

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Т.И. Данилина, Ю.В. Сахаров

**ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ
ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ**

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ

Томск 2025

УДК 621.382

ББК 32.853

Д18

Одобрено на заседании кафедры физической электроники протокол №162 от 07.11.2024 года

Рецензент:

Троян Павел Ефимович,

доктор технических наук, профессор кафедры физическая электроника ФГАОУ ВО
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Данилина, Тамара Ивановна

Д18 Основы технологии электронной компонентной базы: Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ / Т.И. Данилина, Ю.В. Сахаров. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 61 с.

Пособие является руководством для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Основы технологии электронной компонентной базы». Кратко освещены теоретические вопросы об основных технологических операциях изготовления электронной компонентной базы, используемых при выполнении лабораторных работ, указан порядок выполнения лабораторных работ.

Для студентов высших учебных заведений технических специальностей.

УДК 621.382

ББК 32.853

Данилина Тамара Ивановна

Сахаров Юрий Владимирович

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ

© Данилина Т.И., Сахаров Ю.В., 2025

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. Осаждение резистивных и проводящих пленок.....	4
Лабораторная работа №2. Изучение погрешности изготовления тонкопленочных резисторов.....	23
Лабораторная работа №3. Изготовление и исследование тонкопленочных конденсаторов.....	32
Лабораторная работа №4. Технологический процесс фотолитографии.....	38
Лабораторная работа №5. Технология получения диффузионных р – н переходов.....	51

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №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. Схема экспериментальной установки:

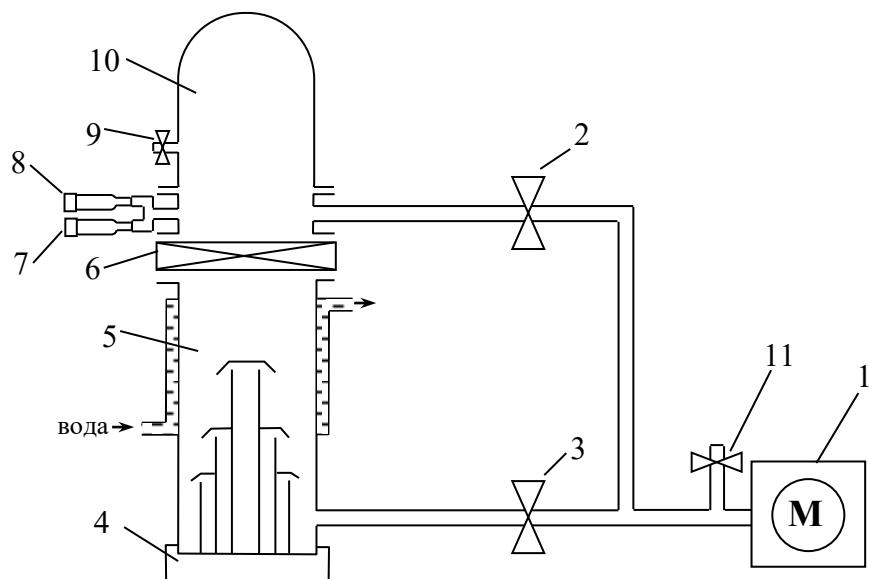


Рис. 1.1. Схема вакуумной установки УВН-2М: 1- механический (форвакуумный) насос; 2 – вентиль вспомогательной линии откачки; 3 – вентиль основной линии откачки; 4 – нагреватель диффузионного насоса; 5 – диффузионный насос; 6 – вакуумный затвор; 7 – термопарный вакуумметр; 8 – ионизационный вакуумметр;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

1.3. Описание вакуумной установки

Установка УВН-2М предназначена для откачки газа из вакуумной камеры 10 до предельного давления $P=1\cdot10^{-6}$ 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 откачуку. 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 потерю им вакуумных свойств. Поэтому важно соблюдать правильную последовательность управления вентилями 2, 3 и затвора 6 при работе с вакуумной установкой.

1.3.1. 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.
6. Тумблер «Диффузионный насос» нажать в положение «вкл». Тумблер «Диффузионный насос» имеет световую индикацию включения, расположенную над ним.

Время разогрева диффузионного насоса составляет около 40 мин.

1.3.2. 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 термопарному вакуумметру 7. Данное

давление отмечено красной чертой на шкале термопарного 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 с 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 термопарного 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» термопарного вакуумметра (соответствует давлению $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.). Для дальнейшего измерения давления в рабочем объеме необходимо включить ионизационный вакуумметр 8.

1.3.3. Порядок включения ионизационного вакуумметра

1. Убедиться в то, что давление в рабочей камере ниже 10^{-4} мм рт. ст. (термопарный 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:

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

1.3.4. 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.

1.3.5. Порядок напыления пленки 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.

1. Включить охлаждения токовводов. 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.

1.3.6. Порядок напыления пленки 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.

1. Включить охлаждения магнетрона. 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 секунд. Род рабочего газа зависит от напыляемого материала. При напылении металлов используют инертные газы (Ar, He, H₂). При напылении диэлектриков используют кислород или азот (N₂, O₂).
6. Произвести «тренировку» мишени. Тренировка заключается в «холостом» распылении материала мишени в течение 3-5 минут при токе не менее 0,25 А. При «тренировке» разрушается окисел на поверхности распыляемой мишени. Иногда, при «тренировке» используют кратковременное повышение тока до 0,5 А для разрушения прочных окислов (оксид алюминия).
7. Установить рабочий ток магнетрона.

8. Установить подложку над магнетроном 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.

1.3.7. Развакуумирование рабочего объема и извлечение образцов

1. Закрыть затвор 6.
2. Открыть натекатель 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.

1.3.8. Отключение вакуумной установки

1. Откачать рабочий объем.
2. Закрыть затвор 6.
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.

1.4. Краткие теоретические сведения

1.4.1. 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.

Для формирования молекулярного потока условия в пролетном пространстве между испарителем и подложкой должны быть такими, чтобы молекулы испаренного вещества без столкновений с молекулами остаточных газов достигали подложки. Если столкновения часты, то будет мала скорость осаждения пленок, велико подпыление (рис. 1.2, а). Направленное движение молекул вещества к подложке может быть создано за счет достаточно высокого вакуума и путем соответствующей конфигурации испарителей (рис. 1.2, б).

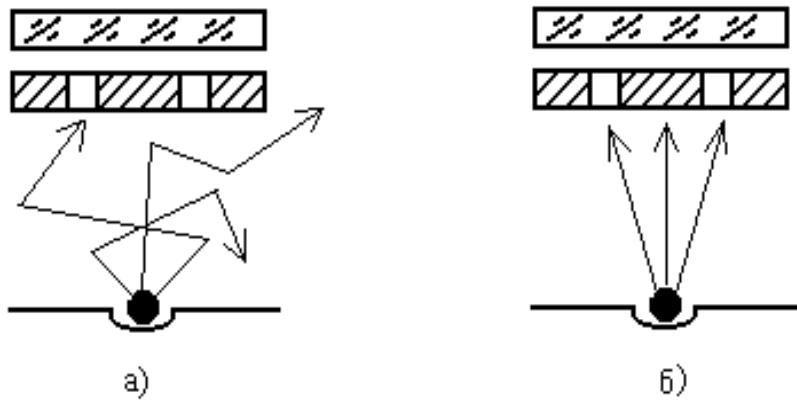


Рис. 1.2. Осаждение пленок в условиях низкого (а) и высокого (б) вакуума.

Для определения условий существования молекулярного потока удобнее характеризовать степень вакуума не давлением остаточных газов p_e , а средней длиной свободного пробега молекул $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \frac{kT_e}{p_e \pi \sigma^2 \sqrt{2}},$$

где k - постоянная Больцмана;

T_e - температура газа;

p_e - давление газа;

σ - диаметр молекул испаряемого вещества.

Уже при давлении $p_e = 10^{-4}$ мм рт. ст. средняя длина свободного пробега 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 1,3 Па и более. Температура вещества, при которой $p_s = 1,3$ Па, называется условной температурой испарения.

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

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

где p_s - давление насыщенного пара, Па;

m - масса молекулы, кг;

k - постоянная Больцмана, Дж/К;

T - температура испарения, К.

Скорость конденсации W_κ , т.е. количество вещества, достигающее поверхности подложки, будет зависеть от конфигурации испарителя и положки. На практике определяют скорость W_κ , 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:

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

Для точечного испарителя

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

где W_u -скорость испарения, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$;

dS_1 - площадь испарителя, m^2 ;

γ - плотность испаряемого вещества, $\frac{kg}{m^3}$;

x, y - координаты точки на подложке, в которой определяется W_k , m ;

h - расстояние от испарителя до подложки, m .

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 на основе металлов (алюминий Al, хром Cr), сплавов (нихром, РС, МЛТ), керметов. Однако следует помнить, что свойства пленки сильно зависят от конкретных режимов напыления.

Одним из важнейших параметров проводящих и резистивных пленок является удельное поверхностное сопротивление ρ_s

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

где ρ_v - удельное объемное сопротивление пленки, $Om \cdot m$;

d - толщина пленки, m .

При осаждении пленок стремятся обеспечить требуемое значение ρ_s с заданным разбросом этой величины по подложке. Воспроизводимость ρ_s будет зависеть от воспроизводимости свойств пленок и их толщины. Удельное объемное сопротивление пленок ρ_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 473-573 К 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 сопротивление при очень больших скоростях осаждения и высокой температуре подложки коррелирует с имеющим место при этих условиях изменением структуры пленок.

1.4.2. 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).

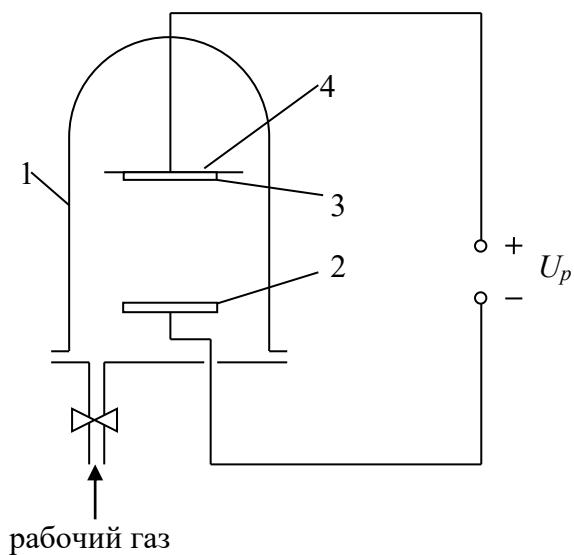


Рис. 1.3. Схема ионно-плазменного распыления: 1 – вакуумная камера; 2 – катод; 3 – подложка; 4 – анод.

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, tantalа, 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, Bi₂Te₃, PbTe и др. с хорошей стехиометрией.

С помощью ионного распыления можно проводить эпитаксиальное наращивание различных металлических и полупроводниковых пленок. При ионном распылении эпитаксиальный рост может происходить при меньших температурах, чем при напылении. Были получены монокристаллические пленки Au, Ag, Fe, Ni, Co и др. на NaCl при комнатной температуре. Венер получил монокристаллические пленки германия на подложке из германия при температуре подложки 300 °C.

Достоинством ионного распыления является возможность получения пленок тугоплавких соединений, таких, как бориды, оксиды, нитриды и др. Процесс распыления практически не зависит от температуры плавления

материала, возможно длительное циклическое напыление, распыление сложных соединений, имеющих различную температуру плавления. Однако следует помнить, что если мишень выполнена из изолирующего материала, то производить распыление на постоянном токе невозможно. При отрицательном потенциале на мишени она зарядится положительно и далее на нее поступать ионы не будут. Поэтому прибегают к распылению на высокой частоте. Еще одним недостатком ионно-плазменного распыления является сильный разогрев подложки, за счет бомбардировки ее электронами. Самым же главным недостатком ионно-плазменного распыления является наличие загрязнений в получаемых пленках, связанное с низким вакуумом в процессе их напыления.

Преднамеренное введение реакционно-способного газа в распылительную среду с целью изменения или управления свойствами пленок называют реактивным распылением. Этим методом были получены пленки изолирующих и полупроводниковых соединений различных металлов. Это достигалось путем введения в распылительную среду кислорода или использования чистого кислорода. Кроме того, были получены нитриды, карбиды и сульфиды с помощью соответственно азота, метана или окиси углерода и сернистого водорода. Для осаждения диэлектриков чаще всего используют смесь инертного газа с относительно небольшой добавкой активного газа. В зависимости от давления активного газа реакция образования соединения может протекать либо на катоде (мишени) и тогда к подложке переносится готовое соединение, либо на подложке в процессе образования пленки. При низких давлениях более вероятен второй из указанных механизмов, при высоких - первый. Считается также, что реакция может протекать и в паровой фазе между атомами распыляемого материала и атомами газа, но такой процесс маловероятен.

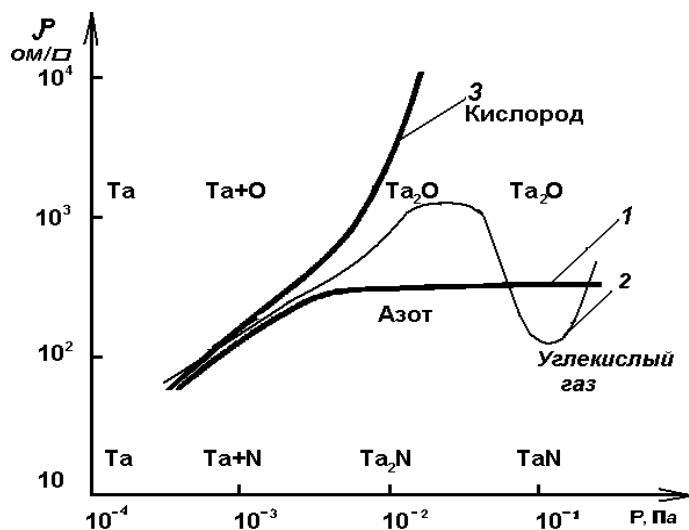


Рис. 1.4 — Зависимость удельного сопротивления пленок тантала от парциального давления активных газов: 1 — азот; 2 — углекислый газ; 3 — кислород

Метод реактивного распыления — один из важнейших в тонкопленочной технологии, позволяющий управляемо изменять свойства пленок. Это можно продемонстрировать на примере распыления тантала в различных средах с добавлением активных газов. На рис. 1.4 показана зависимость удельного сопротивления получаемых пленок от парциального давления активных газов.

Наименьшее из показанных парциальных давлений 10^{-4} Па соответствует остаточному давлению перед напуском рабочего газа, состоящего из смеси аргона и активного газа. Суммарное давление смеси газов составляет 1 Па. По мере повышения давления азота сопротивление растет вследствие захвата пленкой азота с образованием соединения Ta_2N . При дальнейшем увеличении давления азота состав пленок изменяется, пока не образуется фаза, приписываемая TaN . По мере увеличения парциального давления кислорода до относительно высокого уровня пленка по составу приближается к окиси тантала и удельное сопротивление ее быстро увеличивается. При введении окиси углерода образуются пленки карбида тантала с переменным сопротивлением. Таким образом, на основе пленок тантала можно изготовить тонкопленочную интегральную схему с проводниками из тантала, резисторами из нитрида тантала и конденсаторами тантал-окисел тантала-золото.

Ионное распыление является достаточно технологичным методом для получения пленок Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiO_2 путем реактивного или высокочастотного распыления.

Магнитные пленки, служащие носителем информации, такие, как Fe-Ni, с точным содержанием компонент получают как термическим испарением в высоком вакууме, так и в чистых условиях ионным распылением. В первом случае борьба ведется с нестехиометричностью полученной пленки, во втором случае — с процессами окисления осаждаемого слоя.

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

1.4.3. Измерение удельного сопротивления

Для измерения удельного поверхностного сопротивления ρ_s широкое распространение получил четырехзондовый способ. Размещение зондов показано на рис. 1.5.

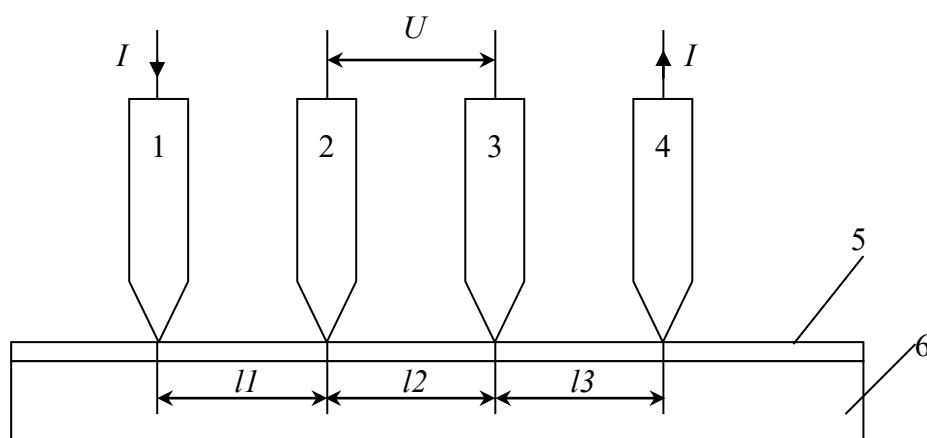


Рис. 1.5. Зондовый метод определения удельного сопротивления:
1–4 – зонды; 5 – пленка; 6 – подложка.

При размещении зондов в линию на материале полубесконечного объема при $l_1=l_2=l_3=l$ объемное удельное сопротивление ρ_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.

1.5. 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 ρ_v
5. Сравнить полученное значение ρ_v для тонкой пленки с ρ_v для массивного материала, взятое из справочника или определенное экспериментальным путем.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Изучение погрешности изготовления тонкопленочных резисторов

2.1. 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.

2.2. Схема экспериментальной установки

Схема вакуумной установки УВН-2М приведена в разделе 1.2. Описание экспериментальной установки приведено в разделе 1.3.

2.3. Краткие теоретические сведения.

2.3.1. 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

$$R = \frac{\rho_v \cdot l}{b \cdot d}, \quad (2.1)$$

где R – сопротивление резистора, Ом;

ρ_v – удельное объемное сопротивление материала резистивной пленки, Ом·м;

l, b, d – соответственно длина, ширина и толщина резистора (рис. 2.1).

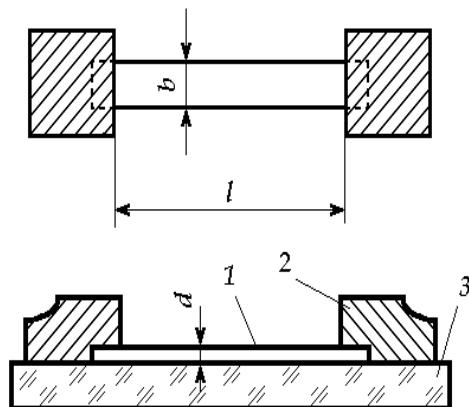


Рис. 2.1. Тонкопленочный резистор: 1 - резистивная пленка; 2 - контактная пленка проводящего материала; 3 - подложка.

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 ρ_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 ρ_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

$$R = \rho_s \frac{l}{b} = \rho_s K_\phi, \quad (2.2)$$

где K_ϕ – 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 tantal с сопротивлением (100-200) Ом/◻ и ТКС порядка $(5-10) \cdot 10^{-4}$ 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 никрома с толщиной 20-50 нм имеют $\rho_s = (50-300)$ Ом/◻ и ТКС - $2 \cdot 10^{-4}$ 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) Ом/ \square и ТКС - (60-150) $\cdot 10^{-5}$ 1/град.

Для получения резистивных пленок с $\rho_s = 1$ кОм/ \square 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 ρ_s , которое удалось получить для этих резисторов, составляет 20 кОм/ \square . Однако практически используются резисторы на основе Cr-SiO с ρ_s не более 2000 Ом/ \square .

В последнее время разработаны специальные сплавы, например, сплав РС-1004 для высокоомных резисторов с удельным сопротивлением 40-50 кОм/ \square . 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, In₂O₃ и др. являются высокоомными материалами, но мало изучены и не применяются для изготовления тонкопленочных резисторов.

2.3.2. 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. 2.2).

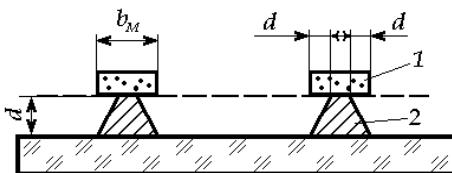


Рис. 2.2. Процесс переноса изображения с контактной маски 1 на резистивную пленку 2.

С учетом абсолютных погрешностей получим

$$b_p + \Delta b_R = (b_p + \Delta b_m) - 2(d + \Delta d), \quad (2.3)$$

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

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

отсюда

$$\frac{\Delta b_R}{b_p} = \frac{\Delta b_m}{b_p} - 2 \frac{d}{b_p} \left(1 + \frac{\Delta d}{d} \right), \quad (2.4)$$

где $\frac{\Delta b_R}{b_p}, \frac{\Delta b_m}{b_p}, \frac{\Delta d}{d}$ – относительные погрешности собственно ширины резистора δb_R , маски δb_m и толщины δd .

Абсолютная погрешность изготовления контактной фоторезистивной маски определяется ошибкой изготовления фотошаблона $\Delta b_{\phi u}$, ошибкой на операции совмещения и экспонирования $\Delta b_{\text{експ}}$ (параметр установки) и ошибкой Δb_{np} , возникающей на операции проявления, равной удвоенной толщине слоя фоторезиста. Для подсчета полной ошибки контактной маски следует применить закон сложения ошибок

$$\Delta b_m = \sqrt{\Delta b_{\phi u}^2 + \Delta b_{\text{експ}}^2 + \Delta b_{np}^2}. \quad (2.5)$$

Погрешность по толщине Δd 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 ± 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

$$\Delta b_{\text{зан}} = |2dn|,$$

где d – толщина напыляемой пленки;

n – число напылений.

Допустимое число напылений зависит от размеров окон и требуемой точности.

Ошибки подпыления и затенения, возникающие в процессе напыления, поясняются рис. 2.3. 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. 2.3. ошибка затенения определяется

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

где x – удаление элемента от центра подложки;

h – кратчайшее расстояние от испарителя до подложки;

s – зазор между трафаретом и подложкой;

t – толщина трафарета.

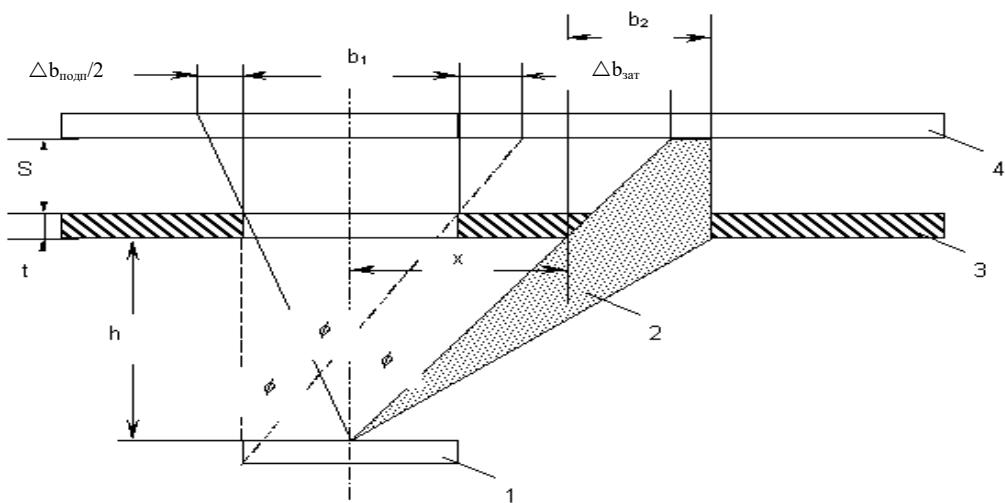


Рис. 2.3. К расчету ошибок подпыления и затенения: 1 - испаритель; 2 - молекулярный поток; 3 - свободная маска (трафарет); 4 - подложка

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. 2.3 для точечного испарителя

$$\frac{\Delta b_{node}}{2} = s \cdot \operatorname{tg} \varphi = s \cdot \frac{b/2}{h+t}.$$

При $t \ll h$

$$\Delta b_{node} = \frac{s \cdot b}{h}.$$

Для поверхностного испарителя (рис.2.3)

$$\Delta b_{node} = \frac{s(L+b)}{h},$$

где b – 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

$$\Delta b_{han} = \sqrt{\Delta b_{san}^2 + \Delta b_{sam}^2 + \Delta b_{node}^2}.$$

С учетом ошибки изготовления трафарета

$$\Delta b = \sqrt{\Delta b_{traf}^2 + \Delta b_{han}^2}.$$

Погрешность по длине рассчитывается аналогично.

2.4. 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 контактом из меди
3. Произвести измерения геометрических размеров тонкопленочных резисторов и рассчитать погрешности для двух методов напыления.
4. Измерить сопротивления резистора (второй образец).
5. Измерить толщину резистивной пленки и рассчитать величину удельного объемного сопротивления ρ_v (2.1).
6. Сравнить полученное значение ρ_v для тонкой пленки вольфрама с ρ_v для массивного материала, взятое из справочника или определенное экспериментальным путем.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Изготовление и исследование тонкопленочных конденсаторов

3.1. 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).

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

Схема вакуумной установки УВН-2М приведена в разделе 1.2. Описание экспериментальной установки приведено в разделе 1.3.

3.3. Краткие теоретические сведения.

3.3.1. Параметры тонкопленочных конденсаторов

Тонкопленочный конденсатор (ТПК) конструктивно представляет собой многослойную структуру, в простейшем случае состоящую из двух металлических обкладок, разделенных слоем диэлектрика (рис. 3.1).

Основные электрические параметры ТПК: емкость C , рабочее напряжение $U_{раб}$, тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$) и эксплуатационные параметры определяются многочисленными факторами, в том числе материалами, способами напыления, толщиной пленок и др.

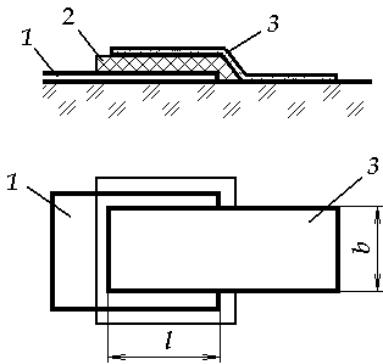


Рис. 3.1 Тонкопленочный конденсатор. 1 - нижняя обкладка; 2 - диэлектрик; 3 - верхняя обкладка; l и b - длина и ширина площади перекрытия верхней и нижней обкладок конденсатора.

Конструкция и технология изготовления конденсаторов имеют ряд особенностей. Емкость конденсатора определяется как

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot s}{d} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot l \cdot b}{d}, \quad (3.1)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная;

ϵ – 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

$$C_0 = \frac{C}{s} = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0}{d}.$$

Чем больше C_0 , тем меньшую площадь занимает конденсатор на подложке. Надо выбирать материалы с большим ϵ 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.

$$U_{pa\delta} = \frac{U_{np}}{K_3} = \frac{E_{np} \cdot d}{K_3},$$

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

Из последнего соотношения можно сформулировать условие выбора минимальной толщины диэлектрика

$$d \geq \frac{U_{pa\delta} \cdot K_3}{E_{np}}.$$

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

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

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

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

C – емкость конденсатора;

ω – угловая частота;

ρ_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 ρ_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 °C и стабильную работу ТПК.

3.3.2. 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_2 до чистой SiO , образует малодефектную и гладкую пленку. При температурах испарения более 1250 °C SiO диссоциирует в испарителе с выделением свободного кремния, который может увеличивать \mathcal{E} пленок до 10. При этом свойства пленок ухудшаются.

Пленки окиси тантала (Ta_2O_5) 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_2O_5 сильно зависит от материалов электродов и способов их получения.

Пленки окиси алюминия (Al_2O_3) с $\varepsilon = 8 - 10$ получают ионно-плазменным распылением, электронной бомбардировкой, анодным окислением. При испарении исходного вещества Al_2O_3 с помощью электронного луча пленки на подложке получаются нестехиометрического состава с дефицитом кислорода, что приводит к ухудшению свойств пленок.

При испарении окислов титана (TiO_2) и циркония (ZrO_2) получаются соответственно пленки с $\varepsilon = 30 - 40$ и $\varepsilon = 20 - 22$. Электрическая прочность и другие параметры ТПК зависят от способов получения диэлектрических пленок и материала обкладок. Для плотных пленок TiO_2 и ZrO_2 с электродами из алюминия электрическая прочность составляет $E_{np} = 1 \cdot 10^6 B / см$. Для изготовления конденсаторов малой емкости могут использоваться пленки на основе боросиликатного стекла (80 % SiO_2 и 20 % B_2O_3), имеющие $\varepsilon = 4$ и $E_{np} = 5 \cdot 10^6 B / см$. Получаются такие пленки методом взрывного испарения.

3.3.3. Выбор материала обкладок

К материалам обкладок предъявляются следующие требования: низкое сопротивление 0,05-0,2 Ом/ \square , 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 разбрзгивание, 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:

Al-SiO-Al - $2 \cdot 10^6$ 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-Ta₂O₅-Au, обеспечивающая хорошие параметры.

3.4. 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.

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Технологический процесс фотолитографии

4.1. Цель работы

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

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

Схема вакуумной установки УВН-2М приведена в разделе 1.2. Описание экспериментальной установки приведено в разделе 1.3.

4.3. Краткие теоретические сведения.

4.3.1. 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** (ФШ) 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 (рис.4.1).

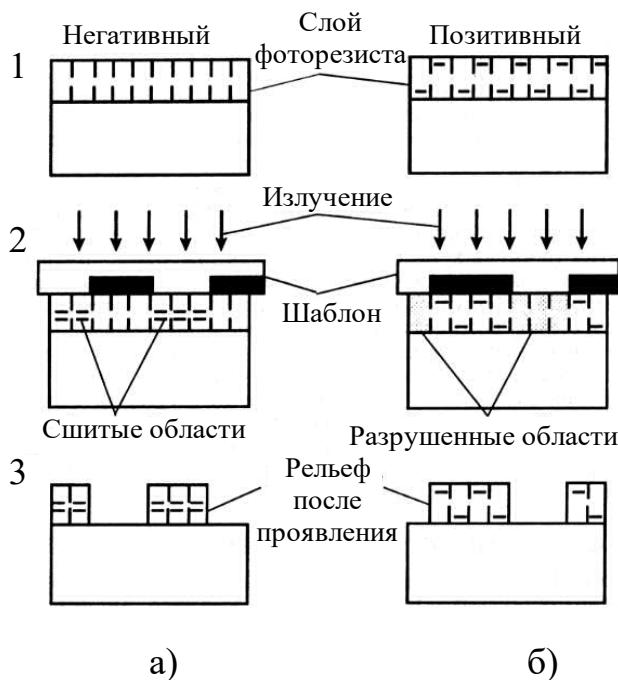


Рис. 4.1. Схемы процесса фотолитографии с негативным (а) и позитивным (б) фоторезистами.

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 молекулями которого связана коричная кислота, представляющая собой светочувствительный компонент (циннаомильная группа). В структуре коричной кислоты имеются группы с относительно малой энергией связи ΔH . При воздействии света с энергией кванта $h\nu \geq \Delta H$ происходит разрыв связей между молекулами ПВЦ. В результате исходные молекулярные цепочки ПВЦ образуют трехмерную структуру. Интенсивное поглощение света фоторезистом на основе ПВЦ, приводящее к образованию трехмерной структуры, начинается с длины волн λ менее 320 нм. Граница поглощения сдвигается в сторону более длинных волн (360-410) нм при добавлении сенсибилизатора.

Фоторезисты на основе ПВЦ имеют удовлетворительную кислотостойкость, но они не выдерживают воздействия концентрированной плавиковой кислоты. Повышенной кислотостойкостью обладают негативные ФР на основе каучуков с различными добавками. Каучуки не являются светочувствительными веществами, поэтому в состав ФР вводят светочувствительные диазосоединения. Под действием света молекула диазосоединения разлагается с потерей молекулы азота, образуя новые вещества - нитрены, которые вступают в реакцию с макромолекулами каучука. В результате образуется стойкая трехмерная структура.

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.

Важным компонентом ФР являются растворители, от которых зависят стабильность жидкых растворов, характеристики нанесения и качество слоя ФР и др.

Основными параметрами ФР являются **светочувствительность, разрешающая способность, химическая стойкость** к травителям. Светочувствительность S - это величина, обратная экспозиции, т.е. количеству световой энергии, необходимой для облучения ФР, чтобы перевести его в нерастворимое (негативный ФР) или растворимое (позитивный ФР) состояние

$$S = \frac{1}{H} = \frac{1}{(Et)},$$

где H - экспозиция (доза облучения);

E - энергооблученность;

t - длительность облучения (или плотность потока энергии на поверхность фотослоя).

Критерием светочувствительности ФР служит четкость рельефа рисунка в его слое после проведения процессов экспонирования и проявления. При этом рельеф рисунка должен иметь резко очерченную границу между областями удаленного и оставшегося на поверхности подложки слоя ФР.

Негативный ФР можно рассматривать как фоточувствительный материал с эффективной пороговой энергией E_n . Если энергия фотонов E ,

падающих на резист, меньше пороговой энергии, то резист удаляется в процессе проявления. Если же $E > E_n$, то резист становится нерастворимым в проявителе и получающееся изображение действует как защитная маска. Величина E_n зависит от многих факторов: типа ФР, толщины ФР, материала подложки и др. Приблизительная оценка E_n может быть получена из характеристической кривой резиста - зависимости глубины проявления от энергии экспонирования или экспозиции H (рис.4.2). Характеристическая кривая представляет собой зависимость отношения толщины полимеризованной пленки d_s к ее исходной толщине d_0 от $\lg H$. Интенсивные фотохимические реакции для негативного ФР начинаются при экспозиции H_1 , что соответствует пороговой чувствительности ФР $S_n = 1/H_1$. При величинах энергии, превышающих пороговое значение в 2-3 раза растворяется очень незначительная часть пленки негативных ФР. В качестве критерия светочувствительности S_0 была выбрана d , составляющая 90 % от исходной толщины. Это соответствует экспозиции H_2 и $S_0 = 1/H_2$.

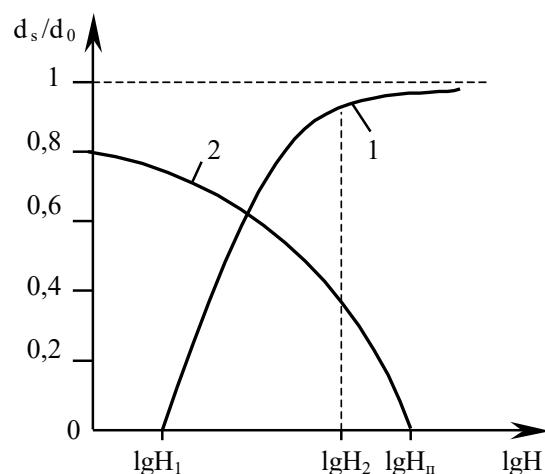


Рис. 4.2. Характеристические кривые для негативных (1) и позитивных (2) ФР

В соответствии с законом Бугера-Ламберта интенсивность света, а, следовательно, и экспозиция уменьшается с увеличением глубины проникновения энергии в ФР, т.е. по экспоненциальному закону

$$H_d = H_0 \exp(-\mu d),$$

где H_0 - экспозиция на поверхности ФР;

μ - коэффициент поглощения энергии материалом ФР, зависящий от длины волны экспонирующего излучения;

d - глубина проникновения энергии в ФР.

Экспозиция на поверхности фоторезиста, при которой он прорабатывается на глубину d , будет равна

$$H_0 = H_d \exp(\mu d),$$

$$\text{отсюда } d = (\lg H_0 - \lg H_d) / (\mu \lg e).$$

Толщина сшитого слоя пропорциональна $\lg H$. Последнее уравнение описывает линейный участок характеристической кривой (интервал $H_1 - H_2$). Кривая справедлива только для конкретной марки и толщины ФР.

Позитивный ФР имеет аналогичную характеристическую кривую, но в зеркальном изображении (см.рис. 4.2). Растворимость позитивного резиста в проявителе имеется даже при нулевом значении H . При увеличении энергии она значительно возрастает до тех пор, пока при некотором пороговом значении H_n не наступит полная растворимость. При экспонировании позитивного фоторезиста необходимо облучение с большей энергией (большее время экспонирования), чем для негативного фоторезиста. Следовательно, эффективность экспонирования позитивного ФР меньше по сравнению с эффективностью экспонирования негативного ФР.

Более полную информацию о поведении позитивного фоторезиста дает зависимость скорости проявления V_{np} от экспозиции, представленная на рис.4.3. 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 [2]. Она определяется при H_2 , когда скорость проявления достигает максимума $S_0 = 1/H_2$.

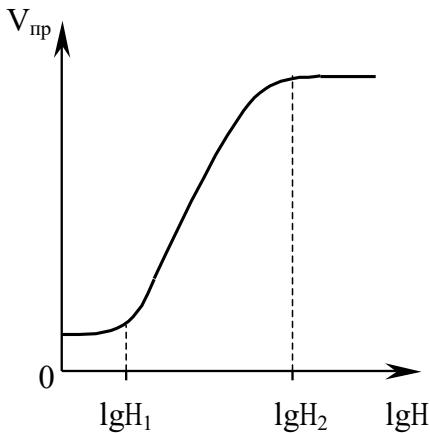


Рис. 4.3. Зависимость скорости проявления позитивного ФР от экспозиции

Таким образом, критерием светочувствительности **негативного** ФР является образование после экспонирования и проявления на поверхности подложки локальных полимеризованных участков - рельефа рисунка. Критерием S 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 умещающихся в одном миллиметре. Разрешающая способность определяется путем экспонирования ФР через штриховую миру, 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.4.4). Однако нижний предел толщины слоя ФР обусловлен снижением защитной способности таких слоев. При $d < 0,2$ мкм возрастает растрывливание 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. Для получения изображений элементов с размерами 5-10 мкм необходимо выбирать фоторезист с $R=500-1000$ линий/мм.

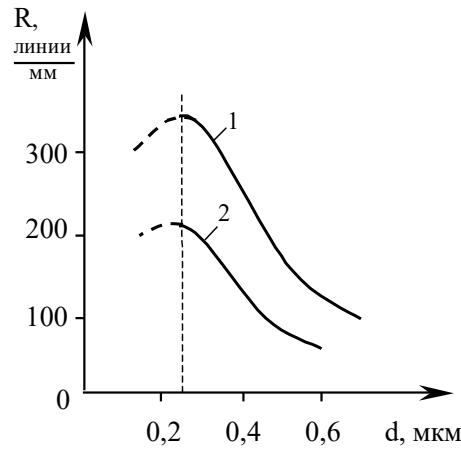


Рис. 4.4. Зависимость разрешающей способности негативного фоторезиста (1) и фотолитографического процесса в целом (2) от толщины фоторезиста

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 растрепливание 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 подтрава l или фактором травления $K = d/l$, где d - глубина травления (рис.4.5). Чем меньше боковое подтравливание l при заданной глубине травления, тем выше стойкость фоторезиста к травителю. На негативном фоторезисте боковой подтрав составляет 1-2 мкм, на позитивном фоторезисте на основе НХД - порядка 0,3-0,4 мкм.

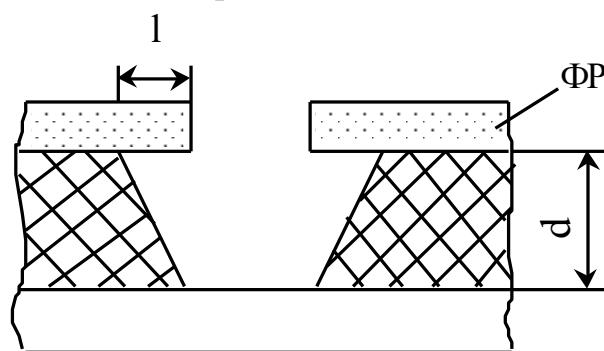


Рис. 4.5. Боковой подтрав

Адгезия - это способность слоя ФР препятствовать проникновению травителя к подложке по периметру рельефа рисунка элементов. Стабильность свойств ФР характеризуется их сроком службы.

Выбор толщины фотополимера 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.

4.3.2. Способы экспонирования

В оптической литографии используется три способа:

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

При контактной фотолитографии фотошаблон находится в непосредственном контакте со слоем ФР на подложке (рис.4.6). 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. Рассмотрим особенности прохождения света в негативных и позитивных ФР (рис.4.7).

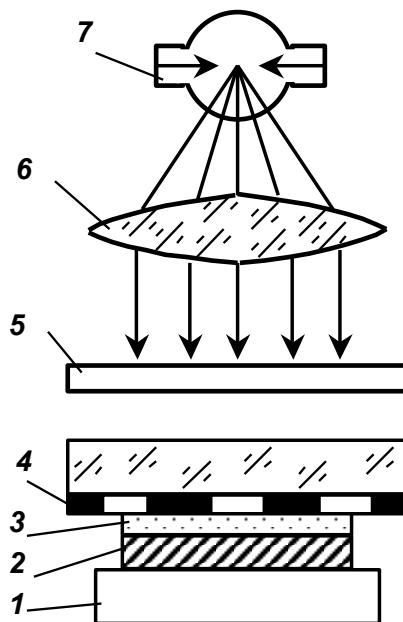


Рис. 4.6. Схема контактной фотолитографии

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

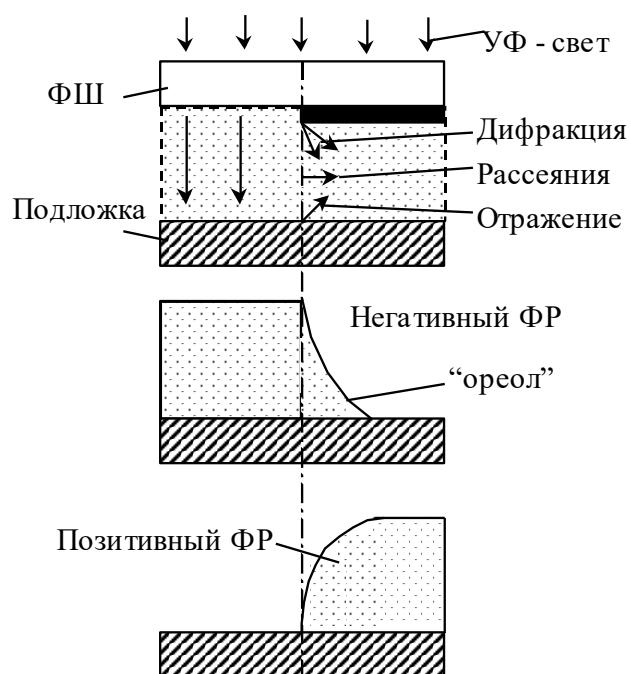


Рис. 4.7. Прохождение света в негативном и позитивном ФР.

При прохождении света наблюдаются дифракция на границе темного и светлого полей на ФШ, рассеяние света в слое ФР и отражение света от подложки. За счет отражения света область негативного ФР полимеризуется и удерживается при проявлении за счет сил сцепления с подложкой. В результате этого в негативных ФР образуется "ореол", ухудшающий разрешающую

способность ФР. В позитивных ФР при проявлении вымывается только верхняя часть рисунка, что не влияет на разрешающую способность. Отсюда следует, что разрешающая способность позитивного ФР будет лучше, чем негативного ФР. Для уменьшения дифракции надо использовать для экспонирования более коротковолновое излучение с $\lambda=220\text{-}260$ нм.

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.

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.4.8).

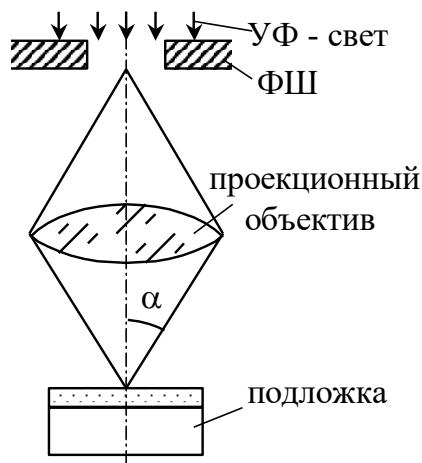


Рис. 4.8. Перенос изображения в проекционной ФЛ

Качество проекционного объектива характеризует такой параметр, как числовая апертура

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

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

α - половина максимального угла расходности 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 числовой апертура объектива, тем выше его разрешающая способность.

Важным параметром проекционной системы является глубина резкости Δf , определяемая как

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

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

4.4 Задание на работу

1. Нанести фоторезист на положки с различной скоростью вращения центрифуги. Определить толщину слоя фоторезиста путем измерения на интерферометре МИИ-4.
2. Провести процесс экспонирования через тестовый фотошаблон в режиме контактного и проекционного экспонирования.
3. Определить разрешающую способность для фоторезистов разной толщины.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 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.

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 хаотическим 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).

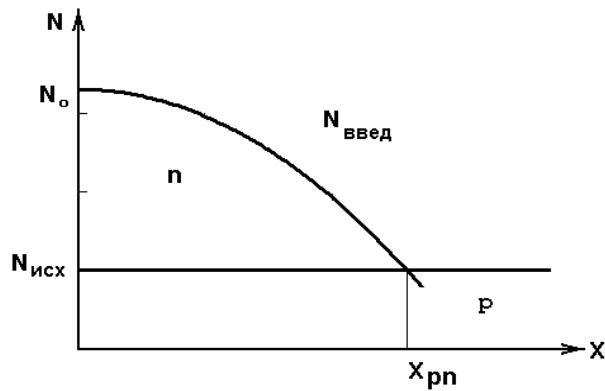


Рис. 5.1. Распределение примеси в полупроводнике при термической диффузии.

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. Выбор легирующего элемента среди названных производится с учетом скорости диффузии и предельной растворимости примеси (табл.5.1). Предпочтение отдается веществам, имеющим высокие предельную растворимость и скорость диффузии. Как видно из рисунка 5.2, максимальной предельной растворимостью примесных элементов в кремнии обладают мышьяк, бор и фосфор. Кроме того бор и фосфор имеют высокую скорость диффузии. Поэтому из всех предложенных элементов наиболее широкое применение получили именно бор и фосфор. Однако при создании мелких эмиттеров (глубина залегания $p-n$ перехода эмиттер-база меньше 2 мкм) и скрытых слоев большая скорость диффузии нежелательна. В первом случае это приводит к слишком малому технологически неуправляемому времени диффузии, а во втором случае к размытию границы скрытый слой - эпитаксиальная пленка. В этом случае используют элементы, имеющие малую скорость диффузии, такие, как мышьяк и сурьму.

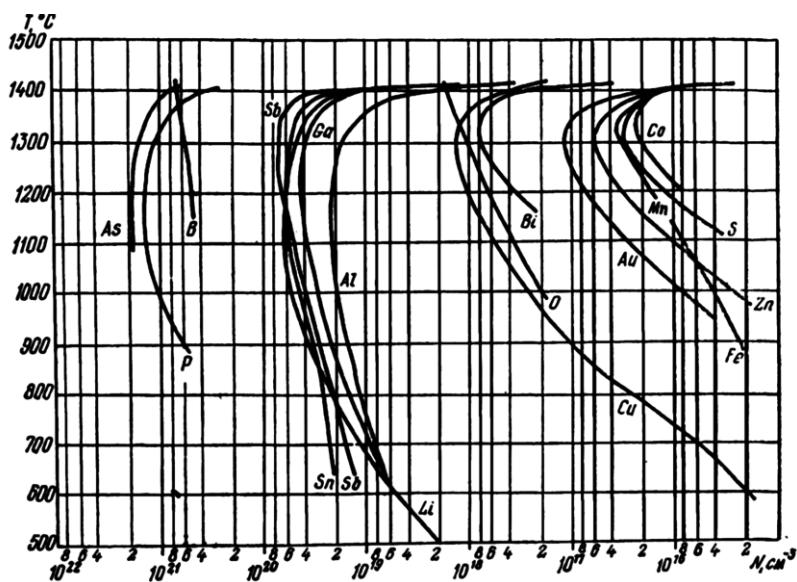


Рис. 5.2. Зависимость предельной растворимости примесных элементов в кремнии от температуры

Скорость процесса диффузии определяется коэффициентом диффузии D , равным числу атомов, проходящих через площадку в 1 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 и имеет вид

$$D = D_0 \exp(-E_a / kT), \quad (5.1)$$

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.

Свойства элементов, используемых в качестве легирующих примесей кремния, приведены в табл.5.1. Однако, используя уравнение Аррениуса, невозможно произвести точный расчет коэффициента диффузии, поскольку он не учитывает влияния вакансий и других дефектов решетки, а также влияние концентрации исходной и диффундирующей примесей.

Таблица 5.1 – Свойства различных элементов как легирующих примесей кремния

Элемент	Энергия активации, эВ	Кажущийся коэффициент диффузии, $\text{см}^2\text{с}^{-1}$	Коэффициент сегрегации	Предельная растворимость при $T=1473 \text{ К, см}^{-3}$
Бор	3,7	11,5	0,3	$5 \cdot 10^{20}$
Галлий	3,5	3,3	20	$4 \cdot 10^{19}$
Индий	3,9	16	10000	10^{19}
Фосфор	4,4	1400	10	$1,2 \cdot 10^{21}$
Мышьяк	3,6	0,44	10	$1,7 \cdot 10^{21}$
Сурьма	3,9	4	10	$6 \cdot 10^{20}$

Математическое описание диффузионных процессов предложено Фиком в виде двух законов, основанных на уравнениях теплопроводности. Первый закон Фика характеризует скорость проникновения атомов одного вещества в другое при постоянном во времени потоке этих атомов и неизменном градиенте их концентраций

$$I = -D \left(\frac{dN}{dx} \right)_t, \quad (5.2)$$

где I – плотность потока вещества, проходящего через единицу площади в единицу времени, $\text{см}^2\text{с}^{-1}$;

$\frac{dN}{dx}$ – градиент концентрации примеси в направлении диффузии;

Второй закон Фика определяет скорость накопления растворенной примеси в любой плоскости, перпендикулярной направлению диффузии

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2}. \quad (5.3)$$

Решение уравнений Фика при различных граничных и начальных условиях позволяет определить профиль распределения примеси при конкретных параметрах процесса диффузии. При создании диффузионных профилей в элементах интегральных схем осуществляют диффузию из неограниченного источника примеси и из ограниченного источника в полубесконечный полупроводник.

Диффузия из неограниченного источника предполагает такое состояние системы, когда количество примеси, уходящей из приповерхностного слоя полупроводника в его объем, равно количеству примеси, поступающей в приповерхностный слой. Это возможно, когда концентрация примеси источника заметно не изменяется в процессе диффузии. Границные условия для этого случая могут быть записаны

$$\begin{aligned} N(x > 0, t = 0) &= 0 \\ N(x = 0, t \geq 0) &= N_0 \\ N(x \rightarrow \infty, t > 0) &= 0, \end{aligned} \tag{5.4}$$

где x - расстояние от поверхности;

$x=0$ - координата поверхности, через которую происходит диффузия;

N_0 – поверхностная концентрация примеси, поддерживаемая постоянной в течение всего процесса;

$N(x, t)$ – концентрация примеси на любой глубине в любое время;

t – время диффузии.

Диффузия из 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, полученное при решении уравнения (5.3) при граничных условиях (5.4), имеет вид

$$N = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \quad (5.5)$$

где N_0 – концентрация примеси на поверхности пластины;

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

$$\operatorname{erfc} y = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp(-y^2) dy,$$

D – коэффициент диффузии при температуре загонки;

t – время загонки.

Дозу легирования Q , т.е. число атомов примеси, введенное в кристалл на этапе загонки за время диффузии через площадку в 1 см^2 , можно получить, используя первый закон Фика (5.2), подставляя вместо N его значения из уравнения (5.5)

$$\begin{aligned} I_{x=0} &= -D \left(\frac{dN}{dx} \right)_{x=0} = DN_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{2\sqrt{Dt}} \exp \left[-\frac{x^2}{4Dt} \right]_{x=0} = \\ &= N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}}. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Интегрируя полученное выражение по времени, определим дозу легирования

$$Q = \int_0^t Idt = \int_0^t N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi}} t^{-1/2} dt = 2N_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} = 1,13N_0 \sqrt{Dt}. \quad (5.7)$$

Для уменьшения температурного воздействия (уменьшения влияния фактора Dt) поверхностную концентрацию на этапе загонки выбирают максимально возможной, т.е. соответствующей предельной растворимости примеси при данной температуре. Температурная зависимость предельной растворимости для разных веществ представлена на рис.5.2. Заменив N_0 на величину предельной растворимости N_p , уравнение (5.7) примет вид

$$Q = 1,13 N_p \sqrt{Dt}. \quad (5.8)$$

Учитывая закон распределения примеси в полупроводнике на этапе загонки, можно представить профили распределения примеси в полупроводнике при разных временах загонки (рис. 5.3).

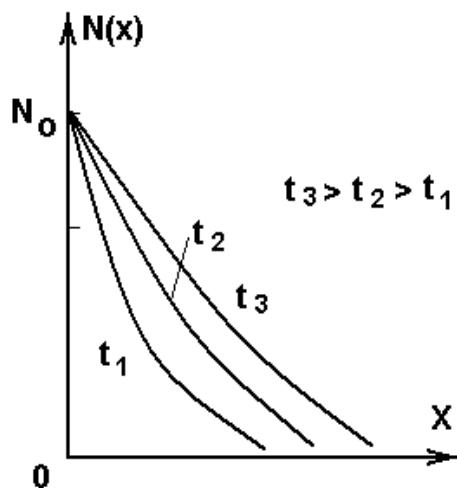


Рис. 5.3. Профиль распределения примеси на этапе загонки

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. Границные условия для решения уравнения Фика на этапе разгонки имеют вид

$$\begin{aligned} N(t=0, x=0) &= N_p \\ N(t>0, x \rightarrow \infty) &= 0, \end{aligned} \quad (5.9)$$

а профиль распределения примеси при этом описывается уравнением Гаусса

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (5.10)$$

где N_0 – концентрация примеси на поверхности диффузионной области, полученная в результате разгонки примеси в течение времени разгонки t . D – коэффициент диффузии при температуре разгонки.

Данное выражение описывает истинное распределение примеси тем точнее, чем тоньше слой, из которого происходит диффузия. Оно получено в предположении, что поступление примеси в кристалл извне и испарение из кристалла практически отсутствуют. На практике этап разгонки заключается в нагреве пластин в окислительной среде. Образующаяся окисная пленка предохраняет введенную примесь от испарения. Распределение примеси по глубине представлено следующими зависимостями, представленными на (рис.5.4).

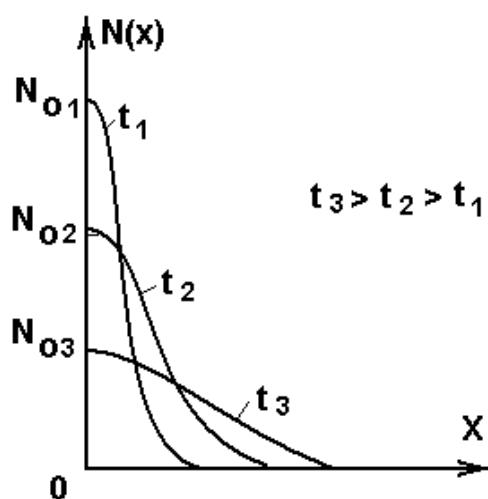


Рис. 5.4. Профили распределения примеси на этапе разгонки

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

$$x_{pn} = 2\sqrt{Dt} \left(\ln \frac{N_0}{N_{ucx}} \right)^{1/2}. \quad (5.11)$$

Решающими технологическими факторами процесса диффузии являются время диффузии, температура, растворимость примеси, свойства источника диффузанта, условия на поверхности и т.д. Точность поддержания этих параметров определяет стабильность и качество диффузионных структур, а, следовательно, и элементов ИМС.

5.2.2. 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 ρ_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. 5.13).

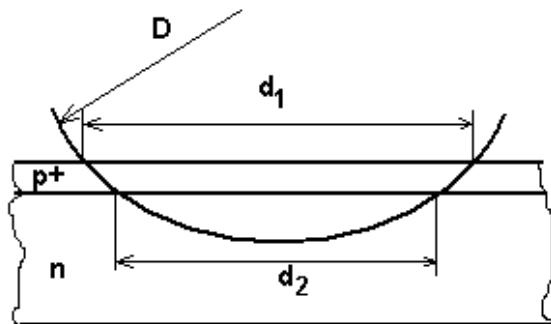


Рис. 5.13. Измерение сферического шлифа.

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

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

Поверхностное сопротивление слоя ρ_s может быть измерено с помощью мостовой схемы (рис.5.14) четырехзондовым методом.

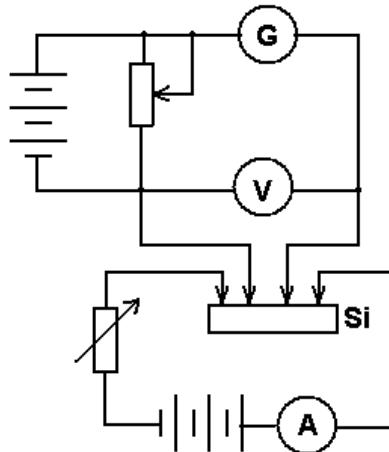


Рис. 5.14. Схема измерения удельного поверхностного сопротивления полупроводниковых материалов четырехзондовым методом.

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

$$\rho_s = 4,53 \frac{U}{I}. \quad (5.36)$$

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. Рассчитать режимы для второй стадии диффузии.