9–11) сопровождается выделением атомарного кислорода:



2) выделяющийся кислород обеспечивает разрушение молекул органических загрязнений, перевод их в водорастворимое состояние и одновременно с этим производит окисление примесей атомов металлов до ионного состояния. Кроме этого, за счет интенсивного перемешивания раствора благодаря выделению пузырьков кислорода и созданию щелочной аммиачной среды происходит эффективная очистка поверхности от микрочастиц;

3) десорбция ионных примесей за счет образования комплексных соединений с аммиаком.

Образование аммиакатов в перекисно-аммиачных растворах происходит в результате взаимодействия гидроксида аммония с оксидами, гидроксидами и солями металлов:



Основной проблемой при использовании в технологии химической обработки поверхности пластин растворов на основе перекиси водорода является то, что растворы  $\text{H}_2\text{O}_2$  разлагаются с течением времени, особенно при высоких температурах и высоких значениях pH. Перекись водорода распадается на кислород и воду, при этом концентрация ее в перекисно-аммиачном растворе постепенно падает.

Для реализации возможности приготовления перекисно-аммиачных растворов на централизованных участках приготовления, а также для повышения срока их службы в нагретом состоянии и увеличения количества пластин, обрабатываемых в одном объеме, в состав очищающих аммиачных растворов вводят добавки стабилизаторов перекиси водорода. Особенно эффективны в качестве стабилизаторов фосфоновые соединения, которые обладают высокой комплексообразующей способностью и могут связывать в каталитически неактивные комплексные соединения большое число каталитически активных ионов тяжелых металлов.

Фосфоновые стабилизаторы особенно эффективны против загрязнения растворов  $\text{H}_2\text{O}_2$  соединениями железа. Использование данного класса соединений в перекисно-аммиачных растворах, наряду с решением задачи по снижению скорости разложения  $\text{H}_2\text{O}_2$ , позволяет сместить динамическое равновесие между примесью в растворе и примесью адсорбированной на поверхности кремниевой подложки в сторону раствора, что значительно улучшает качество поверхности после химической обработки.

Для обеспечения высокого качества обработанной в перекисно-аммиачных растворах поверхности полупроводниковой пластины, обеспечения высокой воспроизводимости качества обработки от процесса к процессу и для создания энергосберегающих технологий химической обработки необходимым условием является поддержание концентрации основных компонентов (перекиси водорода и аммиака) практически на одном уровне в течение времени ис-

пользования раствора. Если перекисно-аммиачные растворы, в состав которых не введен стабилизатор, пригодны для выполнения одного цикла обработки пластин, то введение стабилизатора позволяет увеличить число циклов до двух или трех. Дальнейшее увеличение количества обрабатываемых в одном объеме пластин приводит к ухудшению качества из-за снижения концентрации  $\text{H}_2\text{O}_2$  и  $\text{NH}_3$ . Для поддержания концентраций основных компонентов перекисно-аммиачных растворов на одном уровне чаще всего применяется их корректировка с помощью специальных корректирующих растворов. В качестве их обычно используют растворы перекиси водорода, или перекисно-аммиачные с высоким содержанием (80–100 г/л) основных компонентов. Использование в качестве корректирующих перекисно-аммиачных растворов более предпочтительно, чем использование растворов  $\text{H}_2\text{O}_2$ , так как при использовании последних в основном растворе в значительной мере уменьшается концентрация аммиака и снижается эффективность очистки. Использование перекисно-аммиачных корректирующих растворов позволяет увеличить количество циклов обработки в одном объеме до шести без ухудшения дефектности после обработки.

Однако при использовании ПАР может наблюдаться загрязнение поверхности кремния примесями алюминия, магния и железа, что в ряде случаев требует дополнительной обработки в кислых растворах.

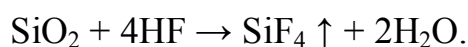
#### **Очистка кремниевых пластин в перекисно-соляных растворах (ПСР).**

Наряду с перекисно-аммиачными растворами в технологии изготовления интегральных микросхем широко применяются перекисно-соляные растворы, включающие в свой состав соляную кислоту, перекись водорода и воду. Наиболее часто встречающийся перекисно-соляной раствор представляет собой смесь  $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}$  с соотношением объемных частей 5:1:1.

Действие перекисно-соляных растворов основано на образовании растворимых простых и комплексных солей соляной кислоты с ионными и атомарными загрязнениями на поверхности кремния или диоксида кремния. Солянокислые составы эффективны для удаления щелочных и тяжелых металлов. Очистка в перекисно-соляных растворах проводится при температуре 70–90 °С в течение 1020 мин с последующей тщательной отмывкой в деионизованной воде.

**Очистка кремниевых пластин от тонкого естественного окисла.** Для удаления с поверхности кремния тонкого естественного слоя окисла химическим травлением используют травители на основе водных растворов плавиковой кислоты ( $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=1:50$ ). Скорость снятия окисла при этом составляет порядка (40–60)Å/мин. Контроль скорости травления осуществляется по контрольной пластине с окислом кремния и с использованием спектрофотометра.

Механизм травления  $\text{SiO}_2$  в водном растворе  $\text{HF}$  описывается уравнением



Кроме того, обработка в растворе  $\text{HF}$  эффективна для снижения уровня металлов на поверхности кремния. Однако при этом наблюдается значительное загрязнение поверхности микрочастицами, что связано с появлением свобод-

ных (ненасыщенных) связей на поверхности кремния, повышающих активность поверхности и ее сорбционную способность. Более того, по данной причине на завершающей стадии обработки может наблюдаться адсорбция атомов тяжелых металлов и примесей углерода.

**Ультразвуковая очистка кремниевых пластин.** Альтернативой органическим растворителям и хладонам является ультразвуковая (УЗ) очистка в водных растворах поверхностно активных веществ (ПАВ). Воздействие УЗ-полей на жидкие среды вызывает в них процессы кавитации, а также макро- и микропотоки в объеме жидкости, прилегающей к излучаемой поверхности ванны. Захлопывание кавитационных газовых полостей сопровождается образованием ударных микроволн, давления в которых могут достигать  $(1-5) \cdot 10^8$  Па. Такие микроудары разрушают не только оксидные пленки и загрязнения на обрабатываемой поверхности изделий, но и в определенной степени изменяют морфологию поверхности. Возникающие микро- и макропотоки способствуют удалению загрязнений и ускорению процесса очистки микрорельефных поверхностей. Обусловленные кавитацией динамические и тепловые эффекты интенсифицируют процесс удаления загрязнений с поверхностей деталей и изделий под действием УЗ-поля.

Использование рабочих частот в диапазоне 80–120 кГц обеспечивает неразрушающую очистку и удаление загрязнений размером до 1 мкм с микрорельефных поверхностей.

Основными преимуществами УЗ-очистки перед другими известными методами удаления загрязнений являются высокая производительность, сочетающаяся с хорошим качеством очистки изделий от любых поверхностных пленок. Развитие технологии УЗ-очистки и обезжиривания поверхностей изделий за последние десятилетия показало, что наиболее производительным является групповой способ обработки мелких изделий, уложенных в кассеты или корзины. Для обеспечения высокого качества очистки необходимо создать направленные акустические течения и обеспечить равномерность распределения интенсивности УЗ-поля в объеме жидкости.

**Контроль качества жидкостной химической обработки.** Для промышленного контроля чистоты поверхности отмытых пластин используют прямые и косвенные методы.

Прямые методы позволяют определить загрязнения непосредственно на поверхности пластин (обследование поверхности под «косым» пучком осветителя и в темном поле микроскопа, методы, основанные на смачиваемости, трибометрический).

При обследовании поверхности пластин под пучком осветителя или в темном поле микроскопа лучи света, падающие под углом к поверхности, рассеиваются инородными частицами и делают их различимыми в виде светящихся точек, число которых контролируют обычно на всей поверхности пластины или на единице площади ( $1 \text{ см}^2$ ). Их плотность не должна превышать  $10 \text{ см}^{-2}$ .

Чистоту поверхности пластин по смачиваемости проверяют методами

окунания в чистую воду, распыления воды, запотевания, конденсации и измерения угла смачивания.

При окунании в чистую воду очищенная поверхность пластин, свободная от жировых загрязнений, вследствие адгезии способна удерживать сплошную пленку воды. Жировые загрязнения делают поверхность пластин гидрофобной и нарушают целостность пленки, что обычно наблюдают визуально после стекания воды с поверхности извлеченной пластины.

Аналогичное явление происходит при распылении чистой воды на сухую поверхность очищенной пластины. Чистую поверхность вода сразу же покрывает сплошным слоем, а на грязной удерживается в виде отдельных пятен. Такой метод распыления в несколько раз чувствительнее метода окунания, так как позволяет обнаружить загрязнения малых размеров.

Метод запотевания основан на визуальном наблюдении поверхности пластины после обдува увлажненным воздухом. Влага, конденсируемая на поверхности, образует «фигуры запотевания». При наличии загрязнений поверхность покрыта мелкими каплями воды («серая фигура запотевания»), при хорошем качестве ее отмытки – сплошной пленкой воды («черная фигура запотевания»).

Метод конденсации основан на аналогичном наблюдении поверхности, но при этом пластину охлаждают жидким азотом до температуры ниже точки росы. Смачивание поверхности конденсатом наблюдается после таяния инея.

Угол смачивания очищенной поверхности каплей воды определяют теневым методом на установке УКУС-1, на экране которой проецируется изображение капли и поверхности. На гидрофильной поверхности капля растекается, и угол смачивания не превышает  $1-3^\circ$ , на гидрофобной – остается в виде шарика, причем угол смачивания близок к  $90^\circ$ . При промежуточном состоянии поверхности капля растекается частично.

Трибометрический метод основан на измерении усилия, необходимого для перемещения металлической иглы специальной установки по поверхности пластины. Органические загрязнения уменьшают силу трения при перемещении, на чистой поверхности коэффициент трения значительно выше. Контроль пластин таким методом выполняется только на образцах-спутниках, так как на рабочих пластинах могут остаться царапины от иглы.

Косвенные методы основаны на удалении с поверхности загрязнений растворителями или стравливания их вместе с тонким поверхностным слоем. Измеряют удельное сопротивление раствора или травителя до и после погружения в него контролируемой пластины либо проводят спектральный анализ сухого остатка после его выпаривания.

### **Устройство и работа установки химической обработки, входящей в комплекс «Лада-1 Электроника»**

Установка химической обработки (рис. 2.2, а,б) содержит четыре ванны, закрепленные на поддоне 5. Три ванны 1, выполненные из фторопласта и снабженные фторопластовыми крышками, служат для химической обработки пла-

стин, а трехсекционная ванна 4 из полипропилена – для каскадной отмывки пластин в деионизованной воде. В каждой ванне могут размещаться две унифицированные 25-местные кассеты.

При подготовке установки к работе ванны 1 заполняются реактивом за счет соединения установки транспортировки и подачи реактива электромагнитным клапаном 8 с магистралью сжатого воздуха. Температура реактива в ваннах регулируется электронагревателями 2 в диапазоне 50...150 °С с погрешностью ±5 °С. Для удаления отработанных реактивов используются насосы-эжекторы 3, в которых разрежение создается потоком воды с давлением более 0.4 МПа. При откачке реактива он смешивается с водой в пропорции 1:2.

Подача воды в каскадную ванну 4 ведется снизу через дно и решетку левой (см. чертеж), а слив воды – через решетку и дно правой секции. Секции разделены разновысокими перегородками, что обеспечивает перелив воды слева направо. Кассеты с пластинами перемещаются в обратном направлении, поэтому промывка завершается в секции с наиболее чистой водой. Управление подачей деионизованной воды в ванну 4 и водопроводной воды в эжекторные насосы производится вентилями 7.

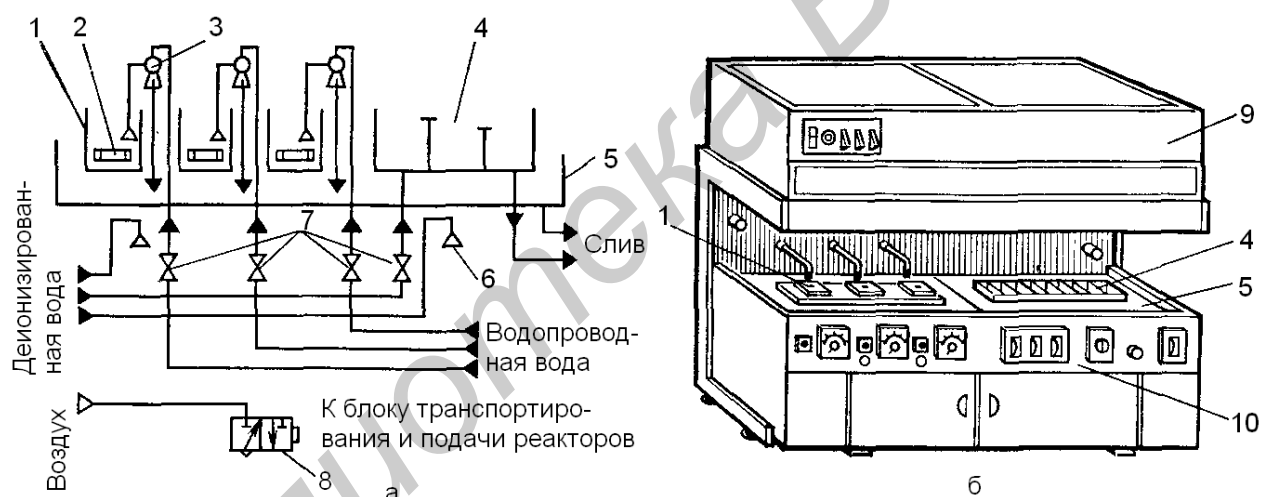


Рис. 2.2. Устройство установки химической обработки, входящей в комплекс «Лада-1 Электроника»

Для периодической промывки ванн деионизованной водой используются краны-рассеиватели 6; поддон 5, облицованный полипропиленом, соединенным со сливом для удаления остатков воды и реактивов. Не занятая ваннами площадь поддона закрыта перфорированными решетками, через которые продукты химических реакции отсасываются в вытяжную вентиляцию.

Поддон выполнен в виде столешницы в верхней части унифицированного стола 10 (рис. 2.2, б), на передней панели которого установлены регистрирующие приборы и ручки управления, а в задней части – воздухопровод для подключения к вытяжной вентиляции. В основании стола размещается блок пневмогидравлической аппаратуры. Над столом с ваннами расположен блок обес-

пыливания 9, создающий вертикальный ламинарный поток очищенного воздуха, преграждающего поступление воздуха из помещения к технологическим ваннам.

### Порядок выполнения работы (1-й вариант)

1. Ознакомиться с устройством установки химической обработки, входящей в комплекс «Лада-1 Электроника».

2. Под руководством преподавателя провести процесс химической обработки пластин в травителях Каро и ПАР. Время обработки в травителе Каро – 3 мин., в ПАР – 10 мин.

3. Оценить качество обработки поверхности под «косым» пучком осветителя и в темном поле микроскопа.

4. Измерить скорость травления окисла кремния в травителе на основе водных растворов плавиковой кислоты ( $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=1:50$ ). Для чего:

– замерить с помощью спектрофотометра «Leitz» толщину окисла на контрольной пластине;

– провести процесс травления окисла в травителе в течение 5 мин.;

– замерить с помощью спектрофотометра «Leitz» толщину окисла на контрольной пластине после процесса травления;

– рассчитать скорость травления по формуле

$$V_{\text{тр}} = (d_1 - d_2)/t,$$

где  $d_1$  – толщина окисла кремния на контрольной пластине до травления,  $d_2$  – толщина окисла кремния на контрольной пластине после травления,  $t$  – время травления.

5. Под руководством преподавателя провести процесс химической обработки пластин в травителе на основе водных растворов плавиковой кислоты ( $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=1:50$ ).

6. Под контролем преподавателя оценить качество снятия естественного окисла методом запотевания.

7. Оформить отчет по лабораторной работе.

### Порядок выполнения работы (2-й вариант)

1. Под руководством преподавателя провести процесс химической обработки пластин в травителях Каро и ПАР. Время обработки в травителе Каро – 3 мин., в ПАР – 10 мин.

2. Оценить качество обработки поверхности под «косым» пучком осветителя и в темном поле микроскопа.

3. Измерить скорость травления окисла кремния в травителе на основе водных растворов плавиковой кислоты ( $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=1:50$ ). Для чего:

- измерить с помощью микроинтерферометра «МИИ-4» толщину окисла на контрольной пластине;
- провести процесс травления окисла в травителе в течение 5 мин.;
- измерить с помощью микроинтерферометра «МИИ-4» толщину окисла на контрольной пластине после процесса травления;
- рассчитать скорость травления по формуле

$$V_{\text{тр}} = (d_1 - d_2) / t,$$

где  $d_1$  – толщина окисла кремния на контрольной пластине до травления,  $d_2$  – толщина окисла кремния на контрольной пластине после травления,  $t$  – время травления.

4. Под руководством преподавателя провести процесс химической обработки пластин в травителе на основе водных растворов плавиковой кислоты ( $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=1:50$ ).

5. Под контролем преподавателя оценить качество снятия естественного окисла методом запотевания.

6. Оформить отчет по лабораторной работе.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема установки химической обработки, входящей в комплекс «Лада-1 Электроника».
3. Режимы химической обработки в травителях Каро и ПАР, результаты контроля качества обработки поверхности под «косым» пучком осветителя и в темном поле микроскопа после обработки в Каро и ПАР, результаты расчета скорости травления, результаты контроля качества снятия естественного окисла методом запотевания.
4. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Разновидности загрязнений поверхности полупроводниковых структур.
2. Основные источники загрязнений.
3. Классификация процессов удаления загрязнений с поверхности твёрдых тел.
4. Очистка кремниевых пластин в травителе Каро.
5. Очистка кремниевых пластин в перекисно-аммиачных растворах.
6. Очистка кремниевых пластин в перекисно-соляных растворах.
7. Очистка кремниевых пластин от тонкого естественного окисла.
8. Ультразвуковая очистка кремниевых пластин.



## Литература

1. Химическая обработка в технологии ИМС / В. П. Василевич [и др.]. – Полоцк : ПГУ, 2001. – 206 с.
2. Готра, З. Ю. Технология микрoeлектронных устройств: Справочник /
3. Ю. Готра. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
3. Никифорова-Денисова, С. Н. Технология полупроводниковых приборов и изделий микрoeлектроники. В 10 кн.: учеб. пособие. Кн. 4 : Механическая и химическая обработка / С. Н. Никифорова-Денисова. – М. : Высш. шк., 1989. – 95 с.
4. Панфилов, Ю. В. Оборудование производства интегральных микросхем и промышленные роботы / Ю. В. Панфилов, В. Т. Рябов, Ю. Б. Цветков. – М. : Радио и связь, 1988. – 320 с.
5. Курносов, А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: учеб. пособие / А. И. Курносов, В. В. Юдин. – М. : Высш. шк., 1986. – 368 с.
6. Ланин, В. Л. Технология и оборудование ультразвуковой очистки изделий электроники / В. Л. Ланин, В. С. Томаль // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – Т. 8. – С. 6 – 10.

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ СЛОЕВ НИТРИДА КРЕМНИЯ

### Цель работы

Изучить принципы технологического процесса плазмохимического травления, принципы работы установки, провести процесс плазмохимического травления нитрида кремния и осуществить контроль параметров технологического процесса.

### Теоретические сведения

В технологии изделий интегральной электроники (ИИЭ) для формирования топологии схемы необходимо рисунки, формируемые методами литографии, перевести в соответствующие слои полупроводниковой структуры. Одним из методов перевода является селективное травление немаскированных участков резиста, т.е. травление. Плазменное (сухое) травление подразумевает использование плазмы в виде газовых разрядов при низком давлении и характеризуется высокоточным переводом рисунка резиста.

При изготовлении ИМС высокой степени интеграции, размеры элементов которых достигают долей микрон, жидкостные методы травления не могут быть использованы из-за их недостатков. Более эффективны при этом «сухие» методы обработки, основанные на взаимодействии газоразрядной плазмы с поверхностным слоем подложки. Основными достоинствами «сухих» методов являются: отсутствие бокового подтравливания, характерного для жидкостного травления, поэтому клин травления уменьшается, и вертикальный профиль рельефного рисунка элементов приближается к идеальному; отсутствие операций промывки и сушки после операций травления; малая привносимая дефектность.

Плазменное травление повсеместно заменяет жидкостное также вследствие более высокого разрешения по ширине линии и как более автоматизированный технологический процесс, что важно при увеличении объемов производства. Методы переноса рисунка с использованием плазменного травления предусматривают применение частично ионизированных газов, состоящих из ионов, электронов и нейтронов, которые образуются при электрических разрядах в газе и низком давлении ( $\sim 0,0133 - 1330$  Па). Общий термин «плазменное травление» включает методы ионно-лучевого травления, ионно-плазменного травления, реактивного ионно-лучевого травления, реактивного ионно-плазменного травления и собственно плазменного травления. Эти методы различаются по условиям возникновения разряда, применяемому газу и оборудованию, но их общая черта – необходимость разряда (плазмы) (рис. 3.1).

При *ионном травлении* для удаления материала используется кинетиче-

ская энергия ионов инертных газов, т.е. имеет место физическое распыление материала ионами.

**Ионно–плазменное травление (ИПТ).** Образцы помещаются на отрицательный электрод разрядного устройства и подвергаются бомбардировке ионами, вытягиваемыми из плазмы.

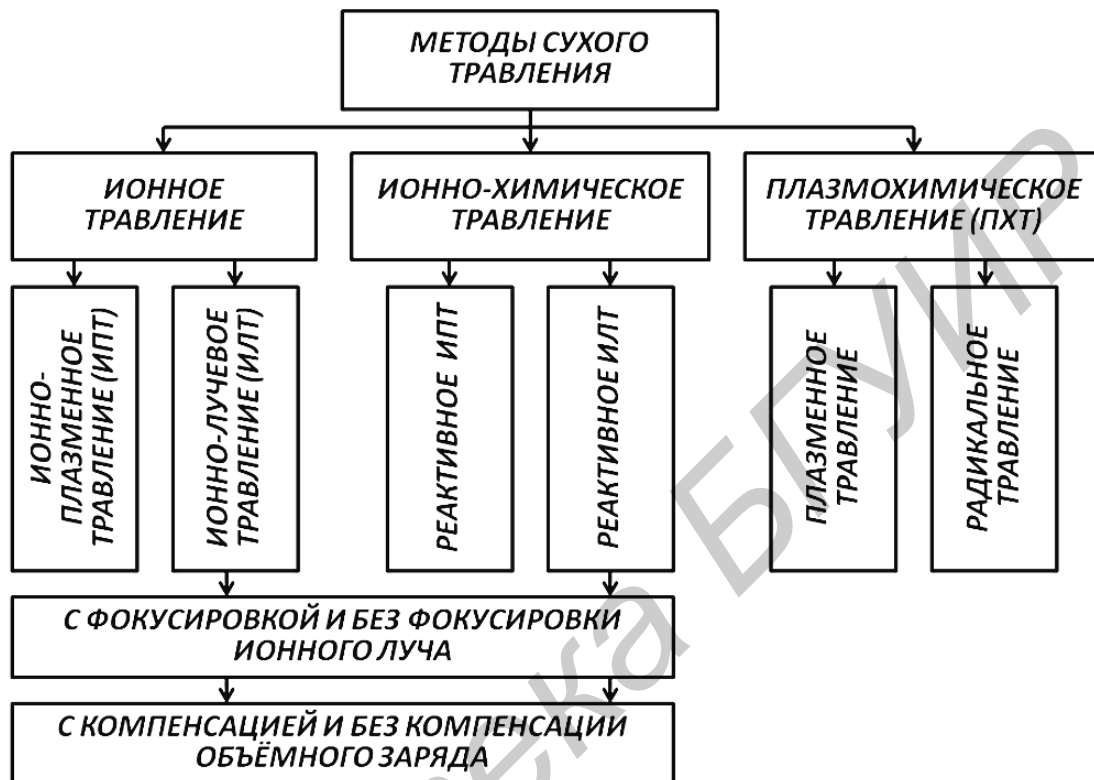


Рис. 3.1. Классификация методов сухого травления

**Ионно–лучевое травление (ИЛТ).** Образцы являются мишенью, бомбардируемой ионами, вытягиваемыми из автономного ионного источника.

Сущность ионного распыления проиллюстрирована на рис. 3.2. При распылении вещества 3 ион 1 передает импульс энергии атому распыляемого вещества, который передает импульс другим атомам, образуя каскад столкновений. Если поверхностный атом 2 распыляемого вещества 3 получит достаточный для разрыва связи с соседними атомами импульс энергии, направленный от поверхности, то он покидает ее. При распылении вещества 3 ион 1 передает импульс энергии атому распыляемого вещества, который передает импульс другим атомам, образуя каскад столкновений. Если поверхностный атом 2 распыляемого вещества 3 получит достаточный для разрыва связи с соседними атомами импульс энергии, направленный от поверхности, то он покидает ее.

Эффективность процесса ионного распыления характеризуется коэффициентом распыления  $S$ , который определяется числом удаленных частиц распыляемого вещества, приходящихся на один ион:

$$S = k \frac{m_I m_A}{\lambda(m_I + m_A)} E_I \cos \theta, \quad (3.1)$$

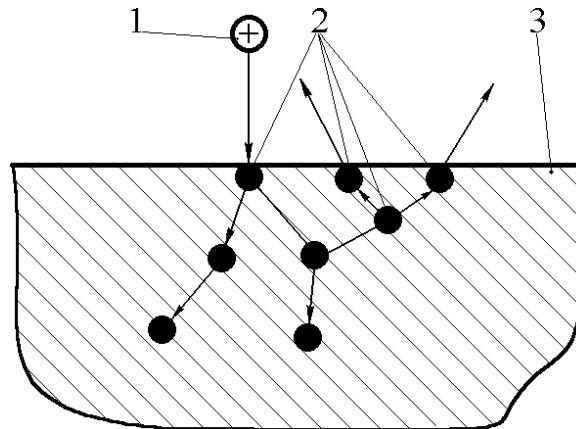


Рис. 3.2. Взаимодействие ускоренного иона с материалом распыляемого вещества:  
1 – ион, 2 – поверхностный атом, 3 – распыляемое вещество

где  $k$  – константа, учитывающая состояние поверхности,  $m_I$ ,  $m_A$  – масса иона и атома мишени соответственно,  $E_I$  – энергия первичного иона,  $\theta$  – угол между направлением движения иона и нормалью к поверхности,  $\lambda$  – средняя длина пробега иона в мишени, определяемая выражением

$$\lambda = \frac{1}{\pi d_{и,а}^2 n_0}, \quad (3.2)$$

где  $d_{и,а}$  – диаметр столкновения иона и атома,  $n_0$  – концентрация атомов мишени.

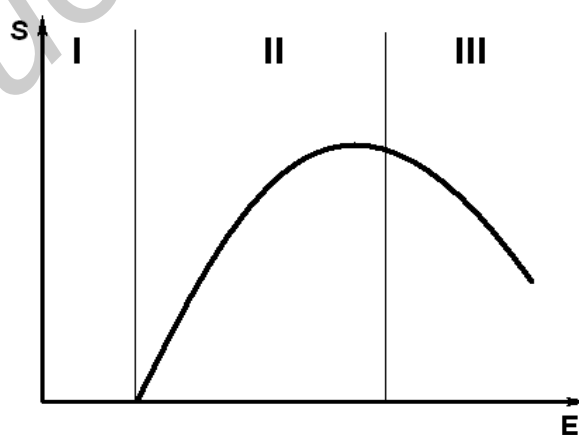


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента распыления от энергии падающего иона:  
I – область энергий, где распыление отсутствует; II – область распыления;  
III – область энергий, где преимущественно имеет место имплантация

При **плазмохимическом травлении (ПХТ)** для удаления материала используется энергия химических реакций между ионами и радикалами активного газа и атомами (или молекулами) обрабатываемого вещества с образованием стабильных летучих соединений. В зависимости от среды, в которую помещаются образцы, ПХТ подразделяется на:

– **плазменное травление**: образцы помещаются в плазму химически активных газов (рис. 3.4, а);

– **радикальное травление**: образцы помещаются в вакуумную камеру, отделенную от химически активной плазмы перфорированными металлическими экранами, или электрическими (магнитными) полями, а травление осуществляется химически активными частицами (свободными атомами и радикалами), поступающими из плазмы.

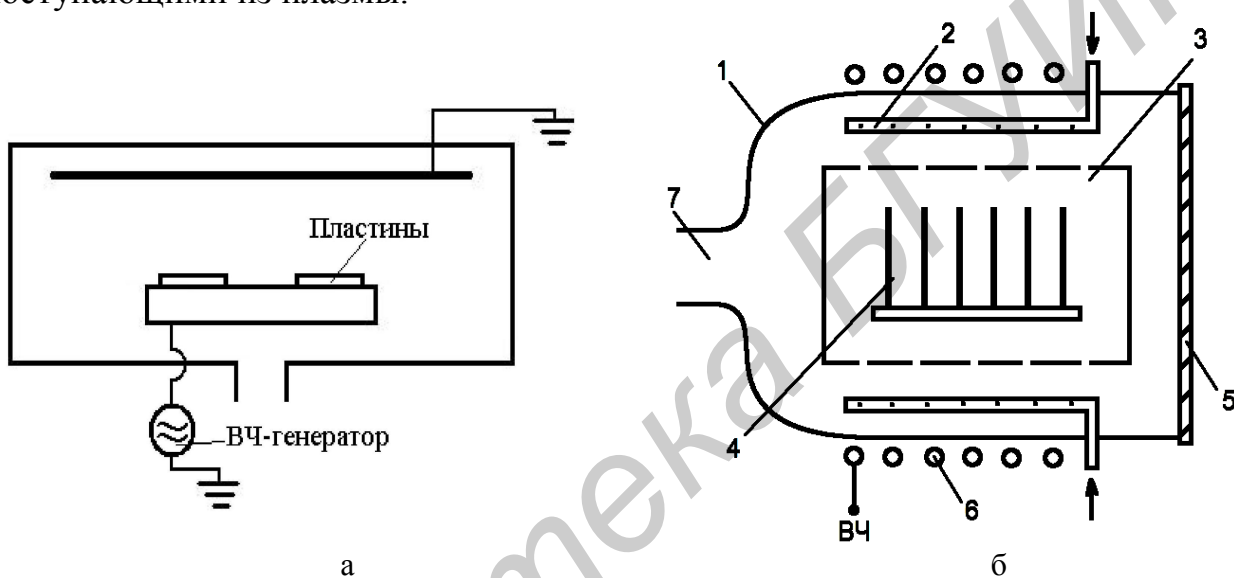


Рис. 3.4. Схемы реакторов для плазмохимического травления:

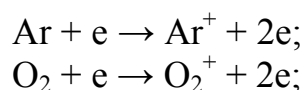
а – реактор для ПХТ с емкостным разрядом, б – реактор для ПХТ с индуктивным разрядом:  
 1 – кварцевый реактор; 2 – коллектор для подачи газа; 3 – перфорированный корпус; 4 – подложки; 5 – крышка; 6 – ВЧ-индуктор; 7 – откачной патрубок

При **ионно-химическом травлении (ИХТ)** используется как кинетическая энергия ионов химически активных газов, так и энергия их химических реакций с атомами или молекулами материала.

Процессы, протекающие в плазме, очень сложны и состоят из элементарных реакций между следующими частицами:

- электронами и молекулами;
- электронами и радикалами;
- электронами и ионами;
- ионами и молекулами;
- ионами и ионами.

При этом в плазме возникают ионы, атомы, радикалы в результате **простой ионизации**:



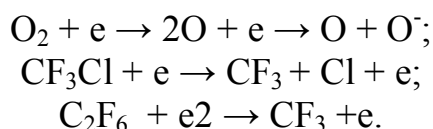
**диссоциативной ионизации:**



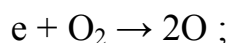
**диссоциативной ионизации с прилипанием:**



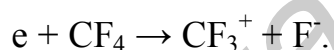
**молекулярной диссоциации:**



Потеря электронов в результате **диссоциативной рекомбинации:**



**диссоциативного прилипания:**



В общем случае кинетика плазмохимического травления состоит из следующих стадий:

1. Доставка молекул активного газа в зону разряда.
2. Превращение этих молекул в активные радикалы.
3. Доставка радикалов к поверхности обрабатываемых материалов.
4. Взаимодействие радикалов с активными центрами обрабатываемого материала.
  - 4.1. Адсорбция радикалов на поверхности.
  - 4.2. Химическая реакция.
  - 4.3. Десорбция продуктов реакции.
5. Удаление продуктов реакции из разрядной камеры.

Процесс плазмохимического травления характеризуется следующими параметрами:

– **скоростью травления**, определяемой как

$$\vartheta = \frac{d_0 - d_1}{t}, \quad (3.3)$$

где  $d_0$  – исходная толщина слоя,  $d_1$  – конечная толщина слоя,  $t$  – время травления.

– **равномерностью травления**. Как правило, скорость ПХТ неравномерна по площади пластины и лежит в пределах  $v_f(1 \pm \phi_f)$ , где  $v_f$  – средняя ско-

рость травления,  $\varphi_f$  – безразмерный параметр. С учетом неравномерности толщины удаляемого слоя общее время, необходимое для полного его вытравливания, должно составлять

$$t_c = \frac{h_f(1 + \delta)}{\vartheta_f(1 - \varphi_f)}, \quad (3.4)$$

где  $h_f$  – средняя толщина удаляемого слоя,  $\delta$  – неоднородность толщины.

– **селективностью (избирательностью) травления**, определяемой отношением скоростей травления различных материалов.

– **анизотропией травления** – разностью скоростей травления в вертикальном и горизонтальном направлениях. Данный параметр описывают степенью анизотропии, определяемой как:

$$A = 1 - \vartheta_L / \vartheta_V, \quad (3.5)$$

где  $\vartheta_L$  и  $\vartheta_V$  – скорости травления в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно (рис. 3.5).

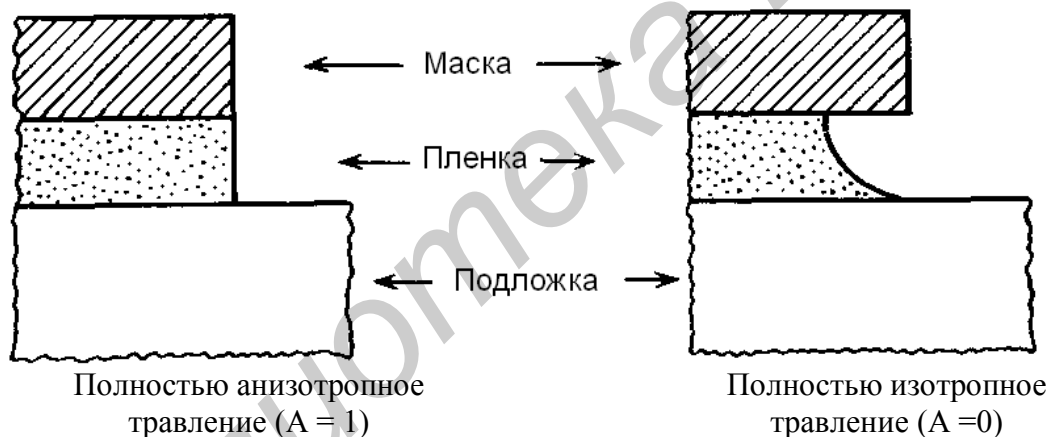


Рис. 3.5. Профили травления слоя при анизотропном и изотропном травлении

Сравнительные характеристики методов сухого травления по вышеуказанным параметрам представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Сравнительные характеристики процессов сухого травления

Параметр процесса	ИТ	ИХТ	ПХТ
Скорость травления	низкая	средняя	высокая
Равномерность процесса	низкая	средняя	высокая
Селективность	низкая	средняя	высокая
Анизотропия	высокая	средняя	низкая

Как видно из табл. 3.1, ПХТ имеет преимущества по всем параметрам кроме анизотропии, поскольку в чистом виде при отсутствии каких-либо кристаллографических эффектов такой процесс является изотропным. Для улучшения анизотропии процесс ПХТ дополнительно стимулируют бомбардировкой положительными ионами. Известны два механизма стимуляции анизотропного травления ионной бомбардировкой:

- 1) создание радиационных нарушений;
- 2) формирование пассивирующего слоя на боковых стенках.

В первом случае ионы, бомбардирующие кремний, создают радиационные нарушения в кристаллической решетке, простирающиеся в глубину на несколько атомных слоев от поверхности (рис. 3.6, а). Радиационные повреждения катализируют процесс хемосорбции травителя.

Кроме того, химическая реакция с нарушенной областью кристалла протекает с повышенной скоростью, причем глубина и количество радиационных нарушений зависят от энергии ионов.

Во втором случае определенные газы (например  $\text{CHF}_3$ ,  $\text{CClF}_3$ ) или смеси газов ( $\text{CF}_4\text{-H}_2$ ) распадаются в плазме, образуя элементы с ненасыщенными связями и радикалы, способные к полимеризации. Эти элементы, взаимодействуя с поверхностью, формируют адсорбированный слой, а в некоторых случаях – сплошную пленку. Адсорбированный слой замедляет травление, адсорбируя элементы травителя либо препятствуя доступу частиц травителя к подложке. Ионная бомбардировка поверхности удаляет покрытие из ингибиторов, что вызывает анизотропию травления (рис. 3.6, б).

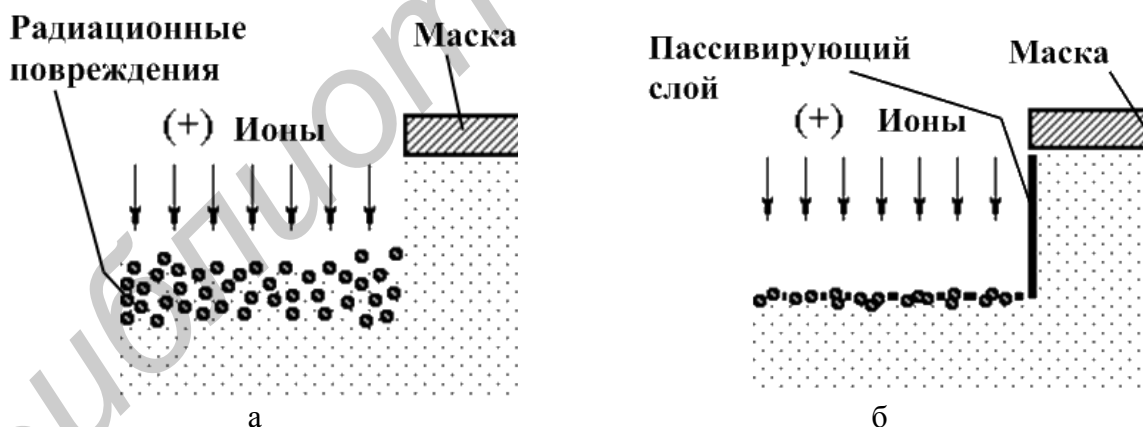


Рис. 3.6. Стимуляции анизотропии ПХТ: а – за счет радиационных нарушений, б – за счет пассивации боковых стенок

Для глубокого анизотропного травления используют так называемый Bosch–процесс, который представляет собой чередование двух стадий:

- изотропного ПХТ,
- осаждения полимера.

Такой процесс характеризуется высокой скоростью травления (до 20



мкм/мин), возможностью в широких пределах управления степенью анизотропии, высокой воспроизводимостью.

**ПХТ кремния.** Плазмохимическое травление кремния осуществляют во фторсодержащей плазме. Атомы фтора реагируют с кремнием *n* и *p* типа проводимости, а также с  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , образуя летучие соединения. В качестве источников фтора могут служить молекулы:  $\text{F}_2$ ,  $\text{CF}_4$ ,  $\text{C}_2\text{F}_6$ ,  $\text{C}_3\text{F}_8$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{NF}_3$ ,  $\text{ClF}_3$ , которые при диссоциации в плазме могут образовывать атомарный фтор, а также различные фторсодержащие радикалы. В результате химических реакций с кремнием образуются летучие продукты такие, как  $\text{SiF}_2$  и  $\text{SiF}_4$ . Для улучшения эффективности процесса в плазму добавляют кислород, который в атомарном состоянии окисляет углерод до  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ .

Схематично механизм травления кремния атомами фтора представлен на рис. 3.7. В результате протекания реакции происходит разрыв связей и образуется  $\text{SiF}_{2(\text{r})}$  или возникает связанный кремниево-фтористый радикал, который после присоединения к нему фтора освобождается в виде газообразного  $\text{SiF}_4$ .

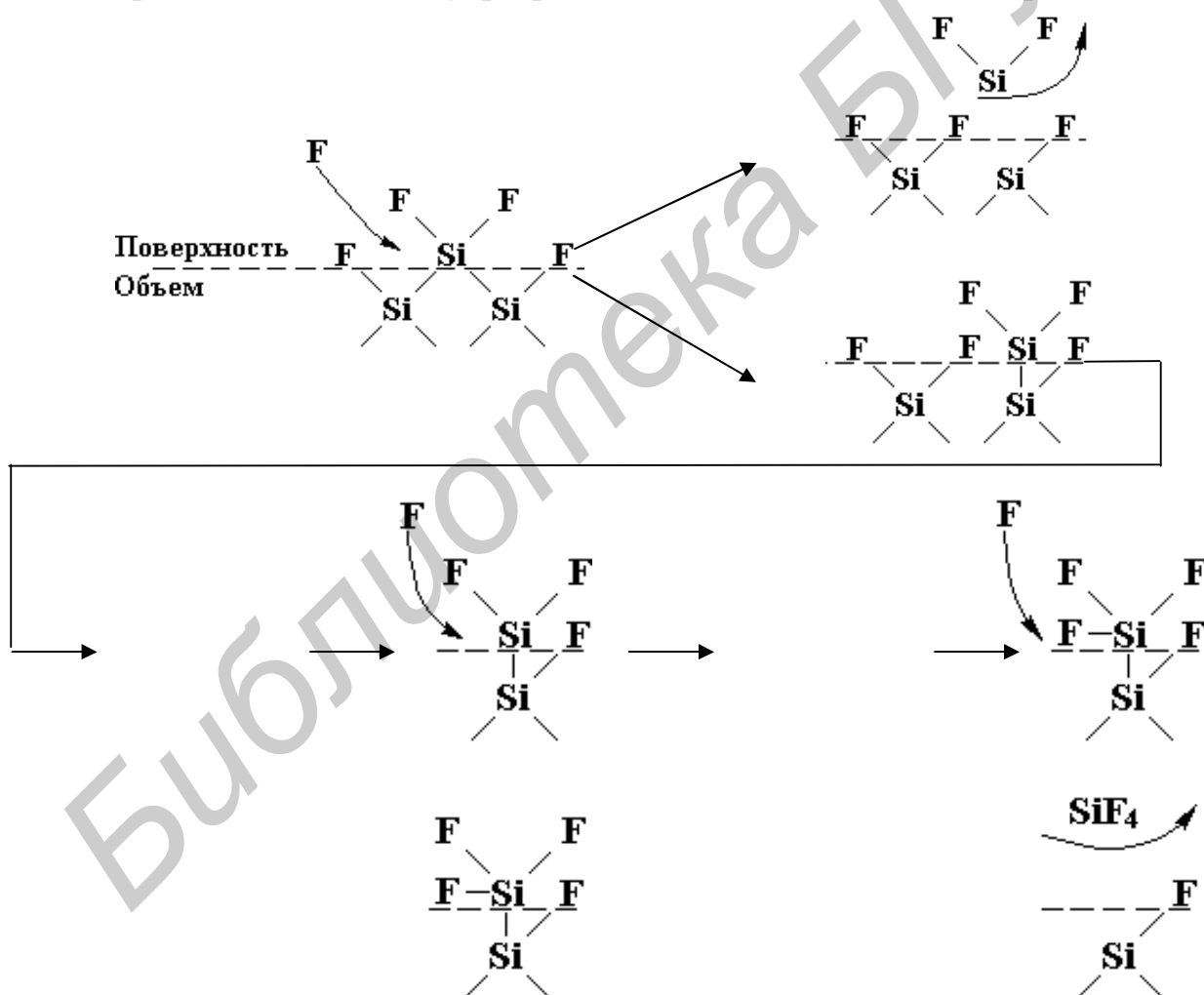


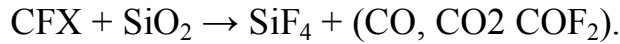
Рис. 3.7. Схема травления кремния во фторсодержащей плазме

**ПХТ слоёв  $\text{SiO}_2$ .** Для травления используются следующие газы:  $\text{C}_3\text{F}_8$ ,  $\text{CHF}_3$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{He}$ . В плазме  $\text{C}_3\text{F}_8$  диссоциирует, образуя химически активные ради-

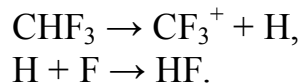
калы CFX, а также атомарный фтор:



Радикалы CFX (главным образом  $CF_3^+$ ) взаимодействуют с  $SiO_2$  с образованием таких летучих продуктов, как  $SiF_4$ , CO,  $CO_2$ ,  $COF_2$ :



Кислород способствует лучшему удалению из зоны травления нелетучих углеродсодержащих соединений за счет образования таких газов, как  $COF_2$ , CO и  $CO_2$ .  $CHF_3$  при диссоциации образует радикалы  $CF_3^+$ , а также атомарный водород, связывающий атомы фтора:



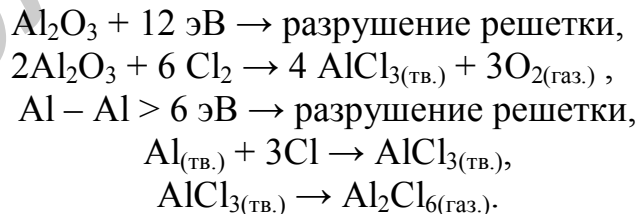
При добавлении в газовую смесь  $CHF_3$  происходит увеличение скорости травления  $SiO_2$  за счет увеличения концентрации радикалов  $CF_3^+$  и уменьшения скорости травления чистого кремния вследствие уменьшения концентрации атомов фтора. Это позволяет обеспечить селективность травления  $SiO_2$  по отношению к Si на уровне 10:1.

Добавка в газовую смесь гелия позволяет эффективно охлаждать стенки реактора и пластину во время и после травления, что необходимо для сохранения геометрии фоторезистивной маски.

**ПХТ слоёв  $Si_3N_4$ .** Используемые газы:  $SF_6$ , He. Травление осуществляется атомами фтора, которые освобождаются в плазме гексафторида серы. Поскольку атомы фтора быстрее вступают в реакцию с  $Si_3N_4$ , чем с  $SiO_2$ , то данный процесс характеризуется селективностью травления  $Si_3N_4$  по отношению к  $SiO_2$ . Добавка гелия выполняет функцию хладагента.

**ПХТ слоев алюминия.** Используемые газы:  $BCl_3$ ,  $Cl_2$ ,  $SiCl_4$ , He.

Травление алюминия осуществляется в плазмообразующей смеси  $BCl_3 + Cl_2$  согласно схеме:



Таким образом, чистый хлор обеспечивает удаление оксида алюминия, который всегда содержится на поверхности пленки алюминия, а также по границам кристаллических зерен.

Процесс травления проводится в две стадии:

– первые 60 секунд процесса (*индукционный период*) осуществляют при более высокой мощности. Это обуславливает увеличение ионной составляю-

шей плазмы и дополнительное травление поверхности пленки физическим распылением, характеризующимся малой селективностью травления Al по отношению к  $Al_2O_3$ ;

– вторая стадия (травление слоя) проводится с уменьшенной мощностью для более высокой селективности процесса.

Добавка в газовую смесь  $SiCl_4$  производится для исключения бокового подтравливания под маску фоторезиста. После разложения в плазме  $SiCl_4$  образуются атомы хлора, участвующие в реакции травления Al, а освободившийся кремний осаждается на боковых стенках и дне канавки травления. Осажденный кремний удаляется со дна канавки бомбардировкой положительными ионами, в то время как на боковых стенках этого не происходит из-за малого угла их падения. Таким образом, кремний, осажденный на боковых стенках, блокирует реакцию с алюминием, т.к. не образует в плазме летучих соединений с хлором.

**Удаление фоторезиста.** Основным газом для «сухого» удаления фоторезиста в плазме является кислород. При микроволновом возбуждении кислорода образуются различные нейтральные и заряженные частицы:  $O^3$ ,  $O^+$ ,  $O^{2+}$ ,  $O^-$ ,  $O^{2-}$ , атомарный кислород и синглетный кислород. Физическая химия процесса сравнима с химией горения с образованием летучих соединений ( $CO_2$ , CO,  $H_2O$  и радикалов). Для стабилизации кислородной плазмы в нее добавляют инертный газ.

### Технологический процесс травления нитрида кремния на установке LAM 490

Общий вид и структурная схема установки LAM 490 представлены на рис. 3.8, а, б.

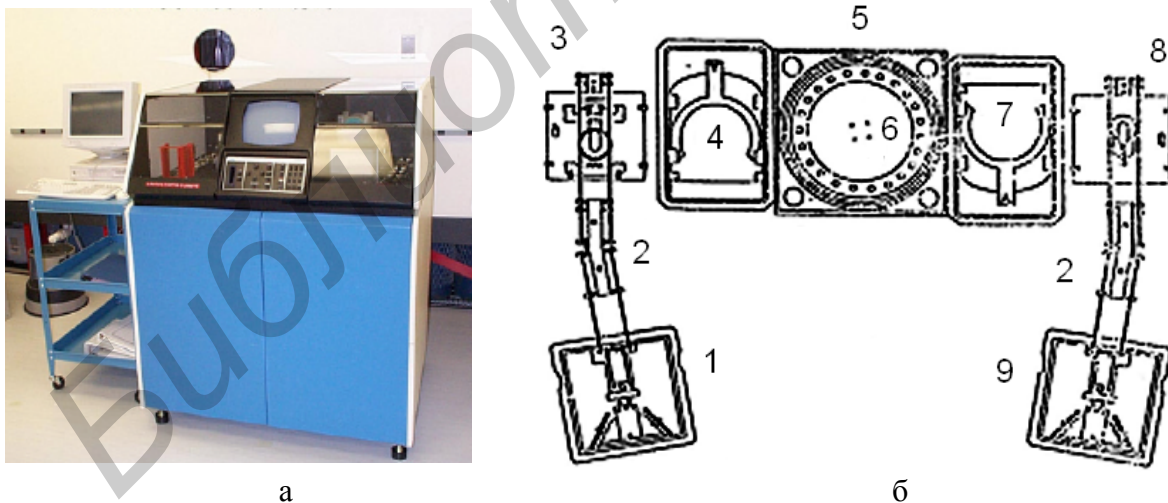


Рис. 3.8. Устройство установки LAM 490:

- а – общий вид, б – структурная схема: 1 – подающий индексатор; 2 – ленточный конвейер; 3 – подающий подъемник; 4 – входной шлюз и манипулятор; 5 – рабочая камера; 6 – подъемник камеры (4-контактный); 7 – выходной шлюз и манипулятор; 8 – приемный подъемник; 9 – приемный индексатор.

Плазмохимическое травление является периодическим процессом и состоит из следующих шагов. Пластины обрабатываются поштучно и передаются из подающей кассеты в приемную. Подающий индексатор загружает пластины по одной из подающей кассеты на ленточный конвейер. Конвейер перемещает пластину на подающий подъемник. Датчики, расположенные на подающем подъемнике, сообщают контроллеру о наличии пластины, а также сигнализируют о наличии двух пластин, что является недопустимым, и контроллер останавливает процесс. Подъемник поднимает пластину с конвейера к манипулятору входного шлюза. Манипулятор перемещает пластину в шлюз. Когда манипулятор располагается в центре шлюза, о чем сигнализирует соответствующий датчик, внешняя задвижка закрывается, и из шлюза откачивается воздух.

Когда давление достигает установленной величины, открывается внутренняя задвижка, и пластина загружается в камеру. Манипулятор размещает пластину и выходит из камеры; внутренняя задвижка закрывается, в камеру вводятся газы ( $\text{SF}_6$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{He}$ ), изменение расхода газов влияет на качество травления. Верхний электрод опускается на заданное расстояние, включается генератор частоты и происходит травление.

В процессе травления необходимо поддерживать температуру нижнего электрода на заданном уровне при помощи циркулирующего этиленгликоля. Расстояние между верхним и нижним электродами устанавливается в соответствии с частотой облучения генератора. Расход газов контролируется и регулируется в соответствии с требованиями технологического процесса.

По окончании цикла обработки подъемник поднимает пластину, выходная внутренняя задвижка открывается, и выходной манипулятор переносит пластину в выходной шлюз. Внутренняя задвижка закрывается, и давление в шлюзе доводится до атмосферного. Когда давление достигает установленной величины, открывается внешняя выходная задвижка, и выходной манипулятор помещает пластину на приемный подъемник. Манипулятор отводится, пластина переносится на приемный конвейер, далее цикл повторяется. Автоматические функции машины контролируются микропроцессорным контроллером. Параметры, подлежащие контролю и регулированию в объекте, приведены в табл. 3.2.

Поверхность рабочей камеры анодирована. Это необходимо для предотвращения реакции с травильными газами и для защиты поверхности камеры во время процесса травления. На передней и задней панели камеры имеются кварцевые окна, каждое окно оснащено проволочным экраном (для защиты от радиочастотного излучения) и плексигласовым покрытием (для фильтрации ультрафиолетового излучения). Окна позволяют наблюдать за процессом травления. Заднее окно является также опорой для установки емкостного манометра и реле давления.

Параметры технологического процесса ПХТ нитрида кремния

Параметр	Номинальное значение	Контр.	Регулир.
Расход SF <sub>6</sub>	0–120±1см <sup>3</sup> /мин	+	+
Расход O <sub>2</sub>	0–10±1см <sup>3</sup> /мин	+	+
Расход He	0–70±1см <sup>3</sup> /мин	+	+
Давление в рабочей камере	0–25±1Торр	–	+
Давление в приемной камере	0–50±1Торр	–	+
Температура нижнего электрода	27±1°С	+	+
Положение пластины на приемном подъемнике	Есть/нет	+	–
Наличие двух пластин	Есть/нет	+	–
Положение заслонки приемной камеры	Откр/закр	–	+
Положение заслонок рабочей камеры	Откр/закр	–	+
Положение входного манипулятора	Рабочее/останов.	–	+
Положение выходного манипулятора	Рабочее/останов.	–	+
Положение верхнего электрода	0–90±1мм	–	+

### Порядок выполнения работы (варианты 1, 2)

1. Ознакомиться с устройством установки LAM 490.
2. Получить по 3 образца контрольных пластин с нанесенными слоями нитрида кремния, окисла кремния, фоторезиста. С помощью спектрофотометра-толщиномера MPV-SP (микроинтерферометра «МИИ-4») измерить исходную толщину слоя каждого образца в пяти точках.
3. Ввести в ЭВМ параметры технологического процесса травления пленки нитрида кремния согласно индивидуальному заданию.
4. Под руководством преподавателя провести травление слоя нитрида кремния окисла кремния, фоторезиста.
5. Повторить пп. 2 и 3, используя другие технологические режимы процесса.
6. С помощью спектрофотометра-толщиномера MPV-SP (микроинтерферометра «МИИ-4») измерить конечную толщину слоя каждого образца в пяти точках.
7. Рассчитать скорость и равномерность травления для каждого образца.
8. Определить селективность травления слоя нитрида кремния по отношению к окислу кремния и фоторезисту.
9. Построить зависимости скорости, равномерности и селективности травления от изменения выбранного технологического режима.
10. Оформить отчет.

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Блок-схема установки «LAM 490».
4. Результаты измерения толщин слоев нитрида кремния, окисла кремния, фоторезиста.
5. Результаты расчетов скорости, равномерности и селективности травления и их зависимости от изменений технологических режимов.
6. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Ионное, ионно-плазменное и ионно-лучевое травление.
2. Плазмохимическое травление.
3. Ионно-плазменное травление.
4. Механизмы возникновения ионов и радикалов.
5. Примеры травления слоев металлов, полупроводников, диэлектриков.
6. Технологический процесс травления.

## Литература

1. Технология СБИС: в 2 кн. Кн. 2; пер. с англ. / К. Пирс [и др.] ; под ред. С. Зи. – М. : Мир, 1986. – 453с.
2. Айнспрук, Н. Плазменная технология в производстве СБИС: пер. с англ. ; под ред. Н. Айнспрука. – М. : Мир, 1987. – 496 с.
3. Достанко, А. П. Технология интегральных схем / А. П. Достанко. – Минск. : Выш. шк., 1982. – 206 с.
4. Готра, З. Ю. Технология микроэлектронных устройств: справочник / З. Ю. Готра. – М. : Радио и связь, 1991. – 528 с.
5. Курносов, А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А. И. Курносов, В. В. Юдин. – М. : Высш. шк., 1986. – 358 с.

*Учебное издание*

**Ануфриев Леонид Петрович**  
**Достанко Анатолий Павлович**  
**Касинский Николай Константинович и др.**

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА  
ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

**Лабораторный практикум**  
по дисциплинам

«Конструирование и технология изделий интегральной электроники»,  
«Физико-химические основы материалов и электронных компонентов»

для студентов специальностей  
«Проектирование и производство РЭС»,  
«Электронно-оптические системы и технологии»,  
«Электронные системы безопасности»

Редактор Т. Н. Крюкова

---

Подписано в печать 29.08.2011.  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 2,7

Формат 60x84 1/16.  
Отпечатано на ризографе.  
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 2,91.  
Заказ 130.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6