

Федеральное агентство по образованию

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

**Т.И. Данилина, Ю.В. Сахаров**

**Технология тонкопленочных микросхем**

Методические указания по выполнению лабораторных работ

для студентов специальности 210104

«Микроэлектроника и твердотельная электроника»

Томск 2007

**Т.И. Данилина Ю.В. Сахаров**

Технология тонкопленочных микросхем: Методические указания по выполнению лабораторных работ.- Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007.- 64 с.

© Т.И. Данилина, Сахаров Ю.В., 2007

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение	3
1. Осаждение резистивных и проводящих пленок	4
2. Технологический процесс фотолитографии	21
3. Изучение погрешности изготовления тонкопленочных резисторов	38
4. Изготовление и исследование тонкопленочных конденсаторов	47
5. Технология получения диффузионных $p - n$ переходов	54
Приложения	61

## Введение

Основными разделами дисциплины «Технология тонкопленочных микросхем», предусмотренной учебным планом для студентов специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника», являются:

- 1) Фотолитография и способы получения рисунка интегральных схем;
- 2) Получение тонких пленок методом термического испарения в вакууме;
- 3) Ионно-плазменное распыление;
- 4) Элементы тонкопленочных интегральных схем и другие области применения тонких пленок.

В соответствии с этим содержанием студенты выполняют следующие лабораторные работы:

- 1) Осаждение резистивных и проводящих пленок;
- 2) Технологический процесс фотолитографии;
- 3) Изучение погрешности изготовления тонкопленочных резисторов;
- 4) Изготовление и исследование тонкопленочных конденсаторов;
- 5) Технология получения диффузионных  $p - n$  переходов.

Целью цикла этих лабораторных работ является приобретение студентами практических навыков получения тонких пленок различными методами и освоение методов формирования рисунка элементов тонкопленочных микросхем. Лабораторные работы выполняются на реальном оборудовании (универсальные установки вакуумного напыления УВН-2М, установка совмещения и экспонирования, установка нанесения фоторезиста) с использованием современного измерительного оборудования (микроскопы стерео – МС-1, микроинтерферометр - МИИ-4М, растровый электронный микроскоп, измерители иммитанса Е7-20 и др.).

Данное учебно – методическое пособие может быть рекомендовано для выполнения лабораторных работ по курсу «Технология ЭВС-1» для студентов специальности 210202 «Проектирование и технология ЭВС»

## 1. Осаждение резистивных и проводящих пленок

### 1.1 Цель работы

Приобрести практические навыки напыления пленок методом термического испарения в вакууме и ионно-плазменным распылением. Освоить методику измерения удельного поверхностного сопротивления.

### 1.2 Описание вакуумной установки:

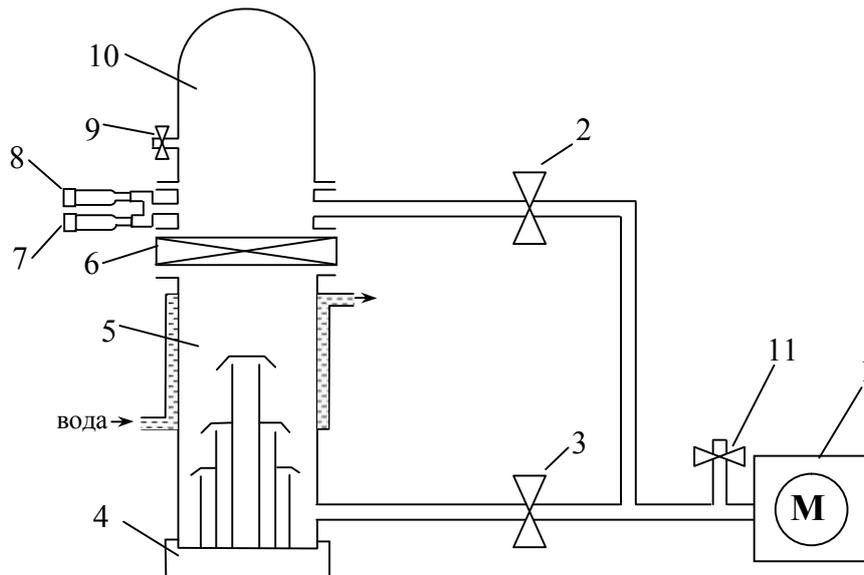


Рис. 1.1 – Схема вакуумной установки УВН-2М: 1- механический (форвакуумный) насос; 2 – вентиль вспомогательной линии откачки; 3 – вентиль основной линии откачки; 4 – нагреватель диффузионного насоса; 5 – диффузионный насос; 6 – вакуумный затвор; 7 – термопарный вакуумметр; 8 – ионизационный вакуумметр; 9 – натекатель; 10 – вакуумная камера (колпак); 11 – клапан.

Установка УВН-2М предназначена для откачки газа из вакуумной камеры 10 до предельного давления  $P=1 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. с целью напыления металлических и диэлектрических покрытий. Для достижения данного давления используется двухступенчатая система откачки, состоящая из механического насоса 1 и диффузионного насоса 5. Для коммутации насосов используются вентили 2, 3 и вакуумный затвор 6. Форвакуумный насос 1 типа ВН-461М предназначен для получения низкого вакуума до  $10^{-2}$  мм рт. ст. Высокий вакуум обеспечивается с помощью паромасляного диффузионного

насоса 5. Особенность работы диффузионного паромасляного насоса заключается в том, что перед его включением необходимо во всей системе создать вакуум ниже  $10^{-1}$  мм рт. ст., а во время его работы форвакуумный насос должен производить непрерывную откачку. Для нормальной работы диффузионный насос во время откачки охлаждается водой. Нагреватель насоса включается только после подачи воды. Клапан 11 применяется для напуска атмосферного воздуха в механический насос во время его остановки, чтобы предотвратить попадание рабочей жидкости форвакуумного насоса в высоковакуумный насос или в систему трубопроводов.

**ВНИМАНИЕ!** Неверная коммутация вентилей 2,3 и затвора 6 при откачке и развакуумировании вакуумной камеры, может привести к попаданию атмосферного воздуха в диффузионный насос при его работе. Это вызовет окисление вакуумного масла, находящегося в диффузионном насосе, и потере им вакуумных свойств. Поэтому важно соблюдать правильную последовательность управления вентилями 2, 3 и затвора 6 при работе с вакуумной установкой.

### **Включение вакуумной установки**

Исходное состояние: вентили 2,3 и затвор 4 закрыты, в рабочей камере остаточная атмосфера, питание установки отключено.

- 1) Включить водяное охлаждение диффузионного насоса. В надежности включения убедиться по интенсивности вытекания воды из сливного шланга.
- 2) Включить тумблер «СЕТЬ» на панели управления.
- 3) Проверить, что вентили 2,3 и затвор 6 перекрыты.
- 4) Тумблер «Форвакуумный насос» нажать в положение «вкл». Включение механического насоса сопровождается характерным жужжанием электродвигателя. Тумблер «Форвакуумный насос» имеет световую индикацию включения, расположенную над ним.
- 5) Открыть вентиль основной линии откачки 3.

- б) Тумблер «Диффузионный насос» нажать в положение «вкл». Тумблер «Диффузионный насос» имеет световую индикацию включения, расположенную над ним.

Время разогрева диффузионного насоса составляет около 30 мин.

### **Загрузка образцов и откачка вакуумной камеры**

- 1) Подготовить образцы для напыления и надежно закрепить их в подложкодержателе.
- 2) Проверить, что вакуумный затвор 6 полностью закрыт.
- 3) Натекателем 9 напустить воздух в вакуумную камеру 10, до полного прекращения шипения.
- 4) Поднять колпак 10 до упора и повернуть его по часовой стрелке на угол 30 - 90°.
- 5) Загрузить образцы в вакуумную камеру и надежно их закрепить на подвижной «карусели».
- 6) Убедиться в наличии испаряемого вещества на испарителе.
- 7) Опустить колпак.
- 8) Закрыть натекатель 9 до упора.
- 9) Закрыть вентиль основной линии откачки 3.
- 10) Открыть вентиль вспомогательной линии откачки 2. Откачать рабочий объем до давления ниже  $10^{-1}$  мм рт. ст. Контроль за давлением осуществлять по термомпарному вакуумметру 7. Данное давление отмечено красной чертой на шкале термомпарного вакуумметра. Время откачки по вспомогательной линии не должно превышать 20 минут.

Примечание: если планируется использовать ионно-плазменный метод распыления, то во время откачки по вспомогательной линии необходимо осуществить продувку капилляра рабочим газом. Для этого необходимо открыть баллон с рабочим газом и открыть вентиль подачи рабочего газа на 15-

20 секунд. Это исключит возможность присутствия в капилляре, по которому проходит рабочий газ, посторонних газов.

- 11) При достижении давления в рабочем объеме ниже  $10^{-1}$  мм рт. ст. (красная черта на шкале термодарного вакуумметра), закрыть вентиль вспомогательной линии откачки 2 и открыть вентиль основной линии откачки 3.
- 12) Через 5 – 10 секунд открыть затвор 6.
- 13) Откачать рабочий объем до «зашкаливания» термодарного вакуумметра (соответствует давлению  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.). Для дальнейшего измерения давления в рабочем объеме необходимо включить ионизационный вакуумметр 8.

#### **Порядок включения ионизационного вакуумметра**

- 1) Убедиться в то, что давление в рабочей камере ниже  $10^{-4}$  мм рт. ст. (термодарный вакуумметр зашкалил).
- 2) Включить тумблер «СЕТЬ» и тумблер «НАКАЛ» на приборе.
- 3) Переключатель «РОД РАБОТЫ» перевести в положение «НАГРЕВ» (крайнее левое положение переключателя). Прогреть ионизационный вакуумметр в течении 5-10 минут.
- 4) Переключатель «РОД РАБОТЫ» перевести в положение «ОБЕЗГАЗИВАНИЕ». 5-10 минут.
- 5) Переключатель «РОД РАБОТЫ» перевести в положение «УСТАНОВКА ЭМИССИИ». Вращением ручки-регулятора установки эмиссии, установить эмиссию на отметку 50 мкА по шкале прибора.
- 6) Переключатель «РОД РАБОТЫ» перевести в положение «ИЗМЕРЕНИЕ».
- 7) Вращением ручки-регулятора установки нуля, установить нуль на приборе.

- 8) Переключать переключатель «МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ» до появления показаний на приборе. Если отклонение стрелки менее 10 единиц на шкале прибора, то можно переключить на следующий предел.
- 9) Определить давление в вакуумной камере по формуле:

$$P \text{ (мм рт. ст.)} = \text{показание прибора} \cdot \text{множитель шкалы} \cdot 10^{-4}$$

### **Отключение ионизационного вакуумметра**

Ионизационный вакуумметр выключают при любых изменениях давления выше, чем  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. (развакуумирование рабочей камеры, напуск рабочего газа для ионно-плазменного распыления). Однако, перед подобными действиями, необходимо дать остыть ионизационной лампе в течении 5-10 мин. Ионизационный вакуумметр выключается в обратном порядке.

- 1) Переключатель «МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ» перевести в положение «УСТАНОВКА НУЛЯ» (исходное состояние, крайне левая позиция).
- 2) Переключатель «РОД РАБОТЫ» перевести в положение «УСТАНОВКА ЭМИССИИ». Вращением ручки-регулятора установки эмиссии, установить эмиссию на минимально возможное значение.
- 3) Отключить тумблер «НАКАЛ» и тумблер «СЕТЬ»
- 4) Дать прибору остыть в течении 5-10 минут.

При достижении технологического вакуума порядка  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. можно производить напыление пленок методом термического испарения в вакууме и ионно-плазменным распылением.

### **1.3 Методика напыления пленок методом термического испарения в вакууме.**

Метод термического испарения в вакууме возможен, если температура испарения вещества ниже  $1500$  °С. Методом термического испарения в вакууме напыляют следующие материалы: Cu, Al, Au, Ag, Ni, In. Методика термического напыления:

- 1) Включить охлаждения токовводов. Переключить переключатель в положение «ХОЛ. ВОДА» на панели управления.
- 2) Включить тумблер «ИСПАРИТЕЛЬ».
- 3) Плавно подать ток на испаритель, вращая ручку «ТОК ИСПАРИТЕЛЯ» на панели управления. Ток через испаритель контролируется стрелочным прибором «ТОК ИСПАРИТЕЛЯ», расположенным над ручкой-регулятором. Ток подается очень плавно с шагом 2-4 Ампер до начала разогрева испарителя. При этом необходимо помнить, что процесс разогрева инерционен и требует некоторого времени. Ток, при котором испаритель полностью разогревается, зависит от материала и формы испарителя (20-50 А).
- 4) После начала испарения вещества, установить подложку над испарителем и осуществить напыление в течении требуемого времени. Затем отвести подложку в сторону.
- 5) Снизить ток испарителя до нуля.
- 6) Отключить тумблер «ИСПАРИТЕЛЬ».
- 7) Через 2-3 минуты отключить охлаждение токовводов. Переключить тумблер «ХОЛ. ВОДА» в среднее (исходное) положение.

После отключения испарителя он должен остыть в течении 5-10 минут в условиях высокого вакуума. Развакуумирование вакуумной камеры и извлечение образцов возможно только через данное время.

#### **1.4 Методика напыления пленок методом ионно-плазменного распыления**

Методом ионно-плазменного распыления напыляют тугоплавкие материалы (Ta, Ti, Mo, W). Также данный метод подходит для распыления легкоплавких материалов (Cu, Al, Au, Ag, Ni, In) и многокомпонентных сплавов. Методика ионно-плазменного распыления:

- 1) Включить охлаждения магнетрона. Переключить переключатель в положение «ХОЛ. ВОДА» на панели управления.

- 2) Включить тумблер «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ» на панели управления.
- 3) Включить тумблер «СЕТЬ» на блоке питания.
- 4) Подать напряжение на магнетрон 500 В.
- 5) Вращением вентиля подачи рабочего газа установить давление в рабочей камере  $(4 - 8) \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. Вентиль вращать очень медленно с кратковременными перерывами 15-20 с. Род рабочего газа зависит от напыляемого материала. При напылении металлов используют инертные газы (Ar, He, H<sub>2</sub>). При напылении диэлектриков используют кислород или азот (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>).
- 6) Произвести «тренировку» мишени. Тренировка заключается в распылении материала мишени в течение 3-5 минут при отведенной подложке. При тренировке разрушается окисел на поверхности распыляемой мишени. Иногда, при тренировке используют кратковременное повышение тока до предельных значений для разрушения прочных окислов (оксид алюминия).
- 7) Установить рабочий ток магнетрона.
- 8) Установить подложку в рабочее положение и осуществить напыление в течении требуемого времени. Затем отвести подложку в сторону.
- 9) Уменьшить напряжение на блоке питания до минимума. Отключить тумблер «СЕТЬ» на блоке питания, отключить тумблер «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ» на панели управления.
- 10) Закрыть вентиль подачи рабочего газа.
- 11) Через 2-3 минуты отключить охлаждение магнетрона. Переключить тумблер «ХОЛ. ВОДА» в среднее (исходное) положение.

После любого напыления, производимого в рабочей камере, развакуумировать установку можно только через 5-10 минут. Это время требуется для откачки насосом паров распыленных материалов.

## **Развакуумирование рабочего объема и извлечение образцов**

- 1) Закрывать затвор *б*.
- 2) Открыть натекаатель *9* для напуска воздуха в рабочий объем.
- 3) Поднять колпак *10* до упора и повернуть его по часовой стрелке на угол 30 - 90°.
- 4) Извлечь образцы.
- 5) Опустить колпак.

## **Отключение вакуумной установки**

- 1) Откачать рабочий объем.
- 2) Закрывать затвор *б*.
- 3) Отключить тумблер «Диффузионный насос». Время остывания диффузионного насоса составляет 30-40 минут.
- 4) Через 30-40 минут после отключения диффузионного насоса, закрыть вентиль основной линии откачки *3*.
- 5) Отключить тумблер «Механический насос».
- 6) Напустить воздух в механический насос, открыв клапан *11*.
- 7) Отключить водяное охлаждение диффузионного насоса.
- 8) Отключить тумблер «СЕТЬ» на панели управления.
- 9) Отключить центральный рубильник.

## **1.5 Краткие теоретические сведения**

### **1.5.1 Термическое испарение в вакууме**

Суть метода заключается в нагреве вещества до температуры испарения, его испарении и последующей конденсации в вакууме на подложке. Получение пленок возможно только при низких давлениях в вакуумных установках.

В условиях высокого вакуума материал, помещенный в испаритель, разогревается и испаряется, в результате чего молекулы вещества движутся к подложке, где они конденсируются, образуя пленку. Процесс осуществляется

внутри камеры, связанной с непрерывно работающей системой откачки воздуха.

Для осуществления процесса термического испарения в вакууме необходимо обеспечить следующие основные условия: достаточно интенсивное испарение материала, направленный молекулярный поток к подложке и конденсацию пара на подложке.

Уже при давлении  $p_2 = 10^{-4}$  мм рт. ст. средняя длина свободного пробега молекул испаряемого вещества составляет 50 см, что превышает реальное расстояние от испарителя до подложки (обычно не более 20 см).

Таким образом, для создания прямолинейных траекторий движения молекул вещества в пространстве между испарителем и подложкой необходимо давление остаточного газа порядка  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  мм рт. ст.

Давление пара испаряемого вещества  $p_s$ , соответствующее равновесному состоянию системы, называется давлением насыщенного пара или его упругостью. Практика показывает, что процессы осаждения происходят с достаточной для производства скоростью, если упругость пара вещества составляет 1,33 Па и более. Температура вещества, при которой  $p_s = 1,33$  Па, называется условной температурой испарения.

Скорость испарения  $W_u$ , т.е. количество вещества, покидающее единицу поверхности испарителя в единицу времени, определяется:

$$W_u = p_s \sqrt{\frac{m}{2\pi k T_u}},$$

где  $p_s$  - давление насыщенного пара, Па;

$m$  - масса молекулы, кг;

$k$  - постоянная Больцмана, Дж/К;

$T_u$  - температура испарения, К.

Скорость конденсации  $W_{\kappa}$ , т.е. количество вещества, достигающее поверхности подложки, будет зависеть от конфигурации испарителя и подложки. На практике определяют скорость  $W_{\kappa}$ , как скорость нарастания толщины пленки  $d$  за время  $t$ :

$$W_{\kappa} = \frac{d}{t}$$

На плоской подложке, расположенной параллельно поверхности испарителя, скорость конденсации при испарении из поверхностного испарителя малой площади определяется (рис. 1.2):

$$W_{\kappa} = \frac{W_u dS_1}{\pi\gamma} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^2}.$$

Для точечного испарителя

$$W_{\kappa} = \frac{W_u dS_1}{4\pi\gamma} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^{3/2}},$$

где  $W_u$  - скорость испарения,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ ;

$dS_1$  - площадь испарителя,  $\text{м}^2$ ;

$\gamma$  - плотность испаряемого вещества,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$x, y$  - координаты точки, в которой определяется  $W_{\kappa}$ , м;

$h$  - расстояние от испарителя до подложки, м.

Методом термического испарения в вакууме получают пленки таких материалов, которые имеют температуру испарения не более 1500 – 1600 °С и не диссоциируют (или разлагаются) при испарении. Можно получать проводящие и резистивные пленки на основе металлов (алюминий Al, хром Cr), сплавов (нихром, РС, МЛТ), керметов. Однако следует помнить, что свойства пленки сильно зависят от конкретных режимов напыления.

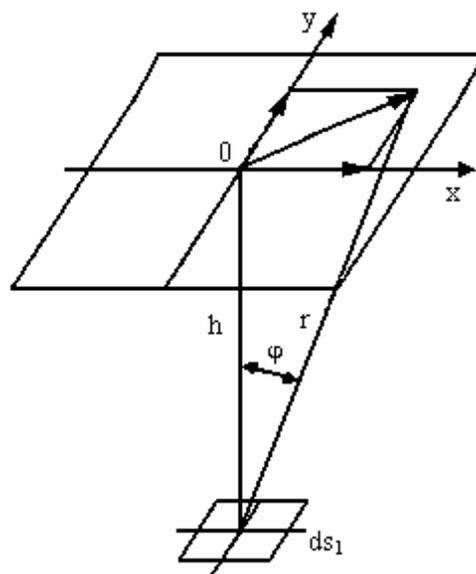


Рис. 1.2 – Испарение с малой площадки  $ds_1$  на параллельную ей плоскую поверхность

Одним из важнейших параметров проводящих и резистивных пленок является удельное поверхностное сопротивление  $\rho_s$

$$\rho_s = \frac{\rho_v}{d},$$

где  $\rho_v$  - удельное объемное сопротивление пленки, Ом·м;

$d$  - толщина пленки, м.

При осаждении пленок стремятся обеспечить требуемое значение  $\rho_s$  с заданным разбросом этой величины по подложке. Воспроизводимость  $\rho_s$  будет зависеть от воспроизводимости свойств пленок и их толщины. Удельное объемное сопротивление пленок  $\rho_v$  для данного материала будет определяться структурой и составом пленок. Факторами, влияющие на эти параметры, является скорость конденсации, т.е. плотность потока паров вещества на подложку, температура подложки, давление остаточных газов и др. Например, минимальное удельное сопротивление пленок хрома получается при температуре подложки 200-300 °С при толщине пленок 100-200 нм. Этот минимум соответствует максимальному размеру зерен около 20-25 нм. Большое сопротивление при малых скоростях напыления и низких температурах подложки связано, по-видимому, с адсорбцией газовых примесей

из вакуумного объема и образованием химических соединений, например, окислов хрома. Увеличение сопротивления при очень больших скоростях осаждения и высокой температуре подложки коррелирует с имеющим место при этих условиях изменением структуры пленок.

### 1.5.2 Ионно-плазменное распыление

Ионно-плазменное распыление - это процесс распыления мишени, выполненной из требуемого материала, высокоэнергетическими ионами инертных газов. Распыленные ионами атомы материала мишени, осаждаясь на подложке, формируют пленку материала. Ионно-плазменное распыление можно реализовать путем распыления материала катода в плазме газового разряда ионизированными молекулами разряженного газа (катодное распыление) либо путем распыления мишени в высоком вакууме сформированным пучком ионов (ионное распыление).

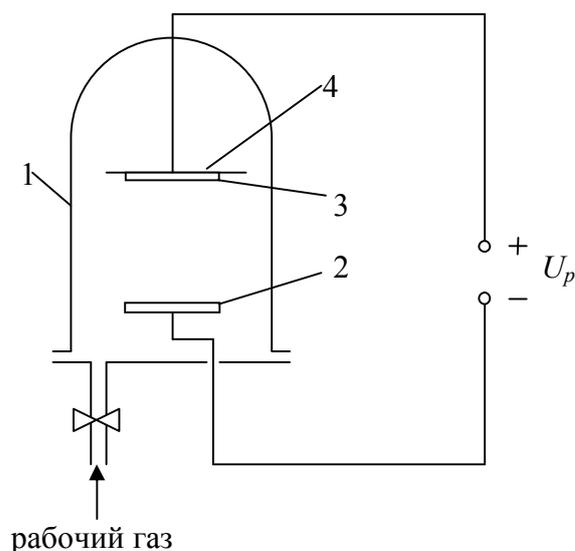


Рис. 1.3 – Схема ионно-плазменного распыления: 1 – вакуумная камера; 2 – катод; 3 – подложка; 4 – анод.

Распыление ионной бомбардировкой, как и испарение в вакууме, позволяет получать проводящие, резистивные, диэлектрические, полупроводниковые и магнитные пленки, но, по сравнению с термическим вакуумным напылением, имеет ряд преимуществ.

Катодное распыление основано на явлении разрушения катода при бомбардировке его ионизированными молекулами разряженного газа. Атомы, вылетающие с поверхности катода при его разрушении, распространяются в окружающем пространстве и осаждаются на приемной поверхности, которой является подложка. Схема процесса катодного распыления изображена на рис. 1.3 В рабочей камере 1 установлена двухэлектродная система, состоящая из «холодного» катода 2, изготовленного из материала, подвергаемого распылению, и анода 4, на котором располагается подложка 3. Из рабочей камеры откачивается воздух, после чего в камеру напускается рабочий газ, давление которого устанавливается равным  $10^{-2} - 10^{-3}$  мм рт. ст.

Затем между катодом и анодом подается высокое напряжение, порядка нескольких сотен вольт, которое приводит к ионизации рабочего газа и появлению плазмы.

Получение чистых пленок полупроводников, металлов, сплавов и соединений реализуется путем распыления соответствующих мишеней в инертном газе, чаще всего в аргоне. Для реализации ионного распыления вакуумная установка предварительно откачивается до высокого вакуума ( $10^{-4} - 10^{-6}$ ) мм рт. ст., затем напускается аргон до рабочего давления, при котором можно зажечь разряд. В диодных системах распыления (см. рис. 1.3) разряд поддерживается при требуемых параметрах разряда  $U_p$  и токе разряда. Ионы аргона, ускоренные катодным падением потенциала, близким к  $U_p$ , бомбардируют поверхность катода. Катод выполняется из распыляемого материала или изготавливается специальная мишень. Энергию ионов можно приблизительно считать равной  $U_p$ . Разрядный ток определяет количество ионов, падающих на мишень, а следовательно, и скорость распыления. Ионное распыление рекомендуется для получения пленок тугоплавких металлов вольфрама, молибдена, тантала, рения, циркония и др. Этот метод широко используется для получения пленок алюминия с добавкой кремния для металлизации в технологии полупроводниковых интегральных схем.

Для осаждения пленок сплавов метод ионного распыления имеет ряд преимуществ перед методом термического испарения. Химический состав напыленных пленок обычно соответствует составу катода-мишени даже в том случае, если компоненты сплава характеризуются различными коэффициентами распыления. Это объясняется тем, что спустя некоторое время после того, как компонент с наибольшей скоростью распыления покинет катод, поверхность катода обогащается другим компонентом до тех пор, пока не установится «стационарный» состав поверхности. По достижении этого состояния напыленная пленка будет иметь тот же состав, что и катод. Иначе обстоит дело при испарении: из-за высокой температуры испарения вещество из внутренних участков быстро диффундирует к поверхности. Если бы при распылении температура катода повысилась настолько, что диффузия из объема стала бы значительной, то напыленные пленки по составу отличались бы от катода.

При распылении сложных соединений не происходит диссоциации, что позволяет получать пленки стехиометрического состава. Этим способом получены пленки таких составов, как InSb, GeSb, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, PbTe и др. с хорошей стехиометрией.

Ионно-плазменное распыление характеризуется коэффициентом распыления  $S$ :

$$S = \frac{N_a}{N_u},$$

где  $N_a$  - число выбитых атомов;

$N_u$  - число падающих ионов.

Коэффициент распыления является функцией энергии ионов, его массы, свойств материала мишени и др.

Скорость распыления определяется  $S$ , количеством бомбардирующих ионов  $N_u$  и плотностью материала мишени  $N_0$ :

$$V_p = \frac{N_u \cdot S}{N_0};$$

Величина  $N_u$  зависит от плотности ионного тока  $j$  на мишени:

$$N_u = \frac{j}{n \cdot e},$$

где  $j$  – плотность ионного тока,  $A/m^2$ ;

$n$  – кратность заряда иона;

$e$  – заряд электрона, Кл.

Скорость осаждения пленок на подложке определяется скоростью распыления, расстоянием от мишени до подложки, конфигурацией электродов.

С другой стороны, скорости осаждения  $V_{oc}$  – это:

$$V_{oc} = \frac{d}{t}, [m/c],$$

где  $d$  – толщина пленки;

$t$  – время напыления.

Время напыления пленок будет определяться параметрами, от которых зависит скорость осаждения, а именно коэффициентом распыления, плотностью ионного тока и геометрическими размерами. Коэффициент распыления для данной комбинации ион – мишень является однозначной функцией энергии ионов, т.е. для ионно-плазменного распыления напряжения разряда  $U_p$ . Плотность ионного тока зависит от разрядного тока  $I_p$ .

Управлять временами напыления пленок можно с помощью напряжения и тока разряда при неизменных геометрических параметрах.

Распыление с разделением камеры формирования разряда и камеры осаждения пленок служит для получения чистых пленок для нужд микроэлектроники.

## 1.6 Измерение удельного сопротивления

Для измерения удельного поверхностного сопротивления  $\rho_s$  широкое распространение получил четырехзондовый способ. Размещение зондов показано на рис. 1.4.

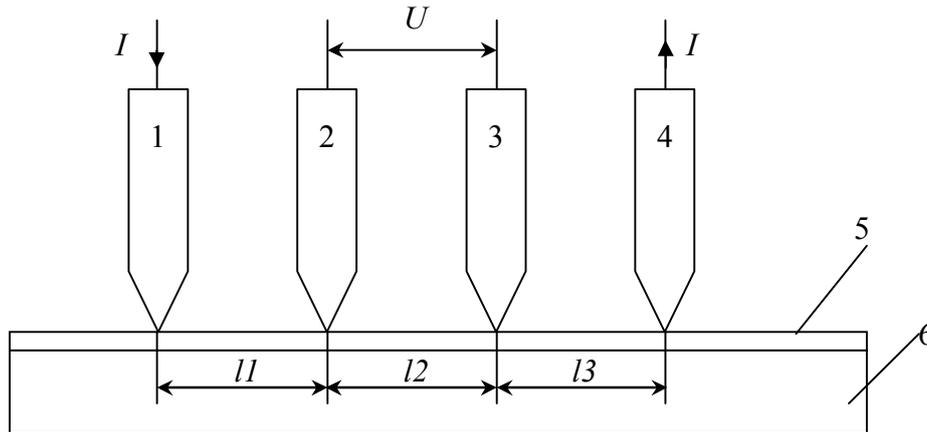


Рис. 1.4 – Зондовый метод определения удельного сопротивления:  
1–4 – зонды; 5 – пленка; 6 – подложка.

При размещении зондов в линию на материале полубесконечного объема при  $l1=l2=l3=l$  объемное удельное сопротивление  $\rho_v$  выражается равенством:

$$\rho_v = U \frac{2\pi \cdot l}{I} \quad (1.1)$$

Если материал, на который устанавливается зонд, представляет собой бесконечно тонкую пластину, укрепленную на изолирующей подложке то уравнение примет следующий вид:

$$\rho_v = \frac{U \cdot d \cdot \pi}{\ln 2 \cdot I} \quad (1.2)$$

или

$$\rho_s = \frac{\rho_v}{d} = 4,532 \frac{U}{I}, \quad (1.3)$$

где  $d$  – толщина пленки.

### 1.7 Задание на работу

- 1) Составить технологический маршрут в соответствии с заданным методом напыления и напыляемым материалом.
- 2) Произвести напыление резистивных и проводящих пленок.
- 3) Измерить удельное поверхностное сопротивление и определить разброс этой величины по подложке. Оценить факторы, влияющие на удельное поверхностное сопротивление напыленных пленок.
- 4) Определить толщину напыленных пленок  $d$  и рассчитать объемное удельное сопротивление  $\rho_v$
- 5) Сравнить полученное значение  $\rho_v$  для тонкой пленки с  $\rho_v$  для массивного материала, взятое из справочника или определенное экспериментальным путем.

#### Литература:

1. Данилина Т.И. Технология тонкопленочных микросхем. Учебное пособие. — Томск: 2007. — 151 с.
2. Технология тонких пленок. Т.1/ Под ред. Майссела, Р. Глэнга; Пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. —М.: Сов радио, 1977. - 664 с.

## 2 Технологический процесс фотолитографии

### 2.1 Цель работы

Изучить технологический процесс фотолитографии при контактном экспонировании. Оценить влияние толщины фоторезиста на параметры и разрешающую способность литографического процесса.

### 2.2 Краткие теоретические сведения.

#### 2.2.1 Фотолитография

Получение рельефа требуемой конфигурации в диэлектрических и металлических пленках, нанесенных на поверхность полупроводниковых или диэлектрических подложек, является неотъемлемым процессом технологии изготовления интегральных схем (ИС). Он получил название **литографии**. Литография основана на использовании особых высокомолекулярных соединений - резистов, обладающих способностью изменять свои свойства под действием различного рода излучений - ультрафиолетового (фотолитография), рентгеновского (рентгенолитография), потока электронов (электронолитография) и ионов (ионно-лучевая литография).

**Фотолитография** состоит в следующем. Чувствительные к свету соединения **фоторезисты** (ФР) наносятся на поверхность подложки и подвергаются воздействию излучения (**экспонируются**). Использование специальной стеклянной маски с прозрачными и непрозрачными полями **фотошаблона** (ФС) приводит к локальному воздействию излучения на ФР и, следовательно, к локальному изменению его свойств. При последующем воздействии определенных химикатов происходит удаление с подложки отдельных участков пленки ФР, освещенных или неосвещенных в зависимости от типа ФР (**проявление**). Создается защитная маска с рисунком, повторяющим рисунок фотошаблона. Резисты могут быть как негативными, так и позитивными. После воздействия экспонирующего облучения растворимость негативных резистов в проявителе уменьшается, а позитивных увеличивается.

Фоторезисты - это светочувствительные материалы с изменяющейся под действием света растворимостью. Фоторезисты обычно состоят из трех компонентов:

- светочувствительных веществ;
- пленкообразующих веществ;
- растворителей.

В **негативных** ФР под действием света протекает реакция фотоприсоединения (фотополимеризации). При **фотополимеризации** происходит поперечная сшивка молекул полимера, в результате чего они укрупняются, становятся трехмерными, и их химическая стойкость возрастает. В негативных ФР на основе поливинилциннаматов (ПВЦ) полимерной основой является эфир поливинилового спирта, с молекулами которого связана коричная кислота, представляющая собой светочувствительный компонент (циннамоильная группа).

В **позитивных** ФР под действием света образуются растворимые соединения (**фоторазложение**). Для осуществления этой задачи удобно использовать смеси нафтохинондиазидов (НХД) с фенолформальдегидными смолами в органических растворителях. Светочувствительной основой является НХД, а смола играет роль химически стойкого полимера. В результате облучения и разрыва связей образуется инденкарбоновая кислота. Для завершения деструкции и перевода кислоты в растворимую соль необходимо воздействовать на нее проявителем со щелочными свойствами. При этом проявитель должен растворять и полимерную основу. Необлученные молекулы НХД затрудняют, но не исключают полностью растворение основы в щелочных растворителях на неэкспонированных участках.

Для позитивного фоторезиста важно, чтобы время проявления облученных участков в щелочном растворе было минимальным. Поскольку скорость растворения облученных участков зависит от концентрации образующейся при фотолизе инденкарбоновой кислоты, зависимость  $V_{np}$  от

экспозиции позволяет оценить чувствительность фоторезиста. Она определяется при  $H_2$ , когда скорость проявления достигает максимума  $S_0 = 1/H_2$  (рис. 2.1).

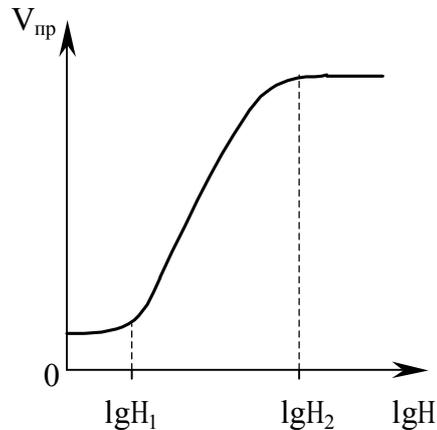


Рис. 2.1 – Зависимость скорости проявления позитивного ФР от экспозиции

Таким образом, критерием светочувствительности **негативного** ФР является образование после экспонирования и проявления на поверхности подложки локальных полимеризованных участков - рельефа рисунка. Критерием  $S_0$  позитивного ФР является полнота разрушения и удаления с поверхности подложки локальных участков слоя ФР после экспонирования и проявления и образование рельефа рисунка.

**Разрешающая способность** характеризует способность ФР к созданию рельефа рисунка с минимальными размерами элементов. Разрешающая способность  $R$  определяется числом линий равной ширины, разделенных промежутками такой же ширины и уместяющихся в одном миллиметре. Разрешающая способность определяется путем экспонирования ФР через штриховую маску, которую используют в качестве ФШ. После проявления выделяется участок с различимыми штрихами наименьшей ширины. Разрешающая способность ФР и процесса ФЛ в целом с уменьшением толщины слоя ФР увеличивается (рис.2.2). Однако нижний предел толщины слоя ФР обусловлен снижением защитной способности таких слоев. При  $d < 0,2$  мкм возрастает растравливание слоя за счет дефектов пленки на операции

проявления. Разрешающая способность для негативных ФР составляет 300 линий/мм, для позитивных ФР она выше - 1500-2000 линий/мм.

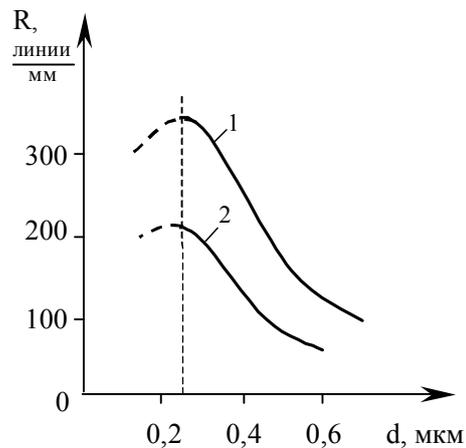


Рис. 2.2 – Зависимость разрешающей способности негативного фоторезиста (1) и фотолитографического процесса в целом (2) от толщины фоторезиста

**Химическая стойкость** - это способность слоя ФР защищать поверхность подложки от воздействия травителя. Критерием стойкости является время, в течение которого ФР выдерживает действие травителя до момента появления таких дефектов, как частичное разрушение, отслаивание от подложки, локальное точечное растравливание слоя или подтравливание его на границе с подложкой. Стойкость ФР к химическим воздействиям зависит от типа ФР, его толщины и др. Поэтому стойкость ФР оценивают величиной бокового подтравивания  $l$  (рис.2.3). Чем меньше боковое подтравливание  $l$  при заданной глубине травления, тем выше стойкость фоторезиста к травителю.

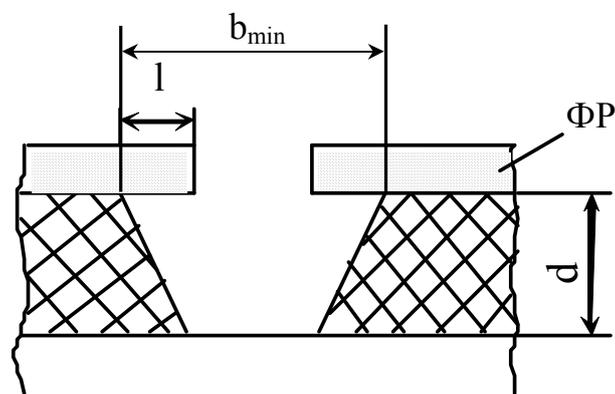


Рис. 2.3 – Боковой подтрав в слое рабочего материала

На практике разрешающую способность оценивают по минимальному размеру линии (окна) в слое резиста или в слое рабочего материала.

**Выбор толщины фоторезиста** делается, исходя из следующих соображений. Практикой установлено, что **толщина ФР должна быть в 3-4 раза меньше минимального размера** рисунка элементов. С другой стороны, толщина ФР должна быть достаточной, чтобы противостоять действию травителей (кислот и щелочей) и перекрывать локальные дефекты. Таким образом, выбор толщины ФР обусловлен компромиссом между требованием достаточной разрешающей способности и адгезии, с одной стороны, и защитными свойствами, с другой. Обычно толщину ФР выбирают в пределах 0,5-1,5 мкм.

### **2.2.2 Способы экспонирования**

В оптической литографии используется три способа:

- **контактная** фотолитография;
- **бесконтактная** или фотолитография с зазором;
- **проекторная** фотолитография.

При контактной фотолитографии фотошаблон находится в непосредственном контакте со слоем ФР на подложке (рис. 2.4). Для засветки ФР через ФШ используется источник света с требуемой длиной волны.

Конденсорная линза (конденсор) служит для создания равномерного светового потока. Затвор задает дозу экспонирования. На некотором расстоянии от источника света размещается подложка с фотошаблоном. За счет плотного контакта достигаются высокие разрешения. Технологически между ФШ и подложкой будет зазор, обусловленный толщиной ФР, наличием неровностей на подложке, искривлением подложки и др. Кроме того разрешение зависит от свойств ФР.

Основной недостаток контактной ФЛ состоит в изнашивании ФШ при его многократном использовании. Плотное соприкосновение ФШ с подложкой приводит к возникновению дефектов на соприкасающихся поверхностях как

шаблона, так и резиста. Накопление дефектов и частиц ФР, прилипающих к ФШ, приводит к его быстрому износу.

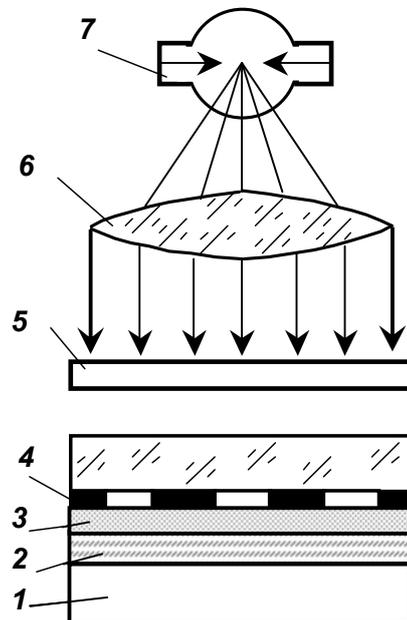


Рис. 2.4 – Схема контактной фотолитографии

1 - предметный столик; 2- подложка; 3 - слой фоторезиста;  
4 - фотошаблон; 5 - затвор; 6 - конденсор; 7 - источник света.

В **бесконтактной** ФЛ во время экспонирования между подложкой и ФШ поддерживается небольшой зазор 10-40 мкм. Этот зазор уменьшает (но не устраняет) возможность повреждения поверхности шаблона. При наличии зазора дифракция света уменьшает разрешающую способность и одновременно ухудшает четкость изображения. Степень этих негативных явлений зависит от величины зазора между ФШ и подложкой, который может быть неодинаковым вдоль пластины. При малых зазорах основным источником искажений являются неровности поверхности подложки (пластины), при больших - эффекты дифракции. Процесс переноса изображения осуществляется в дифракционной области, разрешение в которой определяется как

$$b_{\min} = \sqrt{\lambda h},$$

где  $b_{\min}$  -минимальная ширина линии;

$h$  - величина зазора.

**Проекционная** фотолитография заключается в проектировании изображения ФШ на подложку, покрытую ФР, с помощью проекционного объектива (рис. 2.5).

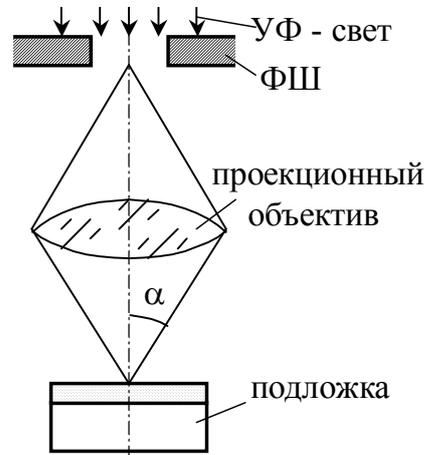


Рис. 2.5 – Перенос изображения в проекционной ФЛ

Качество проекционного объектива характеризует такой параметр, как числовая апертура

$$NA = n \cdot \sin \alpha ,$$

где  $n$  - коэффициент преломления среды в пространстве изображения (для воздуха  $n \approx 1$ );

$\alpha$  - половина максимального угла расходимости лучей, приходящих в точку изображения на оптической оси проекционной системы.

Разрешающая способность (минимальный передаваемый размер элемента) определяется длиной волны излучения и числовой апертурой проекционного объектива

$$b_{\min} = K_1 \cdot \lambda / (NA),$$

где  $K_1$  - технологический фактор.

Числовой коэффициент  $K_1$  зависит от параметров оптической системы, а также от свойств ФР, режимов его обработки и др. Желательно, чтобы  $K_1$  был

по возможности меньшим. Если сделать  $K_1 < NA$ , то  $b_{\min} \approx \lambda$ . Однако это трудно достижимо. Чаще всего для систем с дифракционными ограничениями  $K_1 = 0,6-0,8$ . Чем больше числовая апертура объектива, тем выше его разрешающая способность.

Важным параметром проекционной системы является глубина резкости  $\Delta f$ , определяемая как

$$\Delta f = \pm \lambda / (NA)^2.$$

Для компенсации aberrаций оптической системы, искривления поверхности подложек и изменения толщины слоя ФР необходима наибольшая глубина резкости. Глубина резкости оптической системы должна превышать  $\pm 5$  мкм. Это ограничивает апертуру линз и, следовательно, разрешающую способность метода. Для повышения разрешающей способности необходимо уменьшить  $\lambda$ , что, однако, затруднительно из-за возрастания коэффициента поглощения оптических стекол. Обычно в проекционных системах используют монохроматичное излучение с  $\lambda = 400-440$  нм.

### 2.2.3 Этапы фотолитографического процесса

Фотолитографический процесс состоит из следующих этапов:

- осаждение пленки рабочего материала;
- нанесение ФР;
- первая сушка;
- совмещение и экспонирование;
- проявление ФР;
- вторая сушка (задубливание)
- травление пленок;
- удаление ФР;
- контроль качества ФЛ.

Качество процесса ФЛ во многом определяется механическим и физико-химическим состоянием поверхности подложек. Механическое состояние поверхности подложек влияет на точность получения элементов рисунка,

поэтому любые неровности, микробугорки, впадины, царапины и риски приводят к их искажению. Кроме того, при нанесении слоя ФР эти дефекты вызывают появление пузырьков или проколов в слое ФР.

Физико-химическое состояние поверхности подложек влияет на ее смачиваемость и адгезию ФР. Поэтому на рабочих поверхностях подложек не должно быть инородных частиц, а также адсорбированных атомов и ионов жидкостей и газов.

Нанесенный на предварительно подготовленную поверхность подложек слой ФР должен быть однородным по толщине по всему их полю, без проколов, царапин (т.е. быть сплошным) и иметь хорошую адгезию. **Для нанесения слоя ФР чаще всего используют метод центрифугирования.** При этом методе на подложку, которая устанавливается на столике центрифуги и удерживается на нем вакуумным присосом, фоторезист подается капельницей — дозатором. Когда столик приводится во вращение, фоторезист растекается тонким слоем по поверхности подложки. Прилегающий к подложке граничный слой формируется за счет уравнивания центробежной силы, пропорциональной числу оборотов, и силы сопротивления, зависящей от когезии молекул резиста. Когезия характеризуется вязкостью фоторезиста, так что толщина слоя  $d_{ФР}$  прямо пропорциональна вязкости  $\nu$  и обратно пропорциональна числу оборотов центрифуги  $\omega$

$$d_{ФР} = A\sqrt{\nu/\omega},$$

где  $A$  — коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально.

Вязкость фоторезиста составляет 0,02–0,05 см/с, число оборотов центрифуги — от 2000 до 10000 об/мин. Используя метод центрифугирования, можно в зависимости от вязкости ФР регулировать толщину его слоя от 0,4 до 3,5 мкм, изменяя частоту вращения центрифуги от 1500 до 8000 об/мин. При малых скоростях центрифугирования слой ФР получается неровным и наблюдается его утолщение по краям подложки. Выбирая толщину слоя ФР,

необходимо учитывать, что он должен обладать высокой разрешающей способностью (чем меньше толщина, тем выше разрешающая способность) и не терять стойкости к травителю. Кроме того, слой фоторезиста не должен иметь дефектов в виде проколов, количество которых с уменьшением толщины увеличивается. Следовательно, толщина слоя ФР должна быть наименьшей, но достаточной для обеспечения его стойкости к травителю и обеспечивать малую дефектность.

Для окончательного удаления растворителя из слоя ФР его просушивают. При этом уплотняется молекулярная структура слоя, уменьшаются внутренние напряжения и повышается адгезия к подложке. Неполное удаление растворителя из слоя ФР снижает его кислотостойкость. Для удаления растворителя подложки нагревают до температуры, примерно равной 100 °С. Большое значение при сушке имеет механизм подвода теплоты. Существуют три метода сушки ФР: конвекционный, инфракрасный и в СВЧ-поле.

При **конвективной сушке** подложки выдерживают в термокамере при 90–100 °С в течение 15–30 мин. Недостаток этого метода — низкое качество ФР-слоя.

При **инфракрасной сушке** источником теплоты является сама подложка, поглощающая ИК-излучение от специальной лампы. Так как «фронт сушки» перемещается от подложки к поверхности слоя ФР, качество сушки по сравнению с конвективной существенно выше, а время сокращается до 5–10 мин.

При **СВЧ-сушке** подложки нагреваются, поглощая электромагнитную энергию СВЧ-поля. Время сушки — несколько секунд. Достоинством этого метода является высокая производительность, а недостатками — сложность оборудования, а также неравномерность сушки слоя ФР.

При любом методе сушки ее режимы (время, температура) должны исключать появление структурных изменений в слое фоторезиста.

При нанесении слоя ФР могут появиться различные **виды брака**. Плохая адгезия ФР к подложке вызывает при последующем травлении растравливание

и искажение рисунков элементов. Причиной плохой адгезии является некачественная подготовка поверхности подложек. Локальные неоднородности рельефа слоя ФР, имеющие вид капелек, обусловлены попаданием пылинок на подложки или присутствием посторонних частиц в фоторезисте. Микродефекты (проколы) слоя ФР связаны с теми же причинами, что и локальные неоднородности.

Точность полученного в процессе фотолитографии топологического рисунка в первую очередь определяется процессом совмещения и экспонирования. **Передача изображения с фотошаблона на подложку должна выполняться с точностью 10 % от минимального размера элемента.** Поэтому процессы совмещения и экспонирования проводят одновременно на одной установке. Перед экспонированием слоя ФР фотошаблон следует правильно сориентировать относительно подложки и рисунка предыдущего слоя. Для полного формирования структуры ИМС необходим комплект ФШ со строго согласованными топологическими рисунками элементов. При первой фотолитографии, когда поверхность подложки еще не имеет рисунка, фотошаблон ориентируют относительно базового среза подложки. При последующих ФЛ, когда на подложках сформированы топологические слои, рисунок ФШ ориентируют относительно рисунка предыдущего слоя. Совмещают рисунки ФШ и подложки по специальным знакам — фигурам совмещения, предусмотренным в рисунке каждого топологического слоя. Существуют два метода совмещения ФШ с подложками:

- визуальный, при котором, выполняя совмещение, наблюдают за контрольными отметками в микроскоп; при этом точность совмещения составляет 0,25–1,0 мкм и зависит от возможностей установки;
- автоматизированный фотоэлектрический, обеспечивающий точность совмещения 0,1–0,3 мкм.

Процедура совмещения осуществляется с помощью механизма совмещения микроизображений. Основными элементами этого механизма

являются предметный шаровой столик со сферическим основанием-гнездом, рамка для закрепления ФШ и устройства перемещения рамки и поворота предметного столика. Подложку размещают на предметном столике так, чтобы слой ФР был сверху, и закрепляют ФШ в подвижной рамке над поверхностью подложки. Между подложкой и ФШ должен быть зазор для свободного перемещения рамки при совмещении знаков.

После выполнения совмещения подложку прижимают к ФШ и экспонируют слой ФР. Обеспечить идеальный контакт и отсутствие локальных зазоров по большим площадям практически невозможно. Зазор при контактировании двух поверхностей носит случайный характер и обусловлен неплоскостностью подложки, изгибом подложки при термообработках, наличием нижележащего микрорельефа и др. Этот зазор может колебаться в диапазоне 5–20 мкм. Наличие зазора ухудшает разрешающую способность контактной фотолитографии.

Окончательное формирование в пленке ФР изображения элементов схем происходит при его **проявлении**, когда в зависимости от типа ФР удаляются экспонированные или неэкспонированные участки. В результате на поверхности подложки остается защитная фоторезистивная маска требуемой конфигурации.

Проявителями для негативных ФР служат органические растворители: толуол, бензол, трихлорэтилен и др.

Позитивные ФР проявляются в слабых водных растворах щелочей: 0,3–0,6 %-ный раствор КОН; 1–2 %-ный раствор тринатрийфосфата и др.

**Для каждого резиста существуют оптимальные сочетания времен экспонирования и проявления, обеспечивающие наилучшую воспроизводимость размеров проявленных элементов рисунка (рис. 2.6).**

Увеличение экспозиции уменьшает время проявления, но приводит к изменению размеров проявленных элементов рисунка (в позитивных резистах размеры увеличиваются, в негативных уменьшаются). Увеличение времени проявления повышает пористость и растравливание границ рисунка по контуру.

Времена проявления и экспонирования связаны между собой обратной пропорциональной зависимостью

$$t_{np} = k_{np} \frac{d_{\Phi P}^2}{t_{\text{экс}}},$$

где  $k_{np}$  — технологический фактор.

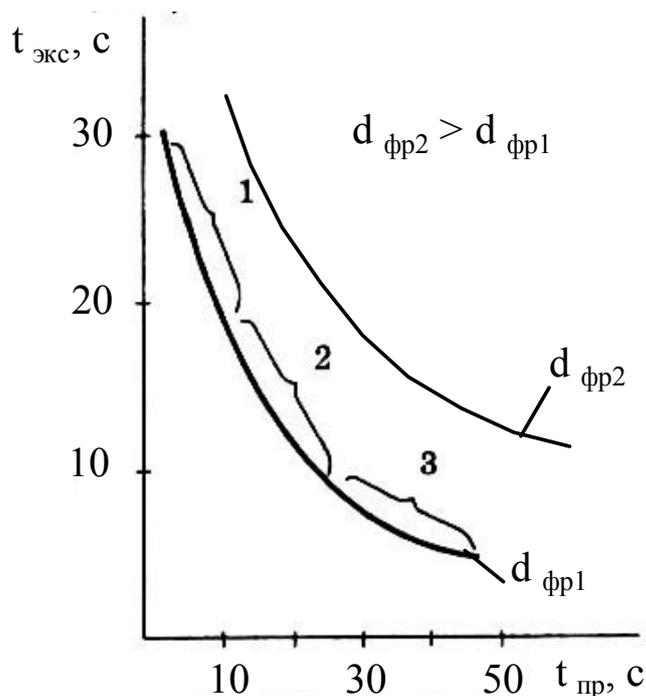


Рис. 2.6 — Зависимость между временами экспонирования и проявления, обеспечивающими наилучшую воспроизводимость размеров проявленных элементов рисунка:  
 1, 3 — области неустойчивых режимов;  
 2 — область устойчивых режимов

Если известно время проявления для одной толщины фоторезиста  $d_{\Phi P1}$ , то можно определить время проявления для другой толщины  $d_{\Phi P2}$  при заданном времени экспонирования:

$$t_{np2} = t_{np} \frac{d_{\Phi P2}^2}{d_{\Phi P1}^2}.$$

При проявлении негативных ФР происходит набухание и затем растворение неэкспонированных участков. При этом набухают и растворяются и экспонированные участки, но в значительно меньшей степени. Поэтому для

получения четкого рисунка подбирают такой проявитель, который бы минимально воздействовал на экспонированные участки. При недостаточной экспозиции облученные участки будут растворяться почти также, как и необлученные, что приведет к очень некачественному рисунку. Механизм проявления позитивных ФР заключается в образовании при химической реакции растворимых в воде солей, которые вымываются при проявлении. В отличие от негативных ФР в позитивных ФР отсутствует набухание, что повышает их разрешающую способность.

**После проявления подложки промывают и сушат** при повышенных температурах. Температура сушки составляет: для негативных ФР - 200–220 °С при времени выдержки 1 ч; для позитивных ФР — 200–240 °С — 0,5 ч. В процессе сушки в негативных ФР происходит окончательная полимеризация проявленных участков. Вследствие этого повышается стойкость слоя ФР к действию травителей и улучшается его адгезия к подложке.

После сушки подложки подвергают контролю под микроскопом. При контроле обнаруживаются: **посторонние включения, пылинки, микрочастицы**, которые создают участки, обладающие повышенной растворимостью. Эти дефекты, как правило, незаметны во время нанесения резиста, выявляются при проявлении, поскольку обладают повышенной растворимостью. В результате растворения они создают **поры (проколы)** в слое ФР. Плотность зависит не только от чистоты и качества резиста, запыленности окружающей среды, но и от толщины наносимого ФР. С уменьшением толщины плотность дефектов  $D$  увеличивается:

$$D = 1,4d_{\text{ФР}}^{-3},$$

где  $D$  — деф/см<sup>2</sup>;

$d$  — мкм.

Задубливание является финишной операцией нанесения фоторезистивной маски, поэтому после нее следует окончательный визуальный контроль перед травлением.

**Основные виды выявляемых дефектов** сводятся к следующим:

- некачественное удаление резиста (вызывается низкой адгезией из-за плохой подготовки поверхности);
- плохо проявленный рисунок (вызывается некачественным фоторезистом, нарушениями температуры первой сушки и режимов экспонирования);
- двойной край или большой клин по краю рельефа (вызывается неоптимальными режимами экспонирования и проявления, большим зазором между подложкой и фотошаблоном при экспонировании);
- неровный («рваный») край рельефа (в основном из-за загрязненного фотошаблона и несоблюдения режимов экспонирования);
- проколы (из-за запыленности среды и фоторезиста, перепроявления, уменьшения толщины, нарушения режимов экспонирования);
- остатки фоторезиста в проявленных окнах (из-за недопроявления или нарушения режимов экспонирования);
- изменение размеров рисунка (из-за ошибки в экспозиции либо нарушения режимов проявления).

Контактная ФЛ заканчивается операцией травления технологического слоя и последующим удалением фоторезистивной маски. **Для удаления фоторезистов** можно применять множество жидких растворителей или использовать газофазные процессы с возбужденным кислородом (сжигание в кислородной плазме). Позитивные ФР легко удаляются в органических растворителях. Негативные ФР лучше удаляются при окислении. При жидкостном методе подложки кипятят в органических растворителях (диметилформамиде и др.). При этом слой ФР набухает и удаляется. Чем больше задублен ФР, тем он прочнее, тем сложнее его растворить.

Эффективное удаление ФР можно проводить в среде кислорода при высоких (до 700 °С) температурах, если это позволяет структура подложки. Освещение подложки ультрафиолетовыми лучами позволяет резко снизить температуру обработки.

Формирование топологии рисунка на технологическом слое (металлизация, диэлектрическая пленка) является конечной задачей фотолитографии. Это осуществляется химическим жидкостным либо «сухим» (ионно-плазменным) методами. **Химическое жидкостное травление основано на растворении в химических реагентах незащищенных фоторезистивной маской участков технологического слоя** и состоит из следующих стадий: диффузии и адсорбции молекул травителя к поверхности подложки; химической реакции; десорбции продуктов реакции и удаления их в раствор. Скорость травления зависит от наиболее медленной стадии и, кроме того, определяется составом травителя и его температурой. Используемые химические травители должны обладать **селективностью (избирательностью)**, т.е. способностью активно растворять основной технологический слой, не взаимодействуя с фоторезистом и другими нижележащими слоями. **Процесс химического жидкостного травления, как правило, изотропен, т.е. имеет одинаковую скорость во всех направлениях.** Участки подложки, незащищенные пленкой ФР, травятся не только вглубь, но и в стороны, т.е. происходит так называемое боковое подтравливание, что приводит к изменению линейных размеров элементов рисунка. При плохой адгезии слоя ФР травитель может проникать под него на значительное расстояние и в этом случае боковое подтравливание становится недопустимо большим. При хорошей адгезии фронт бокового травления (клин травления) имеет форму дуги. Изменение размеров элементов рисунка не должно превышать допусков, указанных в технических условиях.

### 2.3 Методика эксперимента

Нанести на подложку фоторезист на центрифуге (режимы установить по рекомендации преподавателя). Далее реализовать фотолитографический процесс по этапам и получить рисунок элементов в слое фоторезиста. Произвести измерения ширины резисторов (или других элементов) в нескольких точках по длине под микроскопом  $b_{ФР}$ , рассчитать среднее

значение  $\bar{b}_{\text{ФР}}$ . Аналогичные измерения сделать на фотошаблоне  $\bar{b}_{\text{ФШ}}$ . Разность между этими величинами дает ошибку процесса фотолитографии:

$$\Delta b_{\text{фл}} = \left| \bar{b}_{\text{ФШ}} \right| - \left| \bar{b}_{\text{ФР}} \right| = \Delta b_{\text{м}}$$

Эта ошибка фактически обусловлена процессами экспонирования и проявления и является ошибкой контактной маски.

## 2.4 Задание на работу

- 1) Нанести на подложки фоторезист с различной толщиной.
- 2) Провести процесс экспонирования через тестовый фотошаблон в режиме контактного (или проекционного экспонирования).
- 3) Определить толщину слоя фоторезиста путем измерения на интерферометре МИИ-4М.
- 4) Определить ошибку процесса фотолитографии.

## Литература

1. Данилина Т.И. Технология тонкопленочных микросхем. Учебное пособие. — Томск: 2007. — 151 с.
2. Парфенов О.Д. Технология микросхем. — М.: Высшая школа, 1986. — 320 с.
3. Мартынов В.В., Базарова Т.Е. Литографические процессы: Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники, книга 8. — М.: Высшая школа, 1990. -128 с.

### **3 Изучение погрешности изготовления тонкопленочных резисторов**

#### **3.1 Цель работы**

Приобрести практические навыки изготовления тонкопленочных элементов – тонкопленочных резисторов. Овладеть практическими методами измерения параметров тонкопленочных резисторов. Освоить методы оценки погрешности изготовления тонкопленочного резистора. Изучить факторы, влияющие на точность изготовления тонкопленочных резисторов.

#### **3.2 Схема экспериментальной установки (см. п. 1.2)**

#### **3.3 Краткие теоретические сведения.**

##### **3.3.1 Выбор материалов для тонкопленочных резисторов**

Основными элементами тонкопленочных микросхем являются подложка и система пассивных элементов, включающая резисторы, конденсаторы, индуктивности, проводники и контактные площадки.

Проблема создания тонкопленочных резисторов связана с технологическими вопросами получения следующих характеристик пленки резистивного материала:

- удельного сопротивления пленки, его воспроизводимости и стабильности во времени;
- удельной рассеиваемой мощности пленки;
- температурного коэффициента сопротивления (ТКС);
- эксплуатационных характеристик (спектра и уровня шумов и др.).

С учетом возможности получения данных характеристик резистивной пленки могут быть рассчитаны электрические параметры и конструкция резисторов. Взаимосвязь конструктивных и технологических параметров резисторов устанавливается основным уравнением для их расчета

$$R = \frac{\rho_v \cdot l}{b \cdot d}, \quad (3.1)$$

где  $R$  – сопротивление резистора, Ом;

$\rho_v$  – удельное объемное сопротивление материала резистивной пленки, Ом·м;

$l, b, d$  – соответственно длина, ширина и толщина резистора (рис. 3.1).

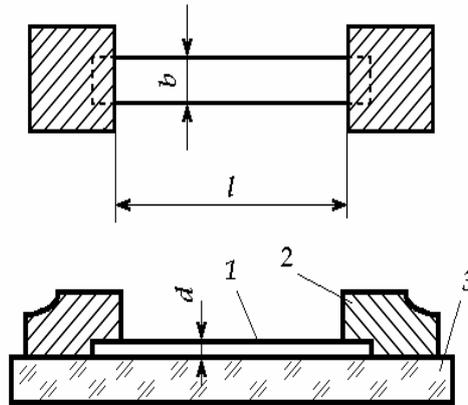


Рис. 3.1 – Тонкопленочный резистор

1 - резистивная пленка; 2 - контактная пленка проводящего материала; 3 - подложка.

При использовании одного и того же резистивного материала общей для всех резисторов микросхемы величиной, не зависящей от номинала резисторов и его размеров, является сопротивление резистивной пленки  $\rho_v$ . Проектируя тонкопленочные резисторы, предполагают также, что и толщина резистивной пленки одна и та же для всех одновременно изготавливаемых резисторов.

Это позволяет ввести понятие о  $\rho_s$  – поверхностном удельном сопротивлении резистивной пленки, величина которого определяется только удельным объемным сопротивлением материала резистивной пленки и его толщиной и численно равна сопротивлению квадратной формы с произвольным размером сторон. Уравнение для сопротивления резистора при этом может быть записано как

$$R = \rho_s \frac{l}{b} = \rho_s K_\phi, \quad (3.2)$$

где  $K_\phi$  – коэффициент формы или число квадратов резистора.

Для получения пленочных резисторов с номиналами от единиц и долей Ом до десятков и сотен мегом используются материалы, удельное

сопротивление которых изменяется в широких пределах. Материалы тонкопленочных резисторов можно условно разделить на несколько групп: резистивные материалы на основе металлических сплавов и микрокомпозиций (смесей), полупроводниковые материалы и др.. В качестве резистивных материалов на основе чистых металлов чаще всего используются хром и тантал с сопротивлением  $(100-200) \text{ Ом}/\square$  и ТКС порядка  $(5-10) \cdot 10^{-4} \text{ 1/град.}$  Необходимость создания резистивных пленок с большими значениями удельного сопротивления порядка сотен и тысяч Ом на квадрат заставила обратиться к новым типам материалов, в том числе и к металлическим сплавам. Пленки нихрома с толщиной 20-50 нм имеют  $\rho_s = (50-300) \text{ Ом}/\square$  и ТКС -  $2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/град.}$  По своим свойствам к сплавам приближаются так называемые микрокомпозиции, в состав которых наряду с металлами вводятся полупроводники или диэлектрики. При использовании сплавов кремния в сочетании с некоторыми металлами образуется диэлектрическая фаза в виде окислов кремния в композиции с проводящей фазой дисилицидов металлов, многие из которых являются примесными полупроводниками с высоким удельным сопротивлением. До термостабилизации эти пленки имеют практически аморфную структуру и отрицательный ТКС, но после термообработки кристаллизуются; ТКС пленок при этом уменьшается. Структура таких сплавов однородна и обеспечивает малый уровень шумов. Увеличение процентного содержания диэлектрической фазы приводит к возрастанию удельного сопротивления микрокомпозиций с одновременным изменением величины ТКС в сторону отрицательных значений. Наиболее широко для изготовления микрокомпозиционных резисторов используются сплавы типа МЛТ. Обычно в их состав входят в качестве основных веществ хром и кремний с добавками железа, никеля и алюминия. Для сплава МЛТ-3М удается с хорошей воспроизводимостью получать удельные сопротивления  $(200-800) \text{ Ом}/\square$  и ТКС -  $(60-150) \cdot 10^{-5} \text{ 1/град.}$

Для получения резистивных пленок с  $\rho_s = 1$  кОм/□ и более используют керметы, являющиеся частным случаем микрокомпозиций. В их состав входят металл и диэлектрик. Наиболее воспроизводимые результаты при высокой стабильности и низком значении ТКС в настоящее время удалось получить лишь для керметов хром (Cr)-моноокись кремния (SiO). Максимальное  $\rho_s$ , которое удалось получить для этих резисторов, составляет 20 кОм/□. Однако практически используются резисторы на основе Cr-SiO с  $\rho_s$  не более 2000 Ом/□.

В последнее время разработаны специальные сплавы, например, сплав РС-1004 для высокоомных резисторов с удельным сопротивлением 40-50 кОм/□. Основным недостатком этих резисторов является высокая абсолютная величина ТКС. Тем не менее, эти резисторы могут успешно применяться в высокоомных делителях напряжения. Полупроводниковые соединения PbO, SnO, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др. являются высокоомными материалами, но мало изучены и не применяются для изготовления тонкопленочных резисторов.

### 3.3.2. Технологические погрешности резисторов

Воспроизводимость номиналов резисторов определяется воспроизводимостью удельного поверхностного сопротивления и геометрии резистора. Для тонкопленочных резисторов обычно длина больше его ширины, поэтому воспроизводимость геометрии резистора будет определяться погрешностью получения ширины резистора. Эта погрешность будет определяться способом получения рисунка.

Для контактных масок при травлении резистивных пленок через маску шириной  $b_m$  возникает боковой подтрав  $2d$  (рис. 3.2).

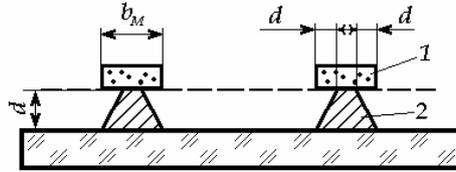


Рис. 3.2 – Процесс переноса изображения с контактной маски 1 на резистивную пленку 2.

С учетом абсолютных погрешностей получим

$$b_p + \Delta b_R = (b_p + \Delta b_M) - 2(d + \Delta d), \quad (3.3)$$

где  $b_p$  – расчетная величина ширины резистора;

$\Delta b_R, \Delta b_M, \Delta d$  – соответственно абсолютные погрешности ширины резистора, маски и толщины резистивной пленки.

Преобразования приводят к следующей формуле

$$b_p \left( 1 + \frac{\Delta b_R}{b_p} \right) = b_p \left( 1 + \frac{\Delta b_M}{b_p} \right) - 2d \left( 1 + \frac{\Delta d}{d} \right),$$

отсюда

$$\frac{\Delta b_R}{b_p} = \frac{\Delta b_M}{b_p} - 2 \frac{d}{b_p} \left( 1 + \frac{\Delta d}{d} \right), \quad (3.4)$$

где  $\frac{\Delta b_R}{b_p}, \frac{\Delta b_M}{b_p}, \frac{\Delta d}{d}$  – относительные погрешности соответственно ширины

резистора  $\delta b_R$ , маски  $\delta b_M$  и толщины  $\delta d$ .

Абсолютная погрешность изготовления контактной фоторезистивной маски определяется ошибкой изготовления фотошаблона  $\Delta b_{фи}$ , ошибкой на операции совмещения и экспонирования  $\Delta b_{эксн}$  (параметр установки) и ошибкой  $\Delta b_{пр}$ , возникающей на операции проявления, обусловленной особенностями проявления негативных и позитивных фоторезистов. Для подсчета полной ошибки контактной маски следует применить закон сложения ошибок

$$\Delta b_M = \sqrt{\Delta b_{фи}^2 + \Delta b_{эксн}^2 + \Delta b_{пр}^2}. \quad (3.5)$$

Погрешность по толщине  $\Delta d$  определяется воспроизводимостью процесса осаждения пленки и разбросом ее толщины по подложке и устанавливается экспериментально. Если есть необходимость, то погрешность по длине рассчитывается аналогично.

Для тонкопленочных резисторов, рисунок которых получен через свободную маску, ошибка по длине и ширине складывается из ошибки изготовления трафарета и ошибок, возникающих в процессе напыления. Ошибка трафарета зависит от способа его изготовления. В производстве наибольшее распространение получил фотохимический метод изготовления свободных масок, основанный на фотопереносе изображения с фотошаблона на металлическую заготовку маски с последующим ее травлением. Для биметаллической маски точность составляет  $\pm 10$  мкм. В процессе эксплуатации маска постепенно теряет свою точность вследствие осаждения на нее тонкопленочных слоев. Испаренное вещество одновременно осаждается на подложку и на края трафарета. В этом случае запыление рабочих окон шириной  $b$  составляет

$$\Delta b_{зан} = |2dn|,$$

где  $d$  – толщина напыляемой пленки;

$n$  – число напылений.

Допустимое число напылений зависит от размеров окон и требуемой точности. Эту погрешность можно исключить, если своевременно производить очистку трафарета путем травления.

Ошибки подпыления и затенения, возникающие в процессе напыления, поясняются рис. 3.3. Если поток частиц из испарителя в высоком вакууме считать прямолинейным, то часть участков трафарета может экранировать подложку. Эффект затенения зависит от толщины трафарета и взаимного расположения элементов системы испаритель-трафарет-подложка. Из рис. 3.3. ошибка затенения определяется

$$\Delta b_{зат} = (t + s) \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 = (t + s) \cdot \frac{x}{h},$$

где  $x$  – удаление элемента от центра подложки;

$h$  – кратчайшее расстояние от испарителя до подложки;

$s$  – зазор между трафаретом и подложкой;

$t$  – толщина трафарета.

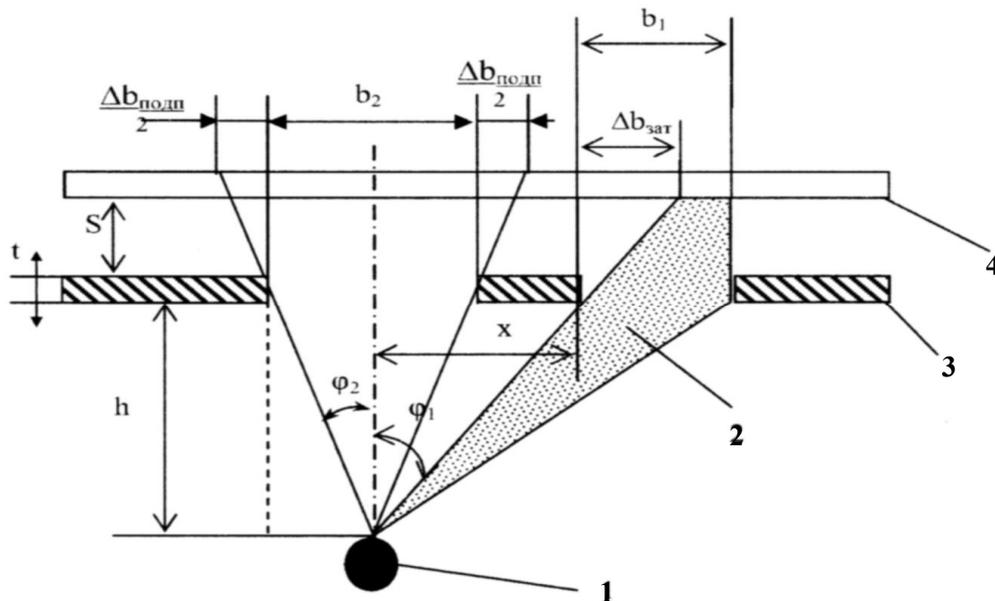


Рис. 3.3 – К расчету ошибок подпыления и затенения  
 1 - испаритель; 2 - молекулярный поток;  
 3 - свободная маска (трафарет); 4 - подложка

Рассмотренный случай является простейшим. При сложной форме рабочих окон трафарета проекция тени может сильно отличаться от фактической формы окна. Если испаритель имеет форму нити или лодочки, то учет появления тени затруднен. Эта погрешность может быть уменьшена за счет рационального размещения прорезей в трафарете и испарителя, а также за счет введения нескольких испарителей.

При наличии зазора между трафаретом и подложкой возникает подпыление. Из рис. 3.3 для точечного испарителя

$$\frac{\Delta b_{\text{нодн}}}{2} = s \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 = s \cdot \frac{b_2 / 2}{h + t}.$$

При  $t \ll h$

$$\Delta b_{\text{нодн}} = \frac{s \cdot b_2}{h}.$$

Для поверхностного испарителя

$$\Delta b_{\text{нодн}} = \frac{s(L + b_2)}{h},$$

где  $b_2$  – ширина резистора;

$L$  – длина испарителя.

На ошибку подпыления существенное влияние оказывает давление остаточных газов в рабочей камере в процессе напыления. С увеличением этого давления ошибка подпыления очень сильно возрастает. Эффект подпыления является одной из причин, почему свободные маски не используются при катодном распылении, которое реализуется при высоких давлениях.

Полная ошибка напыления определяется

$$\Delta b_{\text{нан}} = \sqrt{\Delta b_{\text{зан}}^2 + \Delta b_{\text{зат}}^2 + \Delta b_{\text{нодн}}^2}.$$

С учетом ошибки изготовления трафарета

$$\Delta b = \sqrt{\Delta b_{\text{траф}}^2 + \Delta b_{\text{нан}}^2}.$$

Погрешность по длине рассчитывается аналогично.

### 3.4 Методика измерений

Изготовить тонкопленочный резистор согласно составленному технологическому маршруту. С помощью микроскопа в нескольких точках произвести измерение ширины и длины полученных резисторов. То же самое сделайте и с маской (фотошаблоном), которая использовалась для их получения. При измерении длины резисторов учитывайте, что длина резистора – это расстояние между контактными площадками. Оцените погрешность изготовления тонкопленочных резисторов. Поскольку длина больше ширины,

то оцениваем только ошибку по ширине. Измерив ширину резисторов по подложке  $\bar{b}_R$ , на фотошаблоне -  $\bar{b}_{\PhiШ}$  и в слое фоторезиста  $\bar{b}_{\PhiР}$  (из лабораторной работы по фотолитографии) можно оценить соответствующие погрешности:

$$\Delta b_R = \left| \bar{b}_{\PhiШ} \right| - \left| \bar{b}_R \right|$$

Эта погрешность обусловлена ошибками экспонирования, проявления ФР и травления рабочего слоя самого резистора. Если взять

$$\Delta b_R = \left| \bar{b}_R \right| - \left| \bar{b}_{\PhiЛ} \right|,$$

то это будет только ошибка, обусловленная процессом травления.

Для резисторов, рисунок которых получен через трафарет, производим аналогичные измерения на трафарете  $\bar{b}_{mp}$  и на подложке  $\bar{b}_R$  получаем ошибку

$$\Delta b_R = \left| \bar{b}_{mp} \right| - \left| \bar{b}_R \right|$$

При анализе этой ошибки необходимо учитывать явления, которые сопровождают процесс напыления пленок через трафарет (см. 3.3.2).

Проведите измерение сопротивления полученных резисторов, рассчитайте  $\rho_s$  и оцените его разброс по подложке.

### 3.5 Задание на работу

- 1) Составить технологический маршрут изготовления тонкопленочного резистора.
- 2) Изготовить 2 образца: первый на основе пленок меди (термическое напыление в вакууме); второй на основе пленок вольфрама (ионно-плазменное распыление) с контактами из меди
- 3) Произвести измерения геометрических размеров тонкопленочных резисторов и рассчитать погрешности для двух методов напыления.
- 4) Измерить сопротивление резистора (второй образец). Рассчитать  $\rho_s$  и сравнить с  $\rho_s$  для массивного материала.

## 4 Изготовление и исследование тонкопленочных конденсаторов

### 4.1 Цель работы

Приобрести практические навыки изготовления тонкопленочных элементов – тонкопленочных конденсаторов. Овладеть практическими методами измерения параметров тонкопленочных конденсаторов. Изучить влияние технологических факторов на параметры тонкопленочных конденсаторов (ТПК).

### 4.2 Схема экспериментальной установки (см. п. 1.2)

### 4.3 Краткие теоретические сведения.

#### 4.3.1 Параметры тонкопленочных конденсаторов

Тонкопленочный конденсатор (ТПК) конструктивно представляет собой многослойную структуру, в простейшем случае состоящую из двух металлических обкладок, разделенных слоем диэлектрика (рис. 4.1).

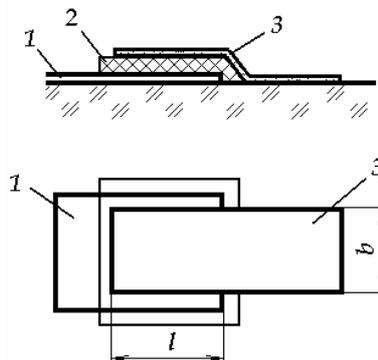


Рис. 4.1 – Тонкопленочный конденсатор. 1 - нижняя обкладка; 2 - диэлектрик; 3 - верхняя обкладка;  $l$  и  $b$  - длина и ширина перекрытия верхней и нижней обкладок конденсатора.

Основные электрические параметры ТПК: емкость  $C$ , рабочее напряжение  $U_{\text{раб}}$ , тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) и эксплуатационные параметры определяются многочисленными факторами, в том числе материалами, способами напыления, толщиной пленок и др. Конструкция и технология изготовления конденсаторов имеют ряд особенностей. Емкость конденсатора определяется как

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot l \cdot b}{d},$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;

$\varepsilon$  - диэлектрическая постоянная материала;

$S$  – поперечное сечение обкладок конденсатора (активная площадь);

$l, b$  – длина и ширина обкладок;

$d$  – толщина диэлектрической пленки.

Поскольку свойства материалов, полученных в виде тонких пленок, могут значительно отличаться от свойств массивных образцов, при проектировании конденсаторов и разработке технологии их изготовления используют понятие об удельной емкости  $C_0$ , как одной из характеристик диэлектрического слоя

$$C_0 = \frac{C}{S} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d}.$$

Чем больше  $C_0$ , тем меньшую площадь занимает конденсатор на подложке. Надо выбирать материалы с большим  $\varepsilon$  или делать слишком тонкой диэлектрическую пленку. Однако применение слишком тонких пленок исключается, так как пленки менее 100-200 нм содержат большое количество дефектов.

Второй параметр, характеризующий свойства ТПК, - электрическая прочность  $E_{np}$ , т.е. напряженность электрического поля, при которой происходит пробой конденсатора. Электрическая прочность определяется экспериментально по пробивному напряжению  $U_{np}$  как  $E_{np} = U_{np} / d$ . Электрическая прочность для средних толщин для одного и того же материала, полученного известным способом, является величиной постоянной. Очевидно, что рабочее напряжение конденсатора должно быть меньше напряжения пробоя, т.е:

$$U_{\text{раб}} = \frac{U_{\text{нр}}}{K_3} = \frac{E_{\text{нр}} \cdot d}{K_3},$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса ( $K_3 = 2 - 4$ ).

Из последнего соотношения можно сформулировать условие выбора минимальной толщины диэлектрика

$$d \geq \frac{U_{\text{раб}} \cdot K_3}{E_{\text{нр}}}.$$

Если из этого условия толщина диэлектрической пленки получается менее 100 нм, то надо выбирать толщину, исходя из технологических соображений, в диапазоне 100-200 нм.

Кроме диэлектрических потерь, в конденсаторе имеется еще один источник потерь, связанный с сопротивлением обоих электродов

$$\text{tg} \delta = \text{tg} \delta' + \frac{2 \cdot \omega \cdot C \cdot \rho_v \cdot l}{3 \cdot b \cdot d_1},$$

где  $\text{tg} \delta$  – измеряемый тангенс угла диэлектрических потерь;

$\text{tg} \delta'$  – частотно-независимый вклад диэлектрика;

$C$  – емкость конденсатора;

$\omega$  – угловая частота;

$\rho_v$  – удельное объемное сопротивление материала электродов

$d_1$  – толщина электрода;

$l, b$  – длина и ширина площади перекрытия верхнего и нижнего электродов.

Из этого уравнения видно, что  $\rho_v, d_1$  и их соотношение сильно влияют на работу ТПК при высоких частотах. Ограничения по частоте для высокочастотных конденсаторов могут быть уменьшены увеличением толщины и проводимости металлических электродов.

Температурный коэффициент емкости характеризует изменение емкости в интервале температур от минус 65 до плюс 125 °С и стабильную работу ТПК.

#### 4.3.2 Диэлектрические материалы

Рассмотренные параметры, а также эксплуатационные характеристики ТПК, такие как надежность, временная стабильность, частотные свойства определяются выбором материалов и способом их получения.

Рассмотрим свойства некоторых наиболее часто используемых диэлектрических материалов.

**Моноокись кремния (SiO)**, обычно получаемая термическим испарением, имеет диэлектрическую постоянную от 3,5 до 6, что соответствует изменению состава от двуокиси кремния SiO<sub>2</sub> до чистой SiO, образует малодефектную и гладкую пленку. При температурах испарения более 1250 °С SiO диссоциирует в испарителе с выделением свободного кремния, который может увеличивать  $\epsilon$  пленок до 10. При этом свойства пленок ухудшаются.

**Пленки окиси тантала (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)** получают ионно-плазменным распылением (реактивное, высокочастотное) или анодным окислением. Эти пленки характеризуются диэлектрической проницаемостью, изменяющейся в диапазоне 16-25, и малой дефектностью для анодноокисляемых пленок. Электрическая прочность конденсаторов с использованием диэлектрика Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> сильно зависит от материалов электродов и способов их получения.

**Пленки окиси алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)** с  $\epsilon = 8 - 10$  получают ионно-плазменным распылением, электронной бомбардировкой, анодным окислением. При испарении исходного вещества Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с помощью электронного луча пленки на подложке получаются нестехиометрического состава с дефицитом кислорода, что приводит к ухудшению свойств пленок.

**При испарении окислов титана (TiO<sub>2</sub>) и циркония (ZrO<sub>2</sub>)** получают соответственно пленки с  $\epsilon = 30 - 40$  и  $\epsilon = 20 - 22$ . Электрическая прочность и другие параметры ТПК зависят от способов получения диэлектрических пленок и материала обкладок. Для плотных пленок TiO<sub>2</sub> и ZrO<sub>2</sub> с электродами из

алюминия электрическая прочность составляет  $E_{np} = 1 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ . Для изготовления конденсаторов малой емкости могут использоваться пленки на основе боросиликатного стекла (80 %  $\text{SiO}_2$  и 20 %  $\text{B}_2\text{O}_3$ ), имеющие  $\varepsilon = 4$  и  $E_{np} = 5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ . Получаются такие пленки методом взрывного испарения.

### 4.3.3. Выбор материала обкладок

К материалам обкладок предъявляются следующие требования: низкое сопротивление 0,05-0,2 Ом/□, ровная и гладкая поверхность и малый коэффициент диффузии. Отказ ТПК чаще всего происходит из-за закорачивания, которое зависит как от качества диэлектрической пленки, так и от качества обкладок.

Очень зернистые пленки таких материалов, как **свинец** и **олово**, неприемлемы, т.к. их поверхность весьма шероховата. Мало пригодны также металлы с высокой температурой испарения (**хром**, **никель**, **железо**). Такие металлы приводят к большому количеству коротких замыканий, очевидно, вследствие проникновения атомов металла с большой кинетической энергией в диэлектрик при конденсации.

**Золото** и **серебро**, хотя имеют сравнительно низкую температуру испарения, также могут вызывать замыкание обкладок. Оно происходит из-за интенсивной диффузии атомов этих металлов из обкладок после осаждения (вдоль границ зерен).

Наилучший выход получается при использовании **алюминия**, который имеет низкую температуру испарения и малую подвижность атомов на поверхности, благодаря окислительным процессам. Надо обязательно исключить разбрызгивание, т.е. попадание крупных капель и прожигание диэлектрика при нанесении верхней обкладки.

Электрическая прочность ТПК на основе диэлектрической пленки SiO с различными материалами обкладок составляет:

$$\text{Al-SiO-Al} - 2 \cdot 10^6 \text{ В/см};$$

Cu-SiO-Cu -  $0,8 \cdot 10^6$  В/см;

Ag-SiO-Ag -  $0,18 \cdot 10^6$  В/см.

Если применять свинец, олово, то  $E_{np}$  снижается в 10-20 раз, а количество коротких замыканий увеличивается в 10 раз. Для плотных диэлектрических пленок окиси тантала, получаемых ионно-плазменным распылением или анодным окислением, можно в качестве материала обкладок выбирать такие металлы, как тантал, золото. Например, танталовый конденсатор делается следующим образом: сначала напыляется пленка тантала, затем она окисляется, а затем напыляется верхний электрод. Получается структура Ta-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Au, обеспечивающая хорошие параметры.

#### 4.4 Методика эксперимента

Изготовить матрицу тонкопленочных конденсаторов согласно технологическому маршруту. При напылении нижней обкладки конденсатора необходимо учитывать, что ее толщина должна быть значительно меньше толщины диэлектрического слоя. Это позволит исключить вероятность обрывов пленки диэлектрика в местах ступенек образованных пленками нижнего электрода. Выбор толщины диэлектрика производить исходя из критерия сплошности и электрической прочности (с обязательным запасом не менее чем в 2-4 раза) при напряжениях 5-12 В (это напряжение может быть на клеммах измерительных приборов). Материал диэлектрика выбрать исходя из технологических возможностей.

Произвести измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь. Оценить процент выхода годных конденсаторов:

$$Г = \frac{N_z}{N_0} \cdot 100\%,$$

где  $N_z$  – число годных конденсаторов;

$N_0$  – общее число конденсаторов на подложке.

Напряжение пробоя оценивается визуально с помощью микроскопа. К обкладкам тонкопленочного конденсатора плавно прикладывается напряжение

до появления искр на поверхности верхнего электрода. При появлении искр на верхнем электроде фиксируется приложенное напряжение. Это напряжение и есть напряжение пробоя  $U_{пр}$ .

#### **4.5 Задание на работу**

- 1) Составить технологический маршрут изготовления тонкопленочного конденсатора.
- 2) Изготовить тонкопленочные конденсаторы.
- 3) Определить процент выхода годных конденсаторов.
- 4) Измерить емкость и тангенс угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  всех годных конденсаторов. Рассчитать толщину диэлектрика, исходя из известного материала диэлектрика.
- 5) Измерить напряжение пробоя полученных конденсаторов.

#### **Литература**

1. Данилина Т.И. Технология тонкопленочных микросхем. Учебное пособие. — Томск: 2007. — 151 с.
2. Технология тонких пленок. Т.2/ Под ред. Майссела, Р. Глэнга; Пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. —М.: Сов радио, 1977. - 664 с.

## **5 Технология получения диффузионных $p - n$ переходов.**

### **5.1 Цель работы**

Освоить методы определения глубины залегания  $p - n$  переходов. Измерить удельное поверхностное сопротивление на экспериментальных образцах. Определить технологические режимы диффузии.

### **5.2 Краткие теоретические сведения.**

#### **5.2.1 Легирование полупроводников диффузией**

Основой полупроводниковой технологии является создание  $p - n$  переходов путем легирования. Сущность легирования состоит во внедрении легирующей примеси в кристаллическую решетку полупроводника и образование области с противоположным типом проводимости. Эта область ограничивается  $p - n$  переходом. Количество вводимой примеси должно быть достаточным для компенсации ранее введенной примеси и создания ее избытка.

Легирование можно осуществлять путем термической диффузии примеси в полупроводник, нагретый до высокой температуры, и внедрением ионов примеси с высокой энергией (ионное легирование). В настоящее время наиболее распространенным является метод диффузии.

Диффузией называют перенос вещества, обусловленный тепловым движением атомов, возникающий при наличии градиента концентрации данного вещества и направленный в сторону убывания этой концентрации. Ввиду конечной скорости диффузии концентрация введенной примеси убывает в направлении от поверхности, через которую происходит диффузия, вглубь. Переход образуется на глубине  $x_{pn}$ , где концентрация введенной примеси оказывается равной концентрации исходной примеси  $N_{исх}$  (рис. 5.1).

Для получения слоев дырочного типа проводимости в качестве легирующей примеси используют элементы III группы: бор, индий, галлий, алюминий, а для получения слоев электронного типа проводимости применяют элементы V группы: фосфор, мышьяк, сурьму.

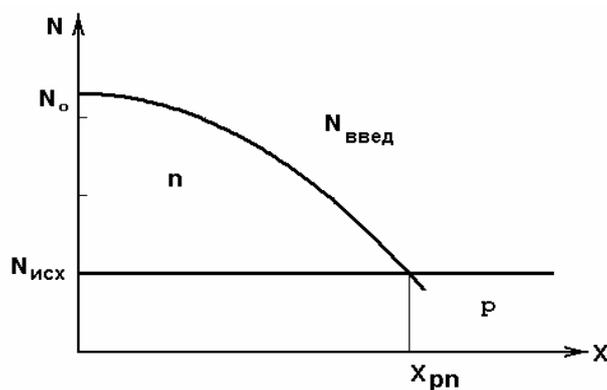


Рис. 5.1 – Распределение примеси в полупроводнике при термической диффузии.

Скорость процесса диффузии определяется коэффициентом диффузии  $D$ , равным числу атомов, проходящих через площадку в  $1 \text{ см}^2$  за 1 с. Коэффициент диффузии  $D$  зависит от температуры, энергии связи примесных атомов в решетке, концентрации вакансий и других факторов. Температурная зависимость коэффициента диффузии  $D$  определяется уравнением Аррениуса:

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

где  $D_0$  – кажущийся коэффициент диффузии, численно равный коэффициенту диффузии при бесконечно большой температуре;

$E_a$  – энергия активации, характеризующая энергию, необходимую для перехода атома примеси в соседний узел решетки.

Диффузия из бесконечного (неограниченного) источника является реальным случаем в производстве ИС и представляет первый этап диффузии, задачей которого является введение в кристалл определенного количества примеси. В результате образуется тонкий приповерхностный слой, насыщенный примесью. В производстве этот этап называется загонкой примеси.

Распределение концентрации примеси по глубине имеет вид

$$N = N_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} \right) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}},$$

где  $N_0$  – концентрация примеси на поверхности пластины, близкая к предельной растворимости данной примеси  $N_p$  при температуре загонки  $T_I$ ;

$\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}}$  – функция ошибок,  $\operatorname{erfc}$  означает дополнение (до единицы) функции ошибок;

$D_1$  – коэффициент диффузии при температуре загонки;  $t_1$  – время загонки.

Диффузия из ограниченного источника представляет собой второй этап диффузии - этап разгонки. На этапе разгонки примесь, введенная при загонке, распределяется вглубь полупроводника. При этом поверхностная концентрация примеси с течением времени убывает.

Профиль распределения примеси при этом описывается уравнением Гаусса

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right),$$

где  $N_0$  – концентрация примеси на поверхности диффузионной области, полученная в результате разгонки примеси в течение времени разгонки  $t_2$ ;

$D_2$  – коэффициент диффузии при температуре разгонки  $T_2$ .

По распределению Гаусса можно определить глубину залегания  $p-n$  перехода, положив концентрацию введенной примеси  $N_{введ}$  при  $x = x_{pn}$  равной концентрации исходной примеси  $N_{исх}$  на этой же глубине  $x_{pn}$

$$N_{введ(x=x_{pn})} = N_0 \exp\left(-\frac{x_{pn}^2}{4D_2 t_2}\right) = N_{исх(x=x_{pn})},$$

тогда

$$x_{pn} = 2\sqrt{D_2 t_2} \left(\ln \frac{N_0}{N_{исх}}\right)^{1/2}.$$

Для определения поверхностной концентрации  $N_0$  по  $\rho_s$  используются кривые зависимости концентрации от средней проводимости  $\bar{\sigma}$  (см. приложения). Величина средней проводимости рассчитывается по формуле:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\rho_s(x_{pn} - x)},$$

где  $x$  – текущая координата по глубине, на которой измерено  $\rho_s$ . Так как средняя проводимость обычно рассчитывается на поверхности, то концентрация определяется по кривой, соответствующей отношению  $x/x_{pn} = 0$ .

Для двухстадийной диффузии время разгонки рассчитывается как

$$t_2 = \frac{x_{pn}^2}{4D_2 \ln\left(\frac{N_0}{N_{исх}}\right)}.$$

Выбрав температуру разгонки в рекомендованном диапазоне 1000-1250 °С, определяется коэффициент диффузии  $D_2$  по уравнению Аррениуса, а затем вычисляется время разгонки  $t_2$ .

### 5.2.2 Технология получения диффузионных р – n переходов

При изготовлении полупроводниковых ИМС локальную диффузию примеси проводят с использованием маски из оксида кремния, окна в которой получены методом фотолитографии. Как уже отмечалось, диффузию чаще всего проводят в две стадии. Вначале на поверхности пластины создают относительно тонкий диффузионный слой с высокой концентрацией примеси из бесконечного источника примеси. Диффузию проводят локально через окна (рис. 5.2).

Этап загонки проводится в диффузионных печах при добавлении небольшого количества кислорода в парогазовую смесь, что приводит к образованию тонкой пленки  $\text{SiO}_2$  на поверхности пластины, которая предохраняет поверхность кремния от эрозии.

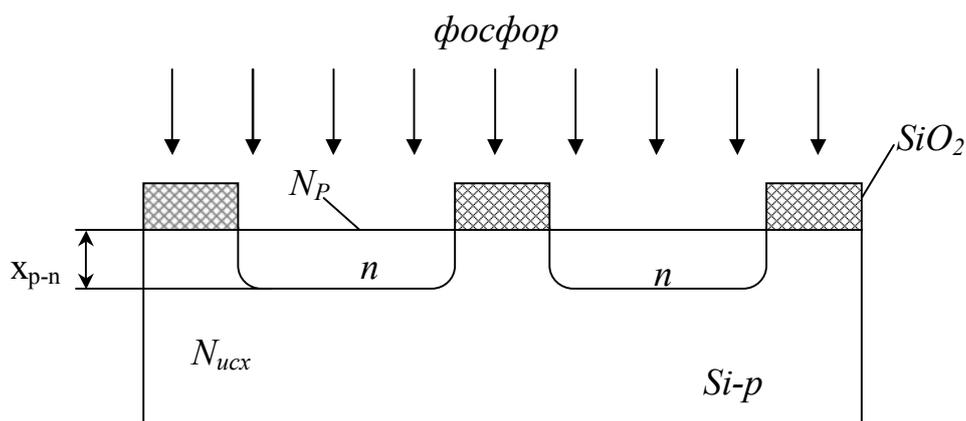


Рис. 5.2 – Этап загонки донорной примеси фосфора в полупроводник  $\text{Si-p}$

Затем проводят этап разгонки путем нагрева пластин кремния до высокой температуры ( $1000 - 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ ) в атмосфере кислорода в отсутствие внешнего источника примеси (рис. 5.3).

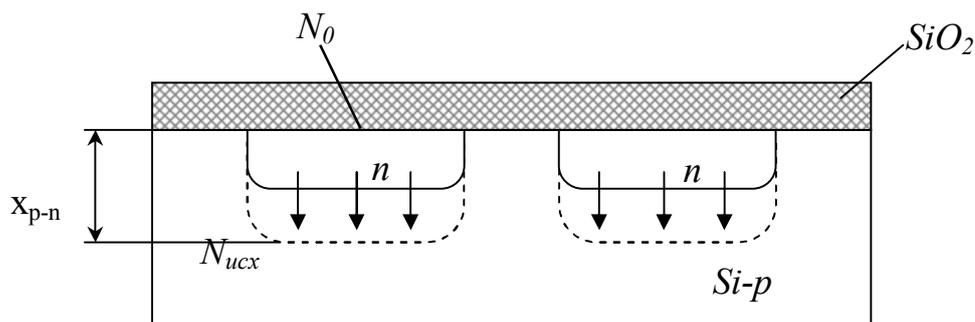


Рис. 5.3 – Этап разгонки примеси

На этом этапе диффузии источником примеси является приповерхностный слой кремния с высокой концентрацией примеси, полученной на этапе загонки (ограниченный источник примеси). Концентрация примеси на поверхности диффузионной области будет определяться временем и температурой разгонки.

### 5.2.3. Контроль параметров диффузионных слоев

Так как диффузия является одним из основных технологических процессов при изготовлении полупроводниковых ИМС, то после каждой операции диффузии производится контроль пластин. Контролируемыми параметрами являются глубина залегания  $p - n$  перехода  $x_{pn}$  и поверхностное сопротивление  $\rho_s$  (поверхностная концентрация  $N_0$ ). Поскольку значение этих параметров не зависит от площади диффузии, измерять их можно на пластине - "свидетеле", которую одновременно с рабочими пластинами вводят в зону диффузии.

Величину  $x_{pn}$  определяют методом сферического шлифа (рис. 5.4).

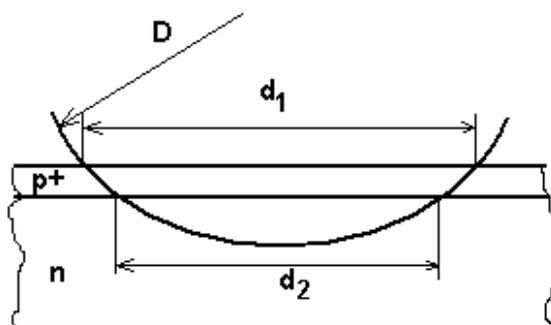


Рис. 5.4 – Измерение сферического шлифа.

На поверхности пластины вышлифовывается лунка с помощью вращающегося шарика диаметром  $D$  на глубину больше глубины залегания  $p - n$  перехода. Для четкого выявления  $p - n$  перехода применяют химическое окрашивание шлифа. При обработке шлифа в растворе 20 ч  $HF + 100$  ч  $CuSO_4$   $n$  - области покрываются медью, а при обработке в плавиковой кислоте  $HF$  с добавлением 0,1 %  $HNO_3$   $p$  - области темнеют. Измеряя с

помощью инструментального микроскопа геометрические параметры шлифа  $d_1$  и  $d_2$ , рассчитывают глубину залегания  $p-n$  перехода по следующему выражению

$$x_{pn} = \frac{d_1^2 - d_2^2}{4D}.$$

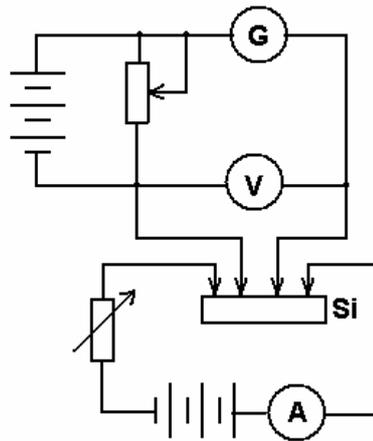


Рис. 5.5 – Схема измерения удельного поверхностного сопротивления полупроводниковых материалов четырехзондовым методом

Поверхностное сопротивление слоя  $\rho_s$  может быть измерено с помощью мостовой схемы (рис.5.5) четырехзондовым методом.

Установив ноль гальванометра  $G$ , определяют величину напряжения  $U$  протекающего в схеме тока  $I$  величина поверхностного сопротивления  $\rho_s$  определяется по формуле

$$\rho_s = 4,53 \frac{U}{I}.$$

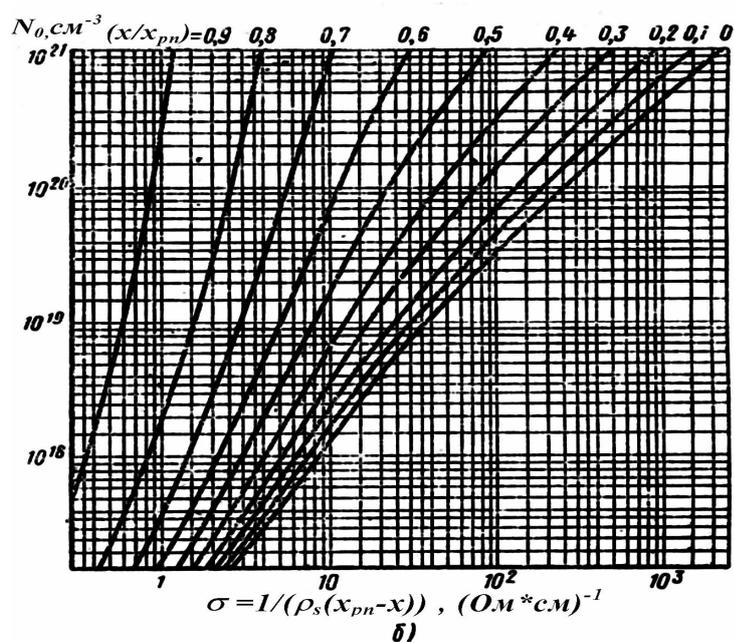
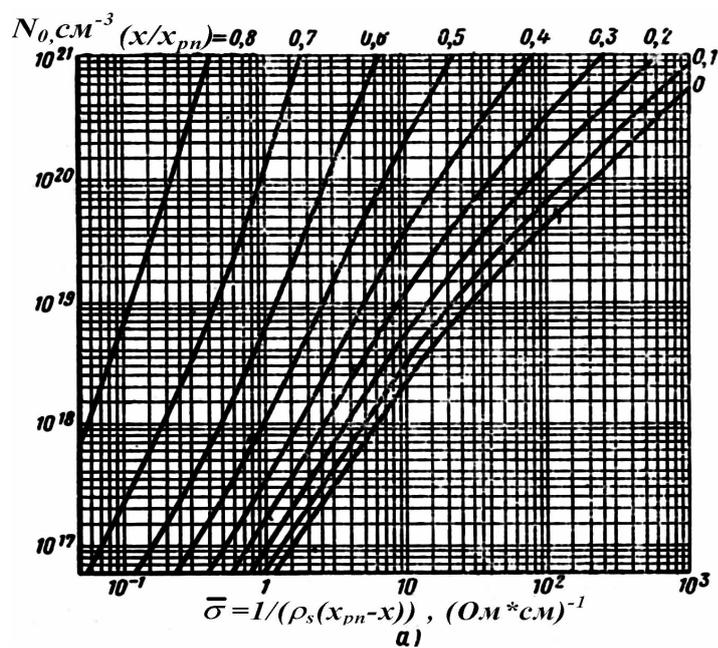
Эта формула справедлива при расстоянии между зондами  $S$  много больше глубины залегания  $p-n$  перехода и при диаметре пластины много больше  $S$ . Обычно величина  $S$  выбирается порядка 1 мм.

### 5.3. Задание на работу

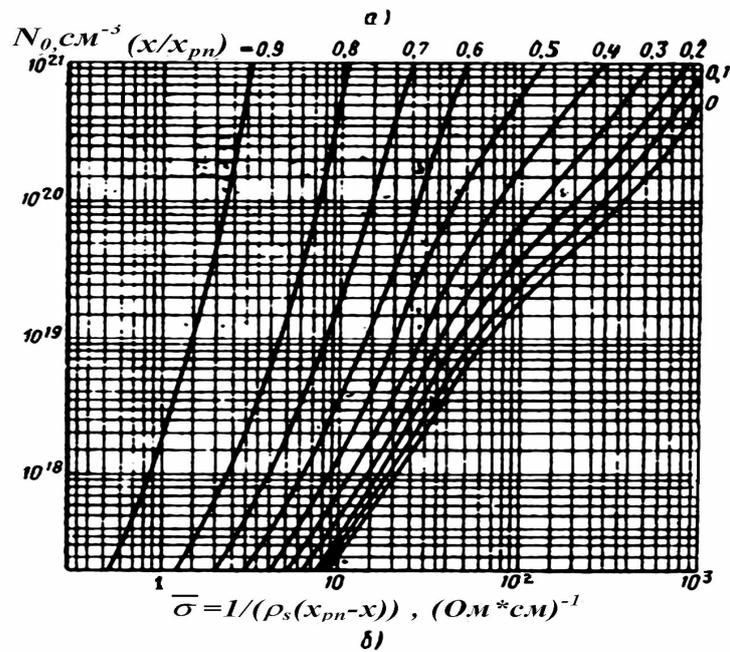
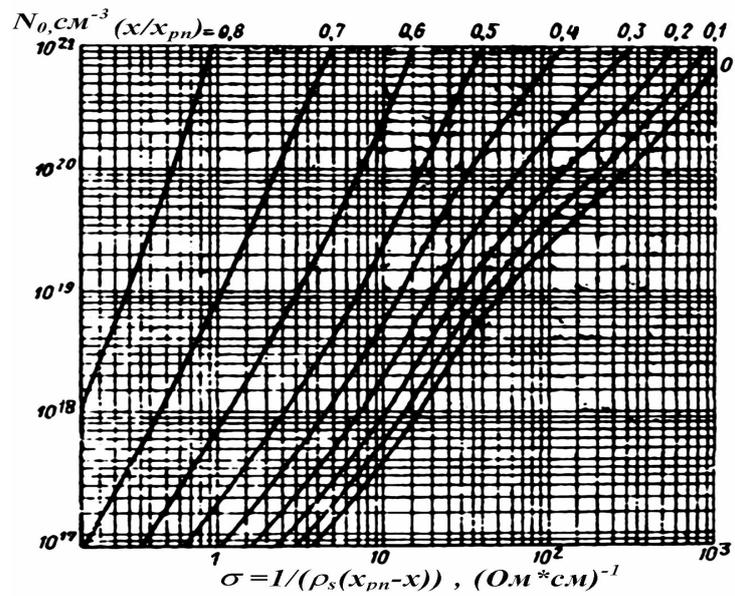
- 1) Произвести измерения размеров шлифа с помощью микроскопа для пластин кремния с указанной исходной концентрацией и типом примеси.
- 2) Произвести измерения удельного поверхностного сопротивления с помощью четырехзондового метода.
- 3) Рассчитать глубину залегания  $p$ - $n$  перехода.
- 4) Определить поверхностную концентрацию  $N_0$  с учетом типа примеси и режимов диффузии для конкретных образцов.

### Литература

1. Данилина Т.И., Смирнова К.И. и др. Процессы микро – и нанотехнологии. Учебное пособие. — Томск: 2007. — 151 с.
2. Матсон Э.А., Крыжановский Д.В. Справочное пособие по конструированию микросхем. –Минск: Высшая школа, 1982. -224 с.
3. Парфенов О.Д. Технология микросхем. – М.: Высшая школа, 1986. - 320 с.



Зависимость  $N_0(1/\rho_s x_{pn})$  для слоев  $n$  Si с гауссовым распределением примеси: а -  $N_{\text{исх}} = 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ; б -  $N_{\text{исх}} = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ .



Зависимость  $N_0(1/\rho_s x_{pn})$  для слоев  $p$   $\text{Si}$  с гауссовым распределением примеси: а -  $N_{\text{исх}} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; б -  $N_{\text{исх}} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .