

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический  
университет»

**Факультет «Магистратура»**

В.П. Шелохвостов

**МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

Утверждено Методическим советом ТГТУ  
в качестве лабораторного практикума для студентов  
магистратуры, обучающихся по направлению 211000.68  
«Конструирование и технология электронных средств»



Тамбов  
2013

Рецензент  
к.т.н., доцент С.Н. Баршутин

Микро- и наноэлектроника: Лаб. практ. /Сост.: В.П.  
Шелохвостов, Тамбов: ТГТУ, 2013. – 60 с.

Утверждено Методическим советом ТГТУ  
(протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_)

Лабораторная работа №1

**Микроанализ структур интегральных устройств**

Цель работы:

- знакомство с микроструктурой элементов интегральных микросхем;
- знакомство с топологией гибридных интегральных схем

Приборы, устройства и образцы: оптический микроскоп типа МБС-9, МИМ-8М; коллекция образцов ИМС с открытой поверхностью; микрофотографии поверхности ИМС.

Структура и топология элементов ИМС

**Пленочные транзисторы** использовались до настоящего времени ограниченно ввиду низкой воспроизводимости выходных параметров при использовании достигнутого ранее уровня технологии. Развитие молекулярно-лучевой эпитаксии, проработка технологии активных элементов на поликристаллическом и аморфном кремнии позволят в дальнейшем восполнить этот пробел. Однако в настоящее время в пленочных ИМС используются полупроводниковые транзисторы и диоды как компоненты, т.е. сборочные единицы, выполняемые в отдельном технологическом процессе.

**Пленочные резисторы** как элементы различаются большим конструктивным разнообразием и частично представлены на рисунке 1.

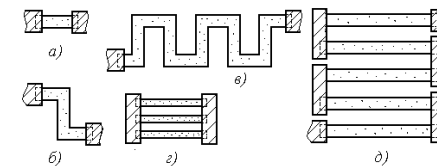


Рисунок 1 Пленочные резисторы: а - полосковый ; б - z-образный; в – меандр; г, д – составные.

При использовании различных резистивных материалов и выбранных топологий в пленочном исполнении можно выполнять широчайший диапазон номинальных значений. Если требуется высокая точность выходных параметров, то можно использовать последующую подгонку. Обычно в этих случаях используют удобные для подгонки конфигурации, например приведенные на рисунке 2.

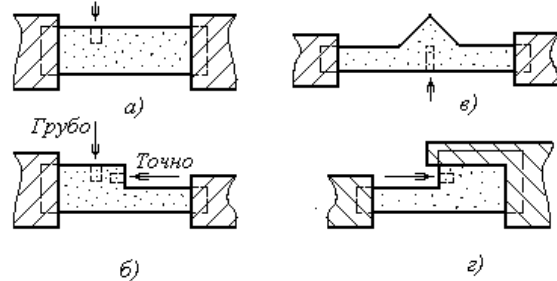


Рисунок 2 Конфигурации плавно подгоняемых тонкопленочных резисторов

Подгонка выходного параметра осуществляется удалением резистивной пленки в направлении, показанном стрелкой. Грубая подгонка достигается подрезкой перпендикулярно продольной оси, плавная – параллельно. Точность плавной подгонки может составлять сотые доли процента и более рационально ее применять для тонкопленочных структур.

В толстопленочной технологии отклонения номиналов после вжигания могут достигать 30-40%. Поэтому конструкции резисторов должны позволять проведение ступенчатой и плавной подгонок. Конфигурации резисторов, удобных для ступенчатой подгонки, показаны на рисунок 3.

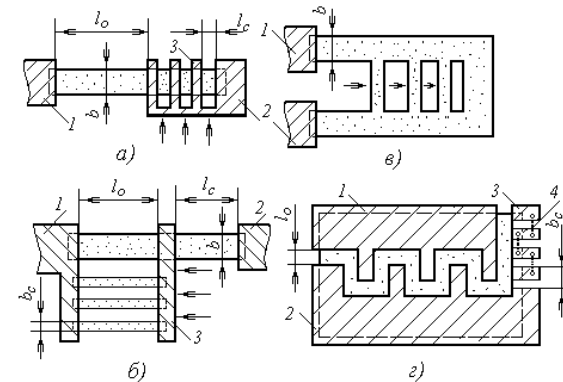


Рисунок 3 Топологии резисторов для ступенчатой подгонки номинала: а,б,в- с увеличением сопротивления; г – с уменьшением сопротивления; 1,2-основные контактные площадки; 3-дополнительные контакты; 4-перемычки.

Технология строится таким образом, чтобы получаемые номиналы резисторов отклонялись в основном в сторону уменьшения. В таком варианте при подгонке последовательно удаляют дополнительные контакты 3 в местах, показанных стрелками, и тем самым добиваются увеличения сопротивления до нужного значения (рисунок 3 а,б). Возможен вариант увеличения сопротивления при удалении в местах по стрелкам перемычек в самом теле резистора (рисунок 3 в). Реже планируется подгонка в сторону уменьшения сопротивления, обычно в сопротивлениях 1-3 Ом. В конструкции резистора (рисунок 3 г) предусматриваются дополнительные контакты 3, последовательное подсоединение которых перемычками 4 увеличивает ширину, а соответственно уменьшает сопротивление.

**Пленочные конденсаторы** являются распространенными элементами пленочных и гибридных ИМС и обеспечивают номинальные значения емкости до 5000 пФ. Основные конструкции представляют собой трехслойные структуры металл-диэлектрик-металл,

различающиеся топологией. Некоторые из конструкций показаны на рисунок 4.

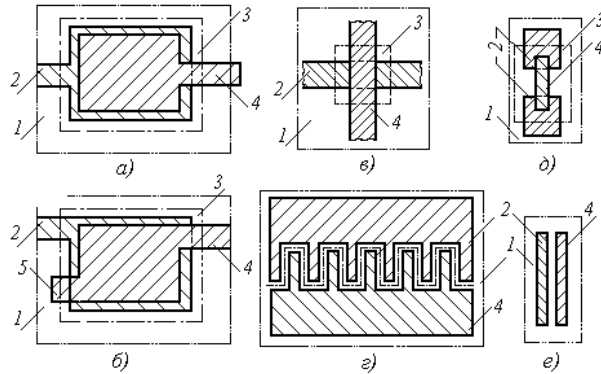


Рисунок 4 Конструкции пленочных конденсаторов:

*а*-трехслойный с выводами в разные стороны; *б*- трехслойный с компенсатором; *в*- в виде пересекающихся дорожек; *г* – гребенчатый; *е*- в виде параллельно расположенных проводящих пленок; 1- подложка; 2- нижняя обкладка; 3-диэлектрик; 4-верхняя обкладка; 5-компенсатор.

Базовой конструкцией следует считать вариант рисунок 4 а. Особенностью такой конструкции является то, что контур диэлектрика выходит за пределы обкладок, а верхняя обкладка вписывается в контур нижней. По этой причине неточность совмещения мало влияет на номинальное значение емкости. Это позволяет выполнять нижнюю обкладку и диэлектрик более простым масочным методом. Активная площадь обкладок может достигать  $5 \text{ мм}^2$ . Диапазон получаемых емкостей в пределах  $3-5 \cdot 10^3$  пФ. Выводы выполняют также в одну сторону или под прямыми углами. Конфигурация обкладок принимается чаще прямоугольная, но может быть и произвольная в зависимости от конфигурации свободных мест на микросхеме.

При малых емкостях погрешность совмещения оказывается значительной и в этом случае (рисунок 4б ) с

противоположной стороны от вывода предусматривается компенсатор 5.

В случае емкостей в десятки пикофарад достаточно пересечения проводящих пленок, разделенных диэлектриком ( рисунок 4 в). Эта конструкция малочувствительна к взаимным смещениям элементов.

Гребенчатые конденсаторы (рисунок 4г ) используют в высокочастотных устройствах. В них роль диэлектрика выполняют подложка и воздушный зазор между обкладками 2 и 4. Диапазон емкостей не превышает 30 пФ.

Если необходимо выполнение емкостей малых номиналов, то можно воспользоваться конструкцией последовательно включенных конденсаторов (рисунок 4 д), а при емкостях в единицы или доли пикофарад использовать как конденсатор два проводника, расположенных на близком расстоянии (рисунок 4 е).

#### **Компоненты гибридных ИМС и микросборок**

Компонентами считают составляющие микросхем, выполняемые вне рассматриваемого процесса и являющиеся в данном случае сборочными единицами. В качестве компонентов могут выступать резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, транзисторные матрицы, полупроводниковые ИМС, индуктивности, дроссели, трансформаторы. Особенностью компонентов является их монтаж в ИМС, который должен обеспечивать сохранение параметров самих компонентов и элементов, рядом с которыми они находятся, сохранение целостности микросхемы в процессе эксплуатации в условиях вибраций, циклических изменений температуры и др.

Выбор компонентов производится по параметрам, декларируемым и регламентируемым производителями. К ним относятся система обозначений, геометрические, технологические характеристики, электрические параметры и другие свойства.

Транзисторы и диоды **обозначаются группой букв и цифр.**

Первая буква в обозначении определяет материал прибора, например Г-германий и его соединения, К-кремний и его соединения.

Вторая буква характеризует тип прибора: Т-транзисторы биполярные, П-транзисторы полевые, Д-диоды.

Третий, четвертый и пятый элементы обозначения характеризуют качественные свойства или назначение прибора, порядковый номер разработки.

Шестой элемент обозначения буквенный от А до Я, обозначает особенности прибора в серии.

Пример: КТ315Б – К –кремниевый, Т- биполярный транзистор, 315 -серия малой мощности.

Разделение по мощности:

- 101-199; 201-299; 301-399 малая мощность  $P_{MAX} \leq 0,3 \text{ Вт}$ ;
- 401-499; 501-599; 601-699 средняя мощность  $0,3 \text{ Вт} < P_{MAX} \leq 1,5 \text{ Вт}$ ;
- 701-799; 801-899; 901-999 большая мощность  $P_{MAX} > 1,5 \text{ Вт}$ .

Способы установки на плату, электрические параметры, габаритные и присоединительные размеры транзисторов приведены на рисунке 5.



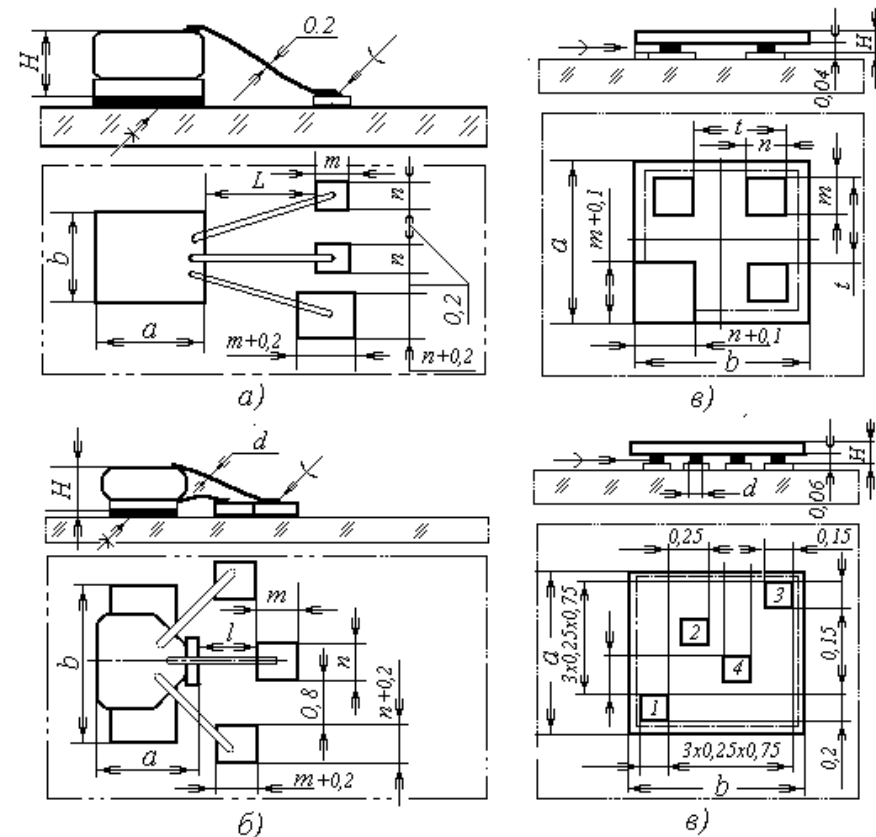


Рисунок 5 Способы установки , габаритные и присоединительные размеры транзисторов

Способы установки на плату, электрические параметры, габаритные и присоединительные размеры диодов, бескорпусных диодных матриц, диодных сборок приведены на рисунке 6.

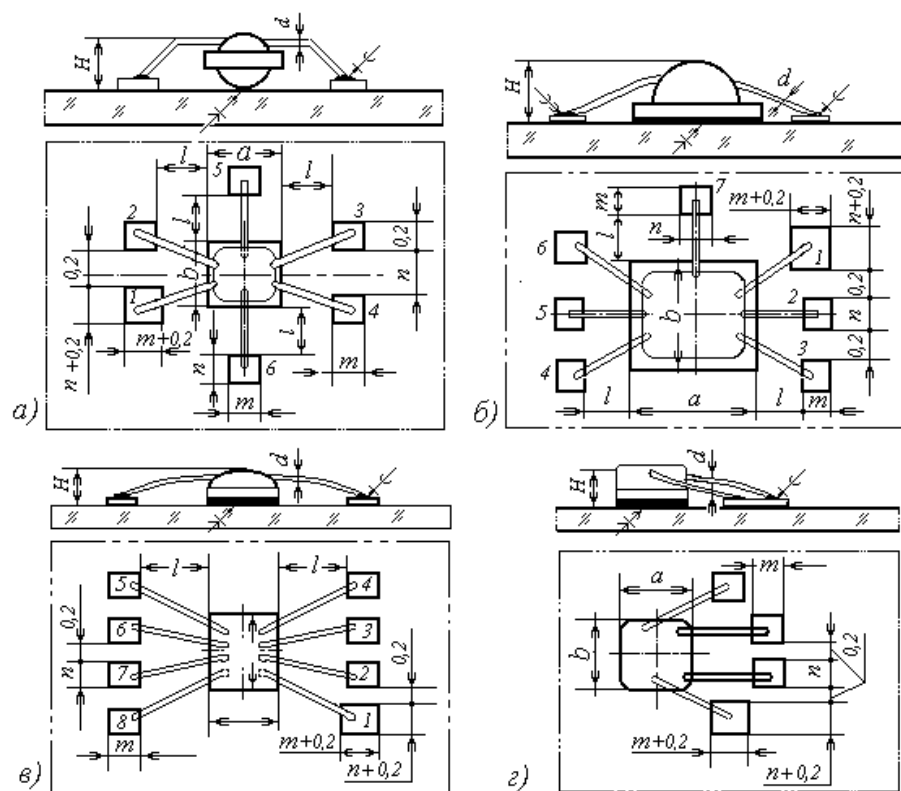


Рисунок 6 Способы установки диодных матриц и сборок на плату

**Конденсаторы** для ГИС предпочтительны в миниатюрном исполнении. Более приемлемы керамические конденсаторы К10-17, К10-9, выпускаемые с посеребренными и лужеными торцами (рисунок 7). Нелуженые монтируются к контактным площадкам гибкими выводами (рисунок 6а), луженые располагаются непосредственно на контактных площадках обкладками и монтируются пайкой (рисунок 7б).

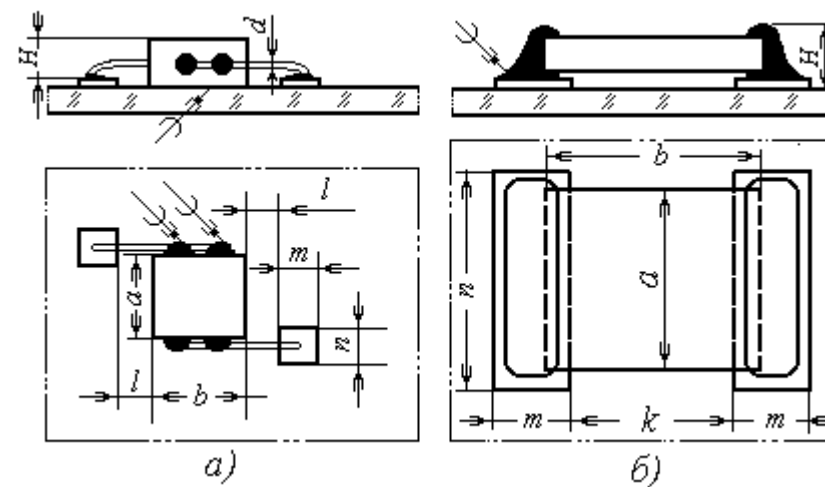


Рисунок 7 Способы установки миниатюрных конденсаторов

Конденсаторы из высокочастотной керамики по виду диэлектрика подразделяются на группы ПЗЗ, М47, М75, М750, М1500, М2200, в обозначении которых буквы означают: П – положительный, М- отрицательный ТКС; цифра указывает среднее значение  $\text{ТКС} \cdot 10^{-6}$  на частотах мегагерцового диапазона. Допустимое отклонение емкости в этих группах составляет  $\pm 5, 10, 20\%$ .

Конденсаторы К10-17 имеют номинальное напряжение 25В, интервал рабочих температур  $-60 \div 80^{\circ}\text{C}$ , сопротивление изоляции не менее 10 МОм.

Конденсаторы с диэлектриком из низкочастотной керамики имеют ненормированный ТКС. К ним относятся К10-9 групп Н30, Н50, Н70, Н90, в которых допустимое отклонение емкости от номинала  $\pm 30, \pm 50, -70 \div 50, -90 \div 50\%$ . Они работают при напряжениях до 16 В в интервале  $-60 \div 125^{\circ}\text{C}$  с сопротивлением изоляции не менее 10 МОм

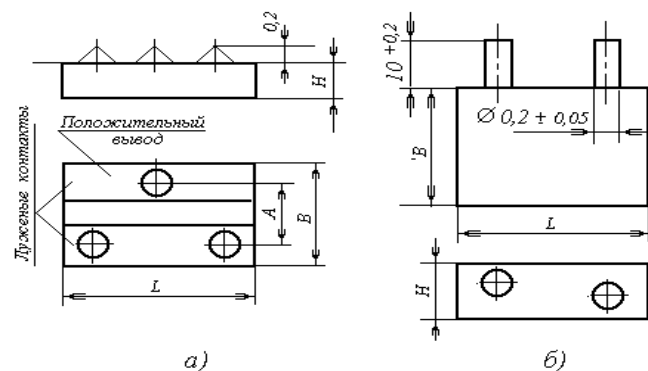


Рис.2.21 Конструкции электролитических конденсаторов: а – конденсаторы К53-15; б- конденсаторы К53-16.

### Порядок выполнения работы

- 1 Просмотреть под микроскопом и проанализировать топологию предложенной гибридной микросхем
- 2 Выделить группы пленочных элементов и компонентов
- 3 Указать причины использования данной элементной базы
- 4 Предложить равноценную замену использованных компонентов

Содержание отчета: фикрофотография топологии ИМС, эскизы вертикальных сечений элементов, результаты анализа и выводы

Дополнительная литература:

- 1 Шелохвостов, В.П. Методы и средства контроля параметров конденсированных сред, содержащих наноструктурные компоненты/ В.П.Шелохвостов, В.Н.Чернышов//Вестник ТГТУ.- 2007.- Т.13, №3, Рубрика 01, Препринт № 21.- 60 с.

## **Синтез наноразмерных углеродных трубок для наноэлектроники**

Цель работы:

- знакомство с методами синтеза материалов для наноэлементов;
- знакомство с оборудованием, материалами, элементами технологии синтеза.

### **Получение нанотрубок. Пиролиз**

Самым удобным источником углерода для синтеза НТ является метан, который не подвергается некаталитическому пиролизу при низких температурах и, следовательно, при оптимальных условиях не вносит примесей аморфного углерода.

Каталитическому пиролизу  $\text{CH}_4$  с образованием НТ посвящено довольно большое число работ, во многих из них для синтеза однослойных НТ (ОНТ) использованы трех компонентные катализаторы, содержащие активный металл (Fe, Co или Ni), промотор (соединения Mo или W) и носитель, препятствующий агрегированию наночастиц активного металла (оксиды Mg, Al, Si и др. металлов). В частности, изучено влияние состава катализатора Co-Mo/MgO на выход и качество НТ и показано, что наибольший выход ОНТ и наименьшее количество примеси аморфного углерода наблюдается при атомном отношении Mo:Co: Mg = 1:5:94.

Ниже приводятся сведения о синтезе нанообъектов на основе катализатора этого состава.

Катализатор синтезировали методом сжигания, который был разработан Патилом. Метод позже был несколько модифицирован: вместо лимонной кислоты применяли глицин, что позволяло подавить образование оксидов азота. В фарфоровой чаше на 250 мл смешивали 10.0 г  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (чда), 0.6 г  $\text{Co}(\text{MO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (ч), 0.073 г  $(\text{MH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (хч), 6.0 г  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$  (ч) и 2.5 мл  $\text{H}_2\text{O}$ . Суспензию нагревали при перемешивании до полного растворения, вносили в печь, нагретую до 550 °С. и выдерживали в ней 20 мин. Удельная поверхность катализатора составляла 110-160 м<sup>2</sup>/г.

Пиролиз  $\text{CH}_4$  (бытовой газ) проводили с использованием установки, которая включала горизонтальный кварцевый трубчатый реактор диаметром 56 мм и длиной 900 мм. Ввод газа осуществляли по специальному патрубку в центр реактора, а вывод - с обоих торцов реактора. Кварцевую лодочку с навеской катализатора (до 4.0 г) помещали в центр реактора. Реактор продували смесью  $\text{CH}_4$  (150 см<sup>3</sup>/мин) и  $\text{H}_2$  (600 см<sup>3</sup>/мин) в течение 10 мин, затем при том же расходе газов нагревали до 900 °С со скоростью повышения температуры

30 К/мин, выдерживали при конечной температуре 1 ч и охлаждали в токе  $\text{H}_2$ .

Полученные продукты очищали от основной массы катализатора нагреванием в 23%-ой  $\text{HCl}$ , промывали дистиллированной водой и сушили при  $110^\circ\text{C}$ . Выход углеродных продуктов определяли по изменению массы катализатора с учетом изменения его массы в холостом опыте (без подачи  $\text{CH}_4$ ) на 16 %.

Зольность продуктов (остаточное содержание катализаторов) определяли после кислотной отмывки гравиметрическим методом путем окисления на воздухе при  $850^\circ\text{C}$ .

Данные электронной микроскопии показали, что получаемые твердые продукты представляют собой смесь относительно прямых или слабоизогнутых НТ с небольшим количеством сильно искривленных, имеющих неровную внешнюю поверхность и внутренние перегородки нановолокон. Это позволяет предположить, что в исследованных условиях пиролиз протекал одновременно по двум известным механизмам: вершинному и корневому. При вершинном росте частицы катализатора находятся на кончике растущего волокна (на рис. 1 некоторые из этих частиц представлены темными округлыми образованиями), при корневом остаются на поверхности носителя и вызывают

рост НТ. Ранее «двойственный» механизм наблюдался при пиролизе  $C_2H_4$  в мягких условиях (550 °C) на катализаторе Fe - Mo/ $Al_2O_3$  [12].

Основной углеродной формой в продуктах пиролиза являются НТ с числом слоев от одного до четырех с преобладанием ДНТ (рис. 2). В большинстве случаев ОНТ и ДНТ были организованы в сростки диаметром 8-30 нм и длиной до нескольких микрон.

В условиях проведения пиролиза кобальт, входящий в состав катализатора, способен находиться в форме  $Co^0$ ,  $CoO$ ,  $Co_3C_4$ ,  $CoMoC_4$ , молибдатов иного состава, твердого раствора  $Co_xMg_{1-x}O$ , более сложных соединений и твердых растворов. Для молибдена также вероятно образование нескольких соединений (оксидов с разной степенью окисления металла, карбидов и др.). Кроме того, химический состав отдельных частиц катализатора и отдельных участков одной частицы предположительно неодинаков и может меняться, особенно в начальный период пиролиза.

При этом размер частиц определяет преимущественно диаметр НТ, а состав - преимущественно число слоев НТ. Важное значение имеет как верхний, так и нижний предел размеров частиц. При образовании ОНТ разница между верхним и нижним пределами размеров



частиц катализатора весьма невелика, а сами размеры составляют  $\sim 1-3$  нм. По-видимому, для роста ДНТ необходимы частицы размером  $\sim 1-4$  нм, трехслойных НТ -  $\sim 2-5$  нм, четырехслойных НТ -  $\sim 2-6$  нм.

Отрыв частицы катализатора от носителя (что, вероятно, связано с изменением состава частиц) приводит к смене механизма роста и образованию нановолокон. Превышение частицами катализатора определенного граничного размера, который меняется от 4 до 6-7 нм и также предположительно зависит от состава, вызывает их окклюдирование без образования НТ.

На поведение частиц катализатора может оказывать влияние характер распределения этих частиц на подложке, пористость подложки, кривизна ее поверхности.

Образование сростков НТ по предлагаемой схеме происходит при пиролизе и в ходе последующей обработки продукта.

Лабораторная работа № 3

**Молекулярно-лучевая эпитаксия: методики,  
оборудование, технология**

Цель работы:

- знакомство с методикой молекулярно-лучевой эпитаксии;
- знакомство с оборудованием и оснасткой;

- знакомство с гетероэпитаксией углеродных наноструктур на островковой структуре катализатора

### **Физика и технология молекулярно-лучевой эпитаксии**

Молекулярно-лучевая эпитаксия возможна в низкотемпературной плазме, получаемой в установках, предназначенных для напыления тонких пленок. Здесь возможно раздельное получение плазмы гетерослоев (катализатора и углерода), их последовательное осаждение на подложку, где и происходит эпитаксия углеродных наноструктур на островковой структуре металла. С точки зрения исследований такая схема выгодно отличается, поскольку появляется возможность исследовать различные стадии эпитаксии. По этой причине в работе освещается метод эпитаксии в низкотемпературной плазме, формируемой в установке типа УВН71П-1.

**Схема эпитаксии.** Схема эпитаксии углеродных нанообъектов включает перевод металлических элементов и углерода в низкотемпературную плазму при последовательной чередующейся конденсации на поверхности ситалловой подложки

### **Устройство стабилизации дуги.**

В схеме синтеза углеродных нанообъектов в низкотемпературной плазме предусматривается испарение углерода электродуговым методом. При этом используются угольные электроды различного диаметра и с различной заточкой. Дуговой разряд возникает в момент замыкания электродов и организации электрической цепи. В месте касания наблюдается повышенное сопротивление, нагревание этого участка до температур испарения углерода (примерно -  $6000^{\circ}\text{C}$ ). Испарение с поверхности приводит к увеличению расстояния между электродами и дуга может гаснуть (нестабильное горение).

Для проведения процесса используется устройство, приведенное на рисунке 1.

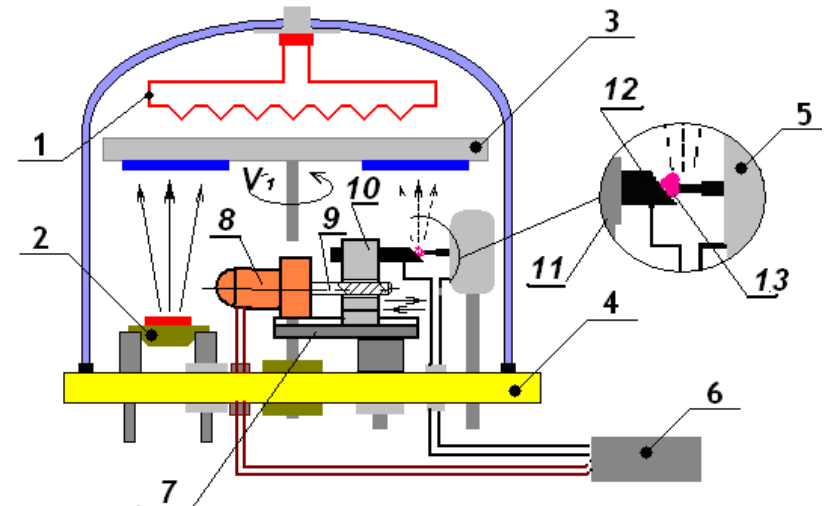


Рисунок 1 Устройство стабилизации электрической дуги: 1-инфракрасный нагреватель подложек, 2-резистивный лодочный испаритель металлов, 3- держатель подложки, 4-основание вакуумного колпака, 5-электро-механическое устройство задания положения графитовых стержней, 6-блок управления электрическим приводом, 7 – основание. 8 – электромотор с редуктором, 9, 10 – винтовая пара, 11 – держатель электрода, 12 – подвижный электрод, 13 – электрическая дуга

Электро-механическое устройство задания положения графитовых стержней 5 (рисунок 1) представляет собой основание 7, на котором располагается шаговый электромотор 8 с редуктором, соединенным через винтовую пару 9, 10 с держателем 11 угольного электрода 12 с заточкой под  $45^\circ$ . Установлен реверсивный мотор постоянного тока с напряжения 12В, который позволяет производить перемещение электрода 12 с точность до 1,0 мкм дискретным включением питания, а также обеспечивать непрерывное перемещение с заданной скоростью по программе.

Обеспечение питания дуги 13 и программного перемещения электрода 12 осуществляется устройством 6.

## Технологии эпитаксии углеродных нанобъектов

В соответствии с выбранной схемой синтеза углеродных однослойных нанотрубок была разработана технология их синтеза, блок-схема техпроцесса приведена на рисунке 2.2.

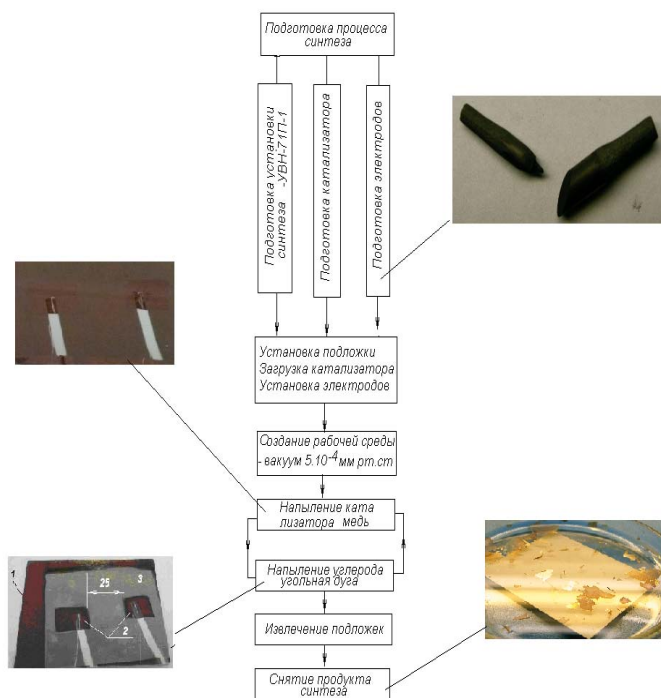


Рисунок 2 Схема технологического процесса эпитаксии УНО из низкотемпературной плазмы

В технологическом процессе укрупненно можно выделить четыре стадии.

1 Начальный блок операций(*заготовительно-наладочные работы*) состоит из подготовки катализатора и угольных электродов, изготовления резистивного испарителя, подготовки установки.

2 Следующий блок (*подготовка процесса синтеза*) включает установку электродов, резистивного испарителя, установку подложек, загрузку катализатора. Этот блок операций заканчивается созданием рабочей среды – вакуума.

3 Основная операция (*процесс эпитаксии*) – это последовательное напыление катализатора и напыление углерода.

4 Технологический процесс заканчивается (*окончание процесса и контроль продуктов синтеза*) извлечением из рабочего пространства подложек с последующим снятием продуктов с поверхности.

1 *Заготовительно-наладочные работы*

*Установка для эпитаксии*

Для эпитаксии используется промышленная установка УВН 71П-1, изображение которой приведено на рисунке 3.



Рисунок 3 Универсальный вакуумный напылитель марки УВН 71П-1:

1 - станина; 2 – камера напыления (колпак); 3 – пульт управления вакуумными режимами, 4 - стойки для обеспечения электропитания и управления системами сутоновки;

Установка состоит из станины 1, на которой смонтирована рабочая камера 2; отдельно установлен блок питания и управления 3.

Конструктивно рабочая камера 2 состоит (рисунок 4) из основания 4 и колпака 4а, который перемещается в вертикальном направлении и при смыкании с плитой образует рабочее пространство.

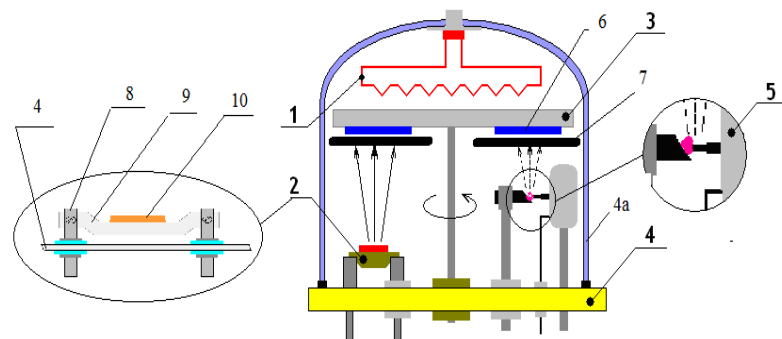


Рисунок 4 Схема эпитаксии УНО в низкотемпературной плазме:

1-инфракрасный нагреватель подложек, 2-резистивный лодочный испаритель металлов, 3- держатель подложек (карусель), 4, 4а -основание (плита) и вакуумный колпак, 5-электро-механическое устройство задания положения графитовых стержней, 6 - подложки, 7 - заслонка, 8 - внешние вводы, 9 - резистивный испаритель, 10 - испаряемый материал

Через отверстия в плите 4 введены электрические шины (герметизация высокотемпературными уплотнителями- фторопласт) для резистивного лодочного нагревателя 2 и для питания угольной дуги 5. Для питания испарителей использовались автономные источники. Для резистивного испарителя использовали штатный источник. Для питания угольной дуги дополнительно используется инвертор Elitech АИС-200. На этой же плите установлена карусель 3, на которой могут располагаться подложки различного размера: стандартный размер подложки 48х60 мм (12 штук). Над каруселью установлен инфракрасный нагреватель 1, который позволяет осуществлять нагрев подложек до температуры 400<sup>0</sup>С. Карусель 3 может

вращаться с различной скоростью, которую можно регулировать вручную с пульта управления. Ниже подложек располагается заслонка 7, которая перекрывает в закрытом положении поток плазмы от испарителя к подложке и имеет два положения: «открыто» и «закрыто». Положение заслонки устанавливается переключением тумблера на пульте управления.

*Изготовление испарителя.* В качестве материала испарителя для меди может использоваться листовой молибден толщиной 0,25 мм. Из этого материала изготавливается испаритель в виде сложной по конфигурации лодочки, эскиз которой приведен на рисунке 5. Общий размер испарителя 80 мм, рабочая часть - 35 мм с глубиной лодочки 5 мм. Испаритель снабжен также компенсатором размером 12 мм

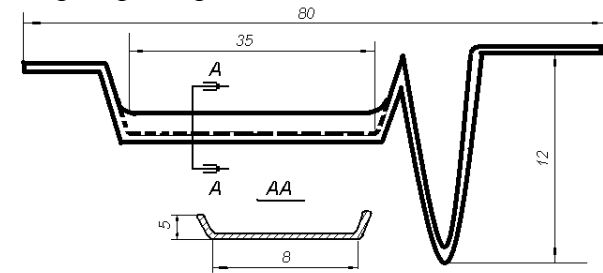


Рисунок 2.5 Резистивный испаритель

Предусматривается подготовка испарителя травлением его в смеси соляной и азотной кислот (соотношение - 1 : 2), промывкой, сушкой и отжигом в вакууме при температуре 1500 - 1600<sup>0</sup>С.

*Подготовка катализатора.* В качестве катализатора может выбираться медь, магний, никель и др. Для меди используются дозированные гранулы весом 0,8 грамма (травление в 10% азотной кислоте  $HNO_3$  с промывкой в воде и спирте, сушка). В испарителе может располагаться 5- 7 гранул общим весом 4 - 5,6 граммов.

*Выбор, подготовка, установка подложек.* Для процесса эпитаксии могут использоваться ситалловые

подложки СТ50-0,5 размером 48х60 мм с подготовкой: очистка в 10% азотной кислоте для удаления остатков металлических слоев, отмывка в содовой ванне со щеткой, промывка в проточной дистиллированной воде, сушка центрифугой  $n=1500-2000$  об/мин и в сушильном шкафу в вертикальном положении при температуре 120-150<sup>0</sup>С.

## *2 Подготовка процесса эпитаксии*

*Наладка внутрикамерных приспособлений и устройств.* На первом этапе устанавливается резистивный нагреватель, загружается навеска медных гранул, проверяется электрическая цепь нагревателя.

Далее производится заточка угольных электродов, установка в держатели электродов, проверка контакта и установка оградительного экрана.

Следующими подготовительными действиями является установка подложек и свидетеля на карусели.

Завершающим этапом является формирование рабочего объема: опускается колпак до смыкания с плитой.

*Подготовка и пуск напылительной установки.* После выполнения всех подготовительных работ в рабочем объеме производится пуск всех систем установки и вывод ее на рабочий режим.

Пуск вакуумной системы производится с пульта управления (рисунок 6). Клавишей 1 включается электропитание и механический насос предварительной откачки. Клавишей 2 включается клапан для откачки диффузионного насоса, затем производится переключение клавишей 8 на откачку рабочего объема 5. Далее производится переключение на откачку объема диффузионного насоса 4. В этом состоянии производится включение клавишей 3 нагревателей диффузионного насоса и производится выдержка в этом положении 40-45 минут для выхода на режим диффузионного насоса и включение клавиши 7 для открывания высоковакуумного клапана. При этом происходит откачка рабочего объема на



высокий вакуум. Достигаемая степень откачки –  $2 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст. Установка готова к работе. По окончании работы производится закрытие высоковакуумного клапана 7, напуск воздуха включением клавиши 6 при включенных клавишах 1 и 2. После этого колпак может подниматься и производиться работы с внутрикамерными устройствами (испарители, подложки и др.).

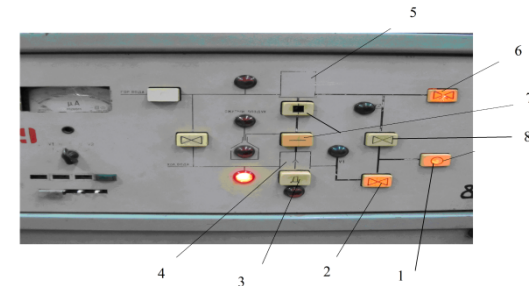


Рисунок 6 Пульт управления вакуумными системами: 1 - кнопка пуска механического насоса; 2 - предварительная откачка диффузионного насоса; 3 - кнопка включения нагревателей диффузионного насоса; 4 - изображение диффузионного насоса на схеме; 5 - изображение рабочего объема на схеме; 6 - управление клапаном напуска воздуха в рабочее пространство; 7 - кнопка управления клапаном-отсекателем; 8 - клавиша клапана откачки рабочего пространства

Последующий рабочий цикл производится после опускания колпака, предварительной откачки рабочего пространства при включении клавиши 8, последующего отключения клавиши 8 и открытия клапана-отсекателя 7.

### 3 Процесс эпитаксии.

Процесс эпитаксии осуществляется после выполнения ряда операций:

- установка подложки в положение над резистивным испарителем;
- установка заслонки над испарителем в положение закрыто;
- включение резистивного испарителя и подъем температуры медной навески до температуры плавления (процесс плавления контролируется визуально, после

стабилизации зеркала ванны температура ее находится в пределах 1100 – 1200<sup>0</sup>С);

- открывание заслонки между испарителем и подложкой, выдержка в положении заслонки открыто в течение 10-12 секунд для формирования островковой структуры меди на поверхности подложки;

- закрывание заслонки;

- перемещение подложки с напыленной медью в положение над дуговым испарителем;

- включение дугового испарителя (создание угольной дуги) с контролем режима горения по току (определяется экспериментально);

- открывание заслонки и эпитаксия углеродных нанообъектов на островковой структуре меди;

- закрывание заслонки.

#### 4 *Окончание процесса и контроль продуктов синтеза*

По окончании основного времени процесса синтеза производится:

- отключение питания испарителей;

- изолируется рабочее пространство от откачивающей системы (закрытие высоковакуумного клапана с пульта управления);

- производится напуск воздуха в рабочую камеру;

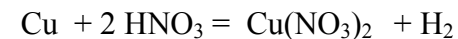
- поднимается колпак;

- извлекаются подложки.

Далее производится механическое или химическое удаление продуктов синтеза с поверхности подложек.

При механическом удалении продуктов в получаемом порошке находятся углеродные нанообъекты и катализатор.

Химическое снятие продуктов синтеза включает обработку поверхности в кислотной ванне с 10% азотной кислотой (водный раствор), при которой медная составляющая растворяется с образованием нитратов меди  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  по реакции



При этом нарушается сплошность углеродных образований на поверхности и они легко удаляются в осадок.

Последующая обработка углеродных продуктов эпитаксии включает отмывку осадка, контроль структуры с использованием разработанных методик электронной микроскопии.

#### **Прорядок выполнения работы.**

1 Ознакомиться физикой процесса гетероэпитаксии углерода

2 Ознакомиться с установкой УВН71П-1.

3 Ознакомиться с внутрикамерными устройствами и их назначением.

4 Загрузить резистивный испаритель, подготовить и установить угольные электроды, установить подложки.

5 Пронаблюдать запуск установки и выход ее на режим (выполняет оператор).

6 Под наблюдением оператора осуществить основные этапы синтеза (напыление из резистивного испарителя, напыление углерода).

7 Наблюдать разгерметизацию рабочего пространства (выполняет оператор).

8 Извлечь подложки

9 Снять продукты эпитаксии с поверхности подложки.

Последующие работы на установке выполняет оператор (охлаждение системы, выключение установки)

#### **Содержание отчета:**

- описание физики процесса;
- схема внутрикамерных устройств;
- блок-схема процесса эпитаксии;
- микрофотографии продуктов эпитаксии
- анализ результатов;
- выводы

#### **Контрольные вопросы:**

- охарактеризовать виды эпитаксии;
- что собой представляет гетероэпитаксия;
- основные блоки напылительной установки;
- типы испарителей.

#### Лабораторная работа № 4

##### **Электронная микроскопия гетероструктур**

Цель работы: - знакомство с методом электронной микроскопии;

- знакомство с методикой получения образцов (метод реплик);
- области применения.

Приборы, оборудование, материалы:

- электронный микроскоп ЭМВ-100А;
- универсальный вакуумный распылитель ВУП-5;
- объекты (образцы) гетероструктур, электронно-микроскопические фотографии гетероструктур.

##### **Физические основы электронной микроскопии**

Световой микроскоп имеет вполне определенные границы использования, что связано с его ограниченной разрешающей способностью.

Как известно, разрешающая способность  $d$  светового микроскопа определяется соотношением

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \varphi},$$

где  $\lambda$  - длина волны используемого в микроскопе света (0,2-0,3 мкм – фиолетовый-синий, 0,6 мкм – зеленый, 0,7-0,9 мкм – красный свет),  $n$  – показатель преломления среды (для воздуха  $n = 1$ ),  $\varphi$  - апертурный угол (обычно  $90^\circ$ ).

Исходя из приведенных данных предельная разрешающая способность соответствует  $d \approx 0,1-0,2$  мкм.

Более коротковолновое, например рентгеновское излучение, не может использоваться из-за практически отсутствия преломления в стекле и невозможности использования таких действий как фокусировка электромагнитного потока с использованием линз.

В электронном микроскопе используются волновые свойства электронов. Длина волны электронов определяется их скоростью. Чем больше скорость, тем короче длина волны. Скорость увеличивают созданием электрических статических полей высокой напряженности.

Длина волны электронов  $\lambda$  в зависимости от ускоряющего напряжения  $U$  определяется выражением

$$\lambda \cong \frac{12,24}{\sqrt{U}},$$

Современный электронный микроскоп имеет ускоряющее напряжение 100-200 кэВ. При этом достигается длина волны электронов порядка сотых долей нанометра ( 0,02-0,04 нм). Практическая разрешающая способность обычно соответствует 1,0 – 2,0 нм. Расстояния между атомами соответствуют 0,05-0,5 нм, так что наиболее распространенные микроскопы имеют разрешающую способность на грани разрешения отдельных атомов.

Схема электронного микроскопа с изображением траекторий электронов приведена на рис.1.

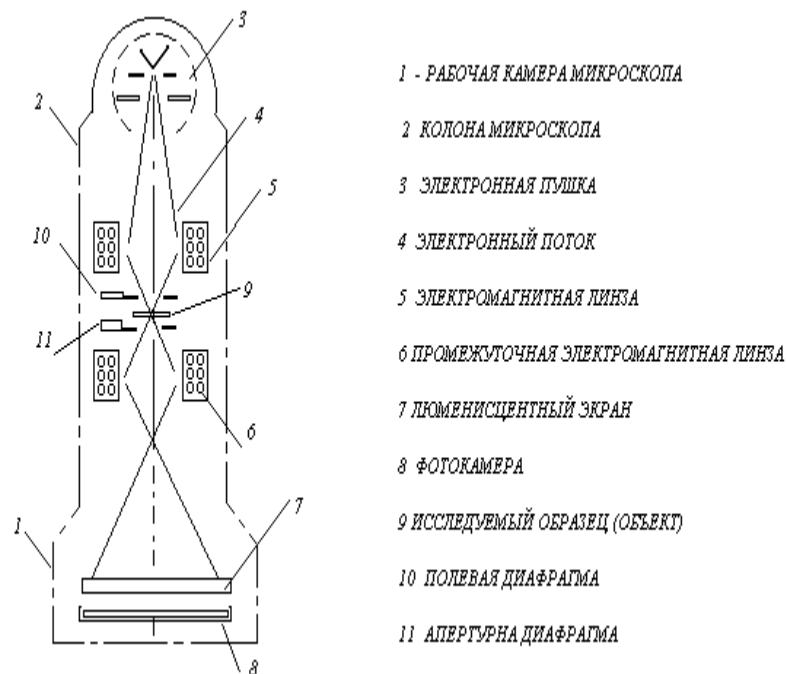


Рис. 1 Схема электронного микроскопа.

Конструктивно микроскоп выполнен в виде рабочей камеры 1 и колоны 2, в которых предварительно создается высокий вакуум. В электронной пушке 3 создается расширяющийся электронный поток 4.

На пути потока установлена электромагнитная линза 5, позволяющая производить фокусировку электронного потока на исследуемом образце (объекте) 9.

Электромагнитная линза представляет собой катушку, имеющую большое количество витков медной проволоки. При подаче тока в обмотку этой катушки или соленоида внутри нее создается магнитное поле. В этом поле электроны двигаются по траекториям, похожим на путь света в стеклянной линзе, т.е. катушка выполняет роль линзы.

Периферийный поток электронов сепарируется диафрагмой 10 (отсекаются электроны с меньшими

скоростями ), что улучшает резкость формирующегося изображения. Диафрагма называется апертурной.

Поле изображения ограничивается другой диафрагмой 11, называемой – полевая диафрагма.

Далее прошедший через образец поток расширяется и перефокусируется для получения нужного по масштабу изображения на люминесцентном экране 7. При необходимости изображение фиксируется фоточувствительным материалом в фотокамере 8.

Особенностью микроскопа является то, что он может работать только “на просвет”. Поэтому образцы должны быть такими тонкими, чтобы они были прозрачны для электронов. Толщина просвечиваемых пленок находится в пределах 20-30 нм (200-300Å).

Формирование изображения можно пояснить с использованием рис.2. При движении электронного потока в теле образца происходит его рассеяние и поглощение.

Если образец имеет двухфазную структуру (к примеру участки алюминия и свинца на рис. 2а), то происходит неодинаковое поглощение электронов этими фазами. В приведенном случае свинец поглощает электроны больше и поток в этих местах больше ослабляется, на экране эти участки будут более темными. Участки изображения, сформированные проходящими через алюминий электронами, будут более светлыми.

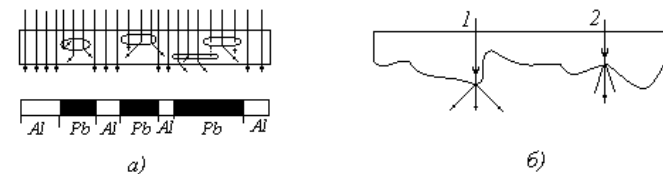


Рис.2 Формирование изображения в электронном микроскопе для различных объектов: а - двухфазные, б - однородные (однофазные).

После прохождения электронов через однородные (однофазные) объекты (рис.2 б) изображение формируется за счет разницы в толщине. При большей толщине на участке *1* происходит большее рассеяние в толще образца и это место будет более темным в сравнении с участком *2*. Получаемое изображение похоже на изображение структуры, которое получается в световом микроскопе. Однако отличается оно более высоким разрешением.

### **Методика получения образцов (объектов) для исследования**

Методика подготовки образца для исследования является достаточно тонким делом. Существует большое количество самых разнообразных способов. Выбор методики определяется как характером исследуемого объекта, его размерами, так и конечной целью.

Если исследуемый объект находится в виде порошка и следует выяснить только его размеры, то используется так называемый метод реплик.

В этом случае предварительно получают тонкую прозрачную для электронов пленку толщиной 20-22 нм. Потом на нее наносят исследуемый порошок и все это располагают на жесткой несущей основе (обычно металлическая сетка). Стандартной сеткой является медная сетка с квадратными ячейками размером 0,1-0,2 мм диаметром 3,0 мм.

В качестве основы чаще используют угольную пленку которая получается в установке вакуумного напыления ВУП-5 в вакууме распылением угольных электродов в электрической дуге и сублимацией на двухслойной подложке (пластина стекла с нанесенной медной пленкой). Контроль толщины угольной пленки контролируется визуально по цвету (желто-коричневый цвет соответствует толщине 20-22 нм). Затем полученную двухслойную пленку подвергают травлению в растворе азотной кислоты



или в ванне аммиак с перекисью водорода. При этом растворяется только медная пленка, а угольная чаще всплывает на поверхность раствора. Она поддавливается петлей (типа игольного ушка) и переносится в ванну для промывки от кислотного раствора. После этого таким же образом пленка переносится в предварительно приготовленную суспензию с исследуемым порошком. Суспензия обрабатывается ультразвуком. Теперь производят поддавливание угольных пленок сеткой диаметром 3,0 мм. Вместе с пленкой извлекается и исследуемый порошок, который располагается непосредственно на угольной пленке. После естественной сушки образец (объект) готов для просмотра в микроскопе.

### **Порядок выполнения работы**

1 Ознакомиться с физическими основами электронной микроскопии и схемой электронного микроскопа

2 Ознакомиться с методикой получения образцов для исследования

3 Поместить (действия выполняет оператор или преподаватель) предложенный объект исследования в электронный микроскоп, выбрать интересующую область перемещением стола с объектодержателем относительно центра экрана, изменением тока объективной линзы установить такой масштаб изображения на экране, чтобы хорошо различались наименьшие по размеру детали выбранного фрагмента (следует следить за резкостью изображения, производить дополнительную корректировку), при резком изображении фрагмента, равномерном освещении поля измерить ток промежуточной линзы, с помощью оператора произвести фотографирование , получить изображение на

фотопластинке (фото пленке), произвести (выполняет студент) сканирование фотопластинки, распечатать изображение.

4 Используя полученное изображение произвести определение размеров углеродных нановолокн . На рис. 3 в качестве примера приведена фотография конгломерата волокнистых объектов. По такой фотографии выполнить следующее:

а) визуально определить группы волокон со значительно отличающимися размерами (на данной фотографии отмечено два типа волокон с явно различающимися размерами);

б) для каждой выбранной группы произвести несколько измерений (не менее трех) с помощью лупы с масштабной шкалой ( измерительного циркуля и линейки или другого измерительного инструмента);

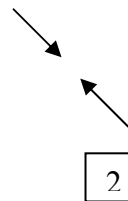
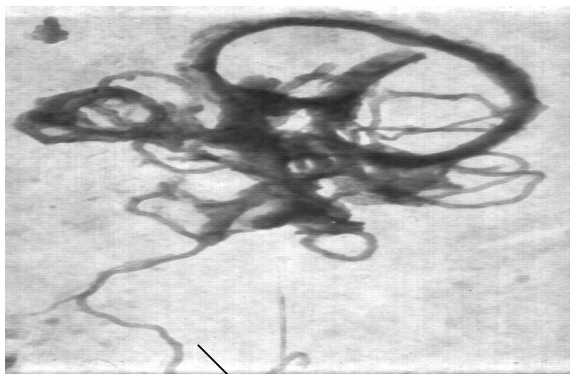


Рис.3. Электронно-микроскопическая фотография  
наноуглеродных объектов (нановолокна) к промежуточной линзы  
140 мА. 1

б) Записать измеренные значения в миллиметрах:

Диаметр для №1  $D_1 = 1,5$  мм

Диаметр для №2  $D_2 = 4,3$  мм

в) с помощью градуировочного графика (Приложение 1) найти увеличение, с которым была получена данная фотография; на рис.4 приведена последовательность определения увеличения по градуировочному графику. Например по рис.4, при токе промежуточной линзы равным  $I = 140$  мА увеличение объекта на фотографии составляет ( $W = 160000$ )

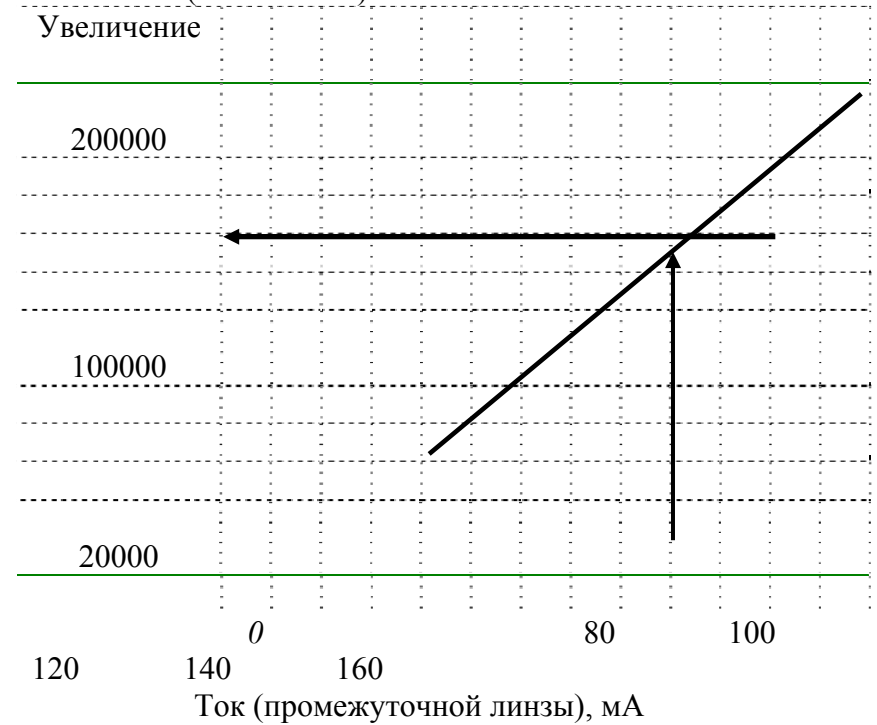


Рис.4 Градуировочный график и последовательность определения увеличения

г) Найти реальные размеры углеродных нановолокон в нм ( $10^{-9}$  м)

$$d_n = \frac{D}{W} * 10^{-9} \text{ (нм)},$$

где  $d_n$  – реальный размер (диаметр) исследуемого объекта;  $D \cdot 10^9$  - величина измеряемого участка (диаметра) на фотографии,  $W$  – увеличение <sup>x</sup>.

Пример 1.

$$d_{n1} = \frac{D_1}{W} * 10^{-9} = ((1,5 * 10^{-3}) / 160000) * 10^9 = 9,375$$

(нм);

Пример 2

$$d_{n2} = \frac{D_2}{W} * 10^{-9} = ((4,3 * 10^{-3}) / 160000) * 10^9 = 26,875$$

(нм)

5 Привести несколько примеров использования электронно-микроскопических исследований (самостоятельно по дополнительной или др. литературе)

### **Отчет по работе**

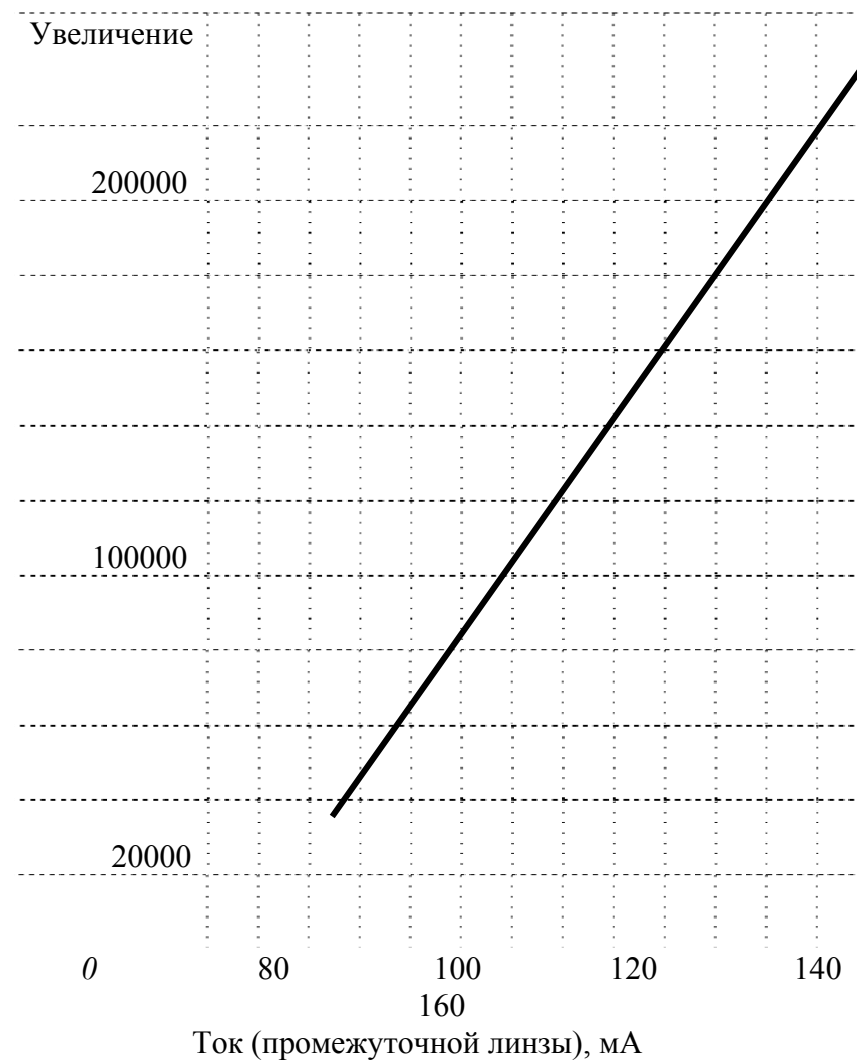
Должен включать: название лабораторной работы, цель, приборы, оборудования, материалы, краткое описание физических основ электронной микроскопии, схема электронного микроскопа, измеренные значения диаметров нановолокона, расчет истинных размеров и результаты измерения..

### **Дополнительная литература**

1 Е.В.Панченко, Ю.А.Скаков, Б.И.Кример и др.  
Лаборатория металлографии. М.: Металлургия, 1965.- с.172  
– 243.

Приложение 1

Градуировочный график



## Лабораторная работа № 5

### Микролитография

**Цель работы:** знакомство с основными элементами технологии изготовления фотошаблонов и методами их контроля.

**Приборы, приспособления, материалы:**

репродукционная установка типа "Уларус",  
микроскоп просвечивающего типа, устройство  
мультиплицирования, оригинал или  
промежуточный ФШ топологического рисунка,  
образцовые ФШ, фотоматериалы (ВР-П, ФТ 41,  
ФТ 101П), обрабатывающие растворы.

Литография (гравировка) – совокупность процессов получения необходимой конфигурации элементов в планарной технологии. Наиболее распространена фотолитография как совокупность фотохимических процессов для получения топологии элементов.

Сущность процесса (рисунок 1) заключается в том, что на этапе *I* на поверхность подложки 1 наносится светочувствительный слой (фоторезист) 2, который засвечивается через фотошаблон 3; фотошаблон имеет непрозрачные 4 и прозрачные участки, через которые происходит засветка части слоя фоторезиста; по конфигурации прозрачные участки соответствуют топологии необходимых элементов. В результате засветки в слое фоторезиста 2 формируется конфигурация элемента в виде засвеченного участка 6 (рис.3.1а); в засвеченном участке позитивного фоторезиста под воздействием ультрафиолетового света происходит разрыв связей полимерных цепей, растворимость в этих местах увеличивается по сравнению с незасвеченными участками

5 и на этапе *II* они удаляются при химической обработке; на поверхности подложки создается полимерная пленка 7 с окнами, соответствующими топологии будущего элемента в подложке или на ее поверхности. В противоположность предыдущему при работе с негативным фоторезистом конфигурация элемента задается непрозрачным участком фотошаблона (рис.3.1б); при химической обработке в этом варианте незасвеченный участок растворяется с большей скоростью, поскольку в облученных местах происходит дополнительная полимеризация и понижается растворимость.

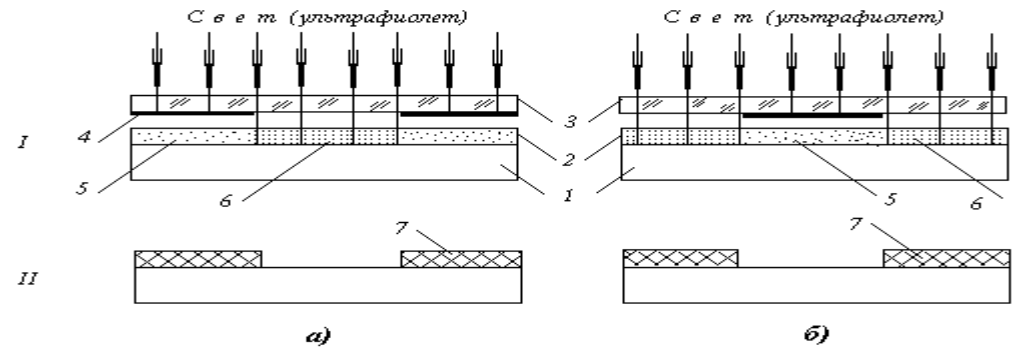


Рисунок 1. Фотолитографический процесс: *а)* с негативным фоторезистом, *б)* с позитивным фоторезистом.

1 – подложка, 2 – фоторезист, 3 – фотошаблон, 4 – непрозрачный участок фотошаблона, 5 – незасвеченный участок фоторезиста, 6 – засвеченный участок фоторезиста, 7 – сформированная полимерная маска.

Основные этапы литографического процесса с указанием материалов, оснастки и оборудования приведены на рисунке 2.

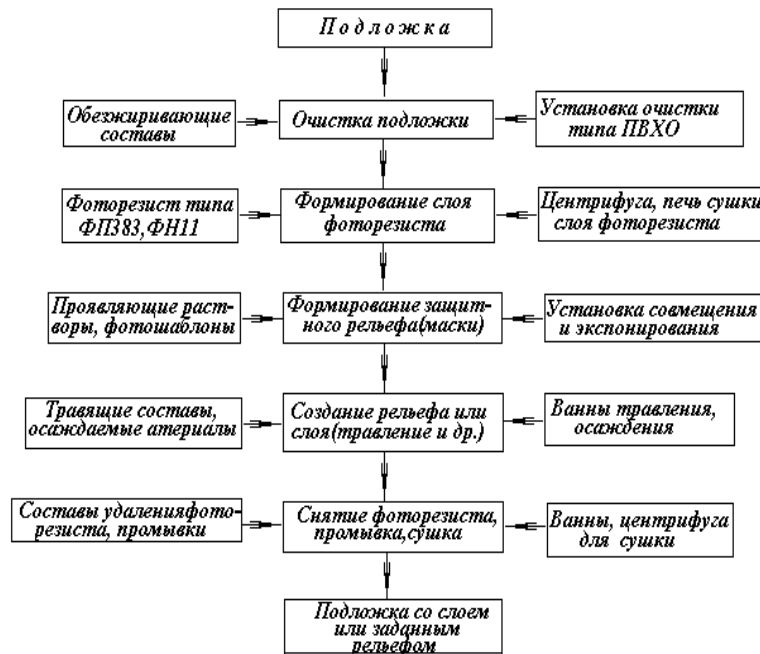


Рис.3.2. Схема типового процесса фотолитографии.

Теоретические основы литографии включают три составляющих: прикладные оптику и химию, прикладную теорию травления. В технологическом плане наиболее важными являются используемые материалы и реактивы, оснастка, оборудование и элементы технологии. Оснастка готовится на этапе организации техпроцесса; к основным ее компонентам относятся фотошаблоны (ФС), во многом определяющие качество процесса. В настоящей работе освещена более подробно технология фотошаблонов

### Задания к работе.

1. Выполнить **образцовый** фотошаблон (ФС) топологического рисунка одного из слоев тонкопленочной ИМС двухступенчатым методом без использования мультиплицирования, определить класс ФС:  
Оригинал на непрозрачной основе в масштабе 20:1, материал промежуточного фотошаблона – техническая



фотопленка ФТ41, образцового – “Микрат’-300; репродукционная установка типа “Уларус”.

2. Выполнить **рабочий** фотошаблон(ФШ) топологического рисунка одного из слоев тонкопленочной ИМС двухступенчатым методом без использования мультиплицирования, определить класс ФШ:

Оригинал на прозрачной основе в масштабе 10:1, материал промежуточного и образцового фотошаблона – ФТ41, для изготовления рабочего ФШ использовать пленку алюминия на стекле.

3. Выполнить **образцовый** ФШ топологического рисунка металлической разводки пробного полупроводникового транзистора: Промежуточный ФШ на прозрачной основе, выполненный на лазерном принтере; материал образцового ФШ – пластины ВР-П; использовать репродукционную установку с установленным микроскопом просвечивающего типа.

4. Выполнить **рабочий** фотошаблон слоя резисторов тонкопленочной ИМС: использовать образцовый фотошаблон на плоской фотопленке, стеклянную подложку с напыленной пленкой хрома, фоторезист ФП 383, экспонирование фоторезиста в контакте с образцовым ФШ.

5. Выполнить **комплект образцовых** фотошаблонов тонкопленочной ИМС одноступенчатым методом на одной фотопластине с использованием мультиплицирования: оригинал на прозрачной основе в масштабе 10:1, размер поля ФШ – 18х24 мм, фотоматериал – плоская техническая пленка ФТ41, использовать стандартный мультипликатор на 16 изображений.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться со схемой многоступенчатого способа изготовления ФШ (рисунок 3) и установить маршрут его изготовления в соответствии с заданием.

Схема типового процесса изготовления ФШ двухступенчатым методом приведена на рисунке 3.

Исходным является оригинал с изображением топологического рисунка 1, выполненный в масштабе  $20:1 \div 500:1$  координаторафом в двухслойной плоской пленке или вручную на непрозрачной основе методом аппликации.

Изображение оригинала 1 с изображением рисунка 2 топологии одного из слоев ИМС уменьшается репродукционной камерой с объективом 3 до промежуточного размера 4 и фиксируется в эмульсии фотопластины или фотопленки 5, полученный компонент называют промежуточным ФШ.

Изображение 7 промежуточного фотошаблона 6 уменьшается вторично микрорепродукционной камерой с микрообъективом 8 до требуемых размеров 9 топологии; фиксирование этого изображения в виде множества изображений 10 производится при последовательном пошаговом смещении пластины 11 столом 12 и экспонировании; процесс называют мультиплицированием. Таким образом на фотопластине воспроизводится несколько изображений слоя ИМС. в соответствии с размером будущей подложки или полупроводниковой пластины; после соответствующей фотообработки получается компонент 13, который называют образцовым фотошаблоном.

На следующем этапе образцовый фотошаблон 13 копируется контактной печатью с соответствующей фотообработкой, полученный таким образом ФШ называют рабочим; он может выполняться на плоской фотопленке, фотопластине или на прозрачной пластине с полупрозрачным слоем оксида железа или износостойкой пленкой хрома.

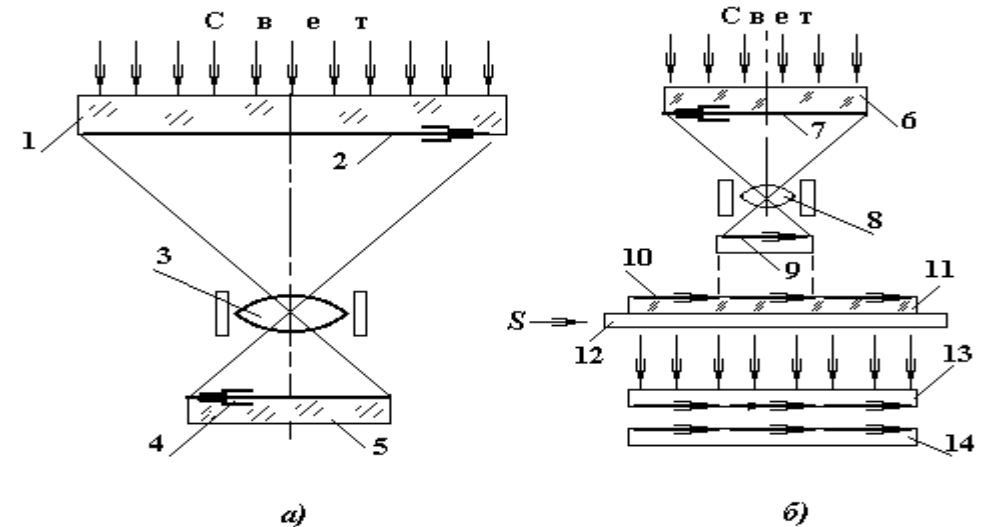


Рисунок 3 Схема изготовления фотошаблона: а) – получение промежуточного фотошаблона; б) – получение образцового и рабочего фотошаблонов: 1 – оригинал, 2 – топологический рисунок слоя ИМС, 3 – объектив репродукционной камеры, 4, 7 – уменьшенное промежуточное изображение топологии, 5, 6 – промежуточный фотошаблон, 8 – объектив микрорепродукционной камеры, 9 – изображение топологии в масштабе 1:1, 10 – топологический рисунок на образцовом фотошаблоне, 11 – подложка образцового фотошаблона, 12 – стол мультиплицирующего устройства, 13 – образцовый фотошаблон, 14 – рабочий фотошаблон.

## 2. Ознакомиться с репродукционной установкой.

Схематически установка “Уларус” показана на рисунок 4. Конструктивно она выполнена в виде стола 1 со штангой

6, на которой установлен кронштейн , перемещающийся по вертикали. На кронштейне размещается фотокамера 4 с устройством фокусировки 5, заменяемым кассетой 13 с фотопленкой или фотопластиной 12 форматом 9х12 см; возможна также установка мультипликатора 19, на который могут последовательно устанавливаться устройство 5 или рамка 20 с матовым стеклом, а также кассета 13. В фотокамере смонтирован фотозатвор и устанавливаются сменные объективы 7. В столе 1 размещены шахтные и донные осветители 11, включаемые при работе с прозрачным оригиналом 8, размещаемым в рамке 2. Для репродуцирования оригинала на отражение предусмотрено освещение софитами 3, которые регулируются по высоте и наклону для выравнивания освещенности по полю оригинала. Установка снабжена блоком питания 10 и пультом управления 9, расположенным в плоскости стола.

**3. Освоить технику работы с репродукционной установкой.** Управление установкой производится с пульта 9, укрупненное изображение которого приведено на выноске рисунка 4. Для работы с установкой последовательно включаются на пульте “Сеть”, трансформатор “ТР”, “Реле времени” , “Донные осветители” и “Шахта” при репродуцировании оригинала “на просвет” . В случае необходимости репродуцирования “на отражение ” включаются только “Софиты” .

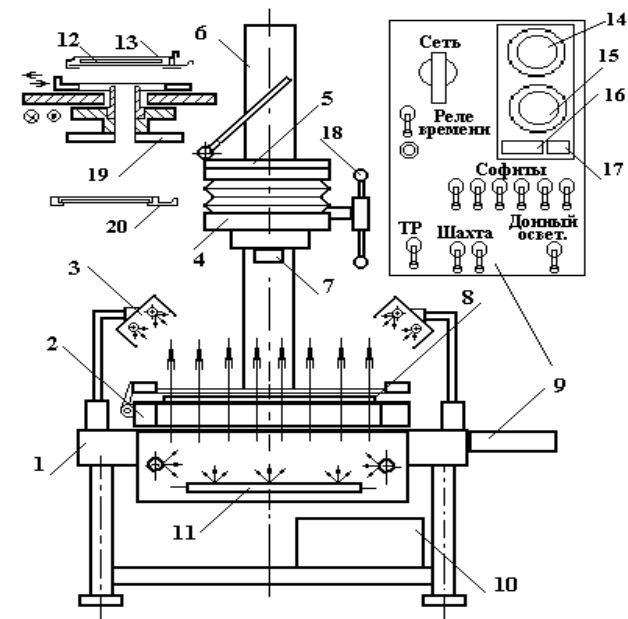


Рисунок 4 Схема репродукционной установки “Уларус”.

1 – стол установки; 2 – рамка для установки оригинала; 3 – софиты; 4 – репродукционная камера; 5 – устройство наводки на резкость; 6 – штанга; 7 – фотообъектив; 8 – оригинал топологического рисунка; 9 – пульт управления; 10 – блок электропитания; 11 – фотопленка; 13 – кассета; 14 – реостат установки длительных выдержек; 15 – реостат установки коротких выдержек; 16 – кнопка пуска затвора камеры; 17 – кнопка постоянного открытия затвора; 18 – штурвал для наводки на резкость и установки масштаба изображения в репродукционной камере; 19 – мультипликатор.

**4. Ознакомиться с требующейся для работы оснасткой и подготовить ее к работе.**

**Осмотреть рамку с матовым стеклом (рисунок 4а).**

**Освоить зарядку кассеты (рисунок 4 б):** при освещении лаборатории красным светом в корпус кассеты 3 установить плоскую пленку 4 типа ФТ41 эмульсионным слоем вверх ( с противоположной стороны располагается противоореольный слой красного цвета), вставить

прозрачное стекло 5 в корпус кассеты и закрепить его фиксаторами 7, вдвинуть заслонку 6 в корпус кассеты.

**Ознакомиться с конструкцией мультипликатора(МП) и освоить работу с ним:** мультипликатор (рис.4.3в ) представляет собой устройство, позволяющее получить на одной фотопластине несколько изображений при последовательном экспонировании оригинала после механического смещения фотопластины относительно его изображения; конструктивно МП выполнен на основании 8, которым он устанавливается в репродукционную камеру, на верхней части основания располагается подвижная система из пластин 9 и 10, перемещающихся относительно друг друга во взаимно перпендикулярном направлении, в паз пластины 10 устанавливается кассета с фотоматериалом; пластина 9 может смещаться только в продольном направлении( $S_{пр}$ ) на 4 шага, пластина 10 смещается только в поперечном направлении ( $S_{пп}$ ) также на 4 шага; таким образом, данный МП позволяет получить на пластине 9х12 см 16 изображений размером 18х24 мм.

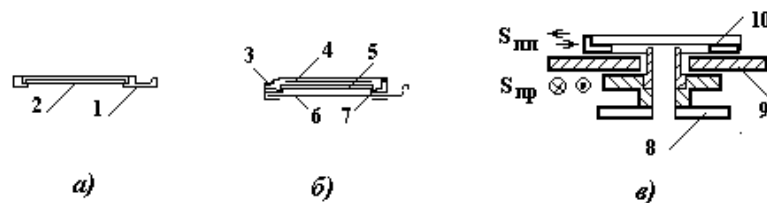


Рис.4.3. Оснастка к репродукционной камере: а) рамка с матовым стеклом, б) фотокассета, в) мультипликатор.

1 – рамка, матовое стекло, 3 – корпус кассеты, 4 – плоская фотопленка, 5 – прозрачное стекло, 6 – заслонка, 7 – фиксатор, 8,9 – основание, 10 – пластина продольного перемещения, 11 – пластина поперечного перемещения

## 5. Выполнить промежуточный ФШ с прозрачного оригинала.

Включить установку по п. 3, установить в рамку 2 (рис.4.2) оригинал 8 форматом А3, выполненный на

прозрачной основе; установить устройство наводки на резкость 5; открыть затвор камеры нажатием правой кнопки реле времени (РВ); перемещением камеры 4 по штанге 6, раздвижением ее меха с помощью штурвала 18 найти такое положение камеры, при котором изображение оригинала полностью располагается в поле матового стекла устройства 5; визуальное установить резкость изображения кольцом наводки на резкость объектива 7 при открытой диафрагме; визуальное или с помощью экспонометра проконтролировать равномерность освещения по полю оригинала; установить диафрагму объектива в положение 8; экспонометром определить для этого значения диафрагмы экспозицию (чувствительность пленки ФТ41 – 5 ед. ГОСТ); закрыть затвор повторным нажатием правой кнопки РВ; установить ручками 14, 15 значение экспозиции на РВ; заменить устройство наводки на резкость кассетой с фотопленкой, открыть заслонку кассеты, экспонировать фотопленку нажатием левой клавиши РВ, закрыть заслонку кассеты, снять кассету; произвести фотохимическую обработку по п. 9.

#### **6. Выполнить промежуточный ФШ с непрозрачного оригинала.**

Включить установку по п.2 в режиме репродуцирования “на отражение”, установить непрозрачный оригинал вместо рамки 2, экспонировать по п.5, провести фотохимическую обработку по п.9.

#### **7. Выполнить комплект образцовых ФШ одноступенчатым методом на одной пластине (к заданию 5).**

Подготовить репродукционную установку (рис. 4.2) к работе: установить мультипликатор 19, матовое стекло 20 или устройство 5 визуальной наводки на резкость; зарядить

кассету 13 плоской фотопленкой 12; установить оригинал первого слоя ИМС в рамку 2.

Включить установку по п. 3, экспонировать оригинал по п.5 при положении мультипликатора А1, произвести экспонирование следующих слоев ИМС после переустановки мультипликатора в положения А2, А3 и т.д.

Выполнить фотохимическую обработку экспонированной пленки по п.9.

Проконтролировать качество полученного комплекта ФШ, присвоить марку ФШ.

#### **8. Ознакомиться с микропроекционной установкой и освоить работу с ней.**

Микропроекционная установка (рис.4.4) выполнена на базе фотоувеличителя “Беларусь-2” и состоит из стола 1 с колонной (штангой) 5; по рейке штанги перемещается корпус 4, на котором смонтирован корпус 6 осветителя с источником света 7 и установлен конденсор 8 для выравнивания светового потока по полю освещаемого кадра; в корпус 4 вдвигается рамка 9 с промежуточным ФШ 10, располагающимся между прозрачными стеклами; передняя панель 11 имеет гнездо для установки объективов, соединена светонепроницаемым мехом с корпусом 4 и может перемещаться относительно него с помощью штурвала 12; ниже передней панели располагается микроскоп 13, установленный с помощью штатива на столе установки (на эскизе не показан); в микроскопе предусмотрена установка различных микрообъективов 14, позволяющих проектировать на плоскость фотопленки в кассете 16 изображение размером 2х2 мм; кассета 16 устанавливается на двухкоординатном столе 15 и перемещается в плоскости стола 1 в двух взаимноперпендикулярных направлениях с точностью  $\pm 0,5$  мкм, пределы перемещения стола 25 мм; между микрообъективом и плоскостью пленки располагается



красный фильтр 24, убираемый на момент экспонирования фотопленки; микроскоп 18, установленный на столе с помощью штатива 21, служит для наводки на резкость изображения топологии ИМС непосредственно на фотопленке, в микроскопе установлены микрообъектив 19 с апертурой 0.11 и окуляр-микрометр 20 с окуляром 15<sup>x</sup>; для отработки продолжительности экспонирования используется переносное электронное реле времени 17.

Работа с установкой предполагает первоначальную юстировку светового потока после включения источника 7 при снятой рамке и убранных с оптической оси микроскопа 13 и красного фильтра 24, юстировка включает выравнивание света по полю освещаемого белого экрана, установленного вместо кассеты 16; далее следует установить микроскоп 13 и рамку 9 с промежуточным ФШ; перемещением панели 11 и изменением положения микроскопа 13 добиться визуально резкого изображения нужного размера на юстировочном экране; установить кассету 16, ввести фильтр 24, открыть заслонку кассеты и произвести тонкую наводку на резкость и установку размера изображения непосредственно на фотопленке с помощью микроскопа 18; выключить источник света 7, убирать фильтр 24 и произвести экспонирование с использованием реле времени (экспозиция предварительно определяется по пробам); переместить кассету с помощью координатного стола в другое положение и произвести следующее экспонирование с дополнительной корректировкой резкости и размера поля изображения; после экспонирования всего поля фотопленки закрыть заслонку кассеты, кассету снять и произвести фотохимическую обработку фотопленки по п.9.

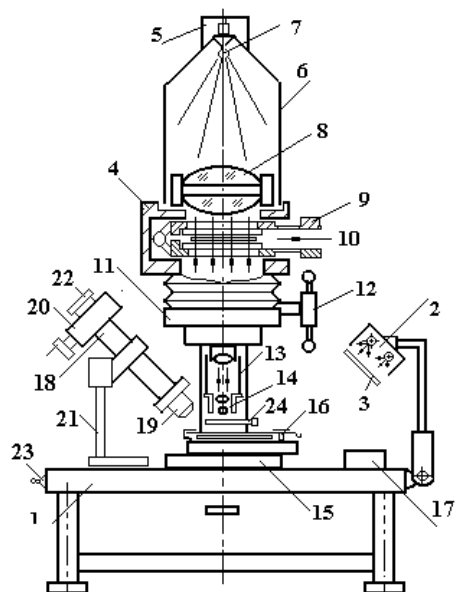


Рис. 4.4. Микропроекционная установка.

1 – стол установки; 2 – софиты; 3 – фильтр красный; 4 – корпус; 5 – штанга; корпус осветителя; 7 – источник света точечный; 8 – конденсор; 9 – объектная рамка; 10 – промежуточный ФШ; 11 – передняя панель; 12 – штурвал перемещения передней панели; 13 – микроскоп; 14 – объектив; 15 – двухкоординатный стол; 16 – кассета с плоской фотопленкой или фотопластиной; 17 – настольное реле времени; 18 – микроскоп для визуального контроля перемещений при мультиплицировании; 19 – объектив; 20 – окуляр-микрометр; 21 – штатив микроскопа; 22 – окуляр объект-микрометра; 23 – тумблеры включения и выключения электропитания установки.

## 9. Ознакомиться с материалами, обрабатываемыми растворами, техникой фотохимической обработки (ФХО), выполнить ФХО экспонированных фотоматериалов.

9.1. Ознакомиться с характеристиками использованного при экспонировании ФШ фотоматериала.

**Фотоматериалы.** **Фотопленки** плоские фототехнические, изготовлены на прозрачной полиэтиленовой основе толщиной 60 – 100 мкм, имеют

желатиновый фоточувствительный рабочий и противоореольный с обратной стороны слой; рабочий слой характеризуется светочувствительностью (определяется в единицах ГОСТ, обычно в пределах 4 – 12 ед.ГОСТ, обработка при красном свете), коэффициентом контрастности (разница в светопропускании темных и светлых участков, градация – 1,2,3,4,10) и рядом других характеристик. Обозначение фотопленок буквами ФТ и двух- трехзначным индексом, например, ФТ-41 (ФТ- фотопленка техническая, 4 – коэффициент контрастности, 1 – ортохроматическая, т.е. чувствительная к средневолновому видимому свету); основные характеристики приводятся на упаковке и приведены в таблице 4.1.; наиболее распространены ФТ- 41, ФТ-41П, ФТ101П, а также под маркой “Микрат”, используются для промежуточных и образцовых ФШ, выпускаемый формат – до 24х30 см.

**Фотопластины** изготавливаются на стекле размером 76х76, 102х102 мм и более, используются для выполнения образцовых ФШ, имеют более низкую чувствительность, более высокую разрешающую способность, маркируются – ВР или “Микрат”, основные марки и фотографические показатели приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1.

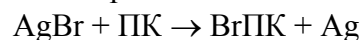
Фотографические показатели фототехнических пленок

| Марка фотопленки или фотопластины | Светочувствительность S, ед. ГОСТ | Коэффициент контрастности, не менее | Максимальная оптич. Плотность, не менее | Разрешающая способность, лин/мм, не менее | Предельная чувствительность, лин/мм, не менее |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Фотопленки                        |                                   |                                     |                                         |                                           |                                               |
| ФТ-41                             | 0,5-1,0                           | 4,5                                 | 3,0                                     | 195                                       | 570                                           |
| ФТ41П                             | 0,7-1,0                           | 5,5                                 | 3,0                                     | 240                                       | 570                                           |
| ФТ-101                            | 0,2-0,4                           | 10,0                                | 3,6                                     | 250                                       | 580                                           |
| ФТ-101П                           | 0,5                               | 8,0                                 | -                                       | 200                                       | 580                                           |
| “Микрат-200”                      | 2,7                               | 3,0                                 | -                                       | 196                                       | 570-580                                       |
| “Микрат-300”                      | 2,5                               | 4,0                                 | 3,0                                     | 300                                       | 660-680                                       |
| “Микрат-900”                      | 0,02                              | 3,0                                 | -                                       | 600                                       | 530-600                                       |
| Фотопластины                      |                                   |                                     |                                         |                                           |                                               |
| ВР-Э                              | 0,01                              | 5,0                                 | 3,0                                     | 1000                                      | 580                                           |

|             |         |     |     |      |         |
|-------------|---------|-----|-----|------|---------|
| ВР-П        | 0,02    | 5,0 | 3,0 | 1700 | 520-530 |
| “Микрат-НК” | 0,5-1,0 | 5,0 | 3,0 | 350  | 540-550 |

9.2. Выбрать для используемого фотоматериала обрабатывающие растворы.

**Обрабатывающие растворы.** Экспонированные фотопленки и фотопластины для получения изображения обрабатываются в двухступенчатом процессе, включающем проявление и закрепление. При проявлении активированные светом частицы AgBr вступают в химическую реакцию с проявляющим компонентом(ПК) раствора, при этом восстанавливается серебро, формирующее фотоизображение



Остатки незасвеченного AgBr удаляются из эмульсии во втором растворе, который называют закрепителем.

Составы стандартных проявляющих и закрепляющих растворов приведены в таблицах 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2.

#### Составы проявляющих растворов

| Наименование компонентов    | Марка и состав проявителя, г/л и мл |            |            |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------|------------|
|                             | №1                                  | УП-2М      | ВРП        |
| Метол                       | 1,0                                 | 5,0        | 6,0        |
| Гидрохинон                  | 5,0                                 | 6,0        | 20,0       |
| Сульфит натрия              | 26,0                                | 40,0       | 140,0      |
| Натрий углекислый безводный | 20,0                                | 31,0       | -          |
| Калий метаборат             | -                                   | -          | 112,0      |
| Бромистый калий             | 1,0                                 | 4,0        | 16,0       |
| Калия гидроксид(едкое кали) | -                                   | -          | 17,4       |
| Вода дистиллированная       | до 1000 мл                          | до 1000 мл | до 1000 мл |

Таблица 4.3

#### Составы закрепляющих растворов

| Наименование компонента           | Состав фиксажа после обработки в проявителе |            |            |
|-----------------------------------|---------------------------------------------|------------|------------|
|                                   | №1                                          | УП-2М      | ВРП*       |
| Тиосульфат натрия кристаллический | 250,0                                       | 250,0      | 3000,0     |
| Метабисульфит натрия              | -                                           | 30,0       | 30,0       |
| Сульфит натрия безводный          | 20,0                                        | -          | -          |
| Кислота серная концентрированная  | 2,0                                         | -          | -          |
| Вода дистиллированная             | до 1000 мл                                  | до 1000 мл | до 1000 мл |

\*Для получения негативного изображения р-р разбавляется водой в отношении 1:3

Таблица 4.4

Состав дополнительных растворов для обращения изображения в фотопластинах ВРП

| Наименование компонента                             | Отбеливающий раствор, | Осветляющий раствор, |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Аммоний двухромовокислый или калий двухромовокислый | 7,0 г                 | -                    |
| Кислота серная концентрированная                    | 10 мл                 | -                    |
| Сульфит натрия безводный                            | -                     | 20,0 г               |
| Вода дистиллированная или деионизованная            | до 1000 мл            | до 1000 мл           |

9.3. Выбрать растворы, необходимые для обработки экспонированного фотоматериала, познакомиться с последовательностью обработки и режимами. Налить соответствующие растворы в ванночки (кюветы)

**Фотохимическая обработка.** Процесс ФХО несколько различается по режимам и последовательности обработки в зависимости от используемых фотоматериалов и поставленной конечной задачи. Последовательность стадий и режимы обработки приведенных выше фотопленок и фотопластин для получения негативного изображения даны в таблицах 4.5-4.8.

Таблица 4.5

Последовательность стадий и режимы обработки фототехнических пленок и пластин

| Стадия обработки                          | Микрат –200<br>Микрат-300<br>Микрат-900 |                             | ФТ-41,<br>ФТ101,ФТ101П     |                                | ВР-Э, ВР-П                 |                        |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------|
|                                           | Продол-<br>жительн<br>мин               | Темпе-<br>-<br>ратура<br>°С | Продол-<br>жительн.ми<br>н | Темп<br>е-<br>рату<br>ра<br>°С | Продол-<br>жительн.ми<br>н | Темпе-<br>ратура<br>°С |
| Проявление в проявите-<br>ле №1 или УП-2М | 2-6, 6-8,<br>4-10                       | 20±0,5                      | 2-4                        | 20±0,<br>5                     | -                          | -                      |
| Проявление в прояви-<br>теле ВРП          | -                                       | -                           | -                          | -                              | 4-5                        | 20±0,5                 |
| Ополаскивание в воде                      | 0,1                                     | 15±5,0                      | 0,1                        | 15±5,<br>0                     | 0,1-0,2                    | 17±3,0                 |

|                                                      |                      |        |      |        |      |        |
|------------------------------------------------------|----------------------|--------|------|--------|------|--------|
| Прерывание проявления в 2%-ном р-ре уксусной кислоты | -                    | -      | -(2) | 20±0,5 | -    | -      |
| Фиксирование                                         | 15                   | 20±2   | 5    | 20±2   | 5-10 | 20±2   |
| Промывка                                             | 5-10                 | 15±5,0 | 10   | 15±5,0 | 5-10 | 17±3,0 |
| Сушка                                                | До полного высыхания |        |      |        |      | 20±5   |

Для получения обращенного (позитивного) изображения на фотопластинах ВР-П используется два раствора, приготовленных из концентрированного проявителя ВРП9(табл. 4.5) разбавлением водой в отношении: I- й раствор –1:1, II-й раствор – 1:3. Во второй раствор можно ввести смачиватель СВ-1147 в концентрации 0,05 г/л. Составы отбеливающего и осветляющего растворов приведены в таблице 4.4.

Последовательность стадий и режимы для обработки фотопластинок ВР-П при получении обращенного (позитивного) изображения приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6

Последовательность стадий и режимы для обработки фотопластинок ВР-П при получении обращенного (позитивного) изображения

| Стадии обработки                                       | Продолжительность стадий, мин | Температура обрабатывающих растворов, °С |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|
| Проявление в растворе I                                | 5                             | 20±0,5                                   |
| Промывка                                               | 3                             | 17±3                                     |
| Отбеливание                                            | 1,5                           | 20±0,5                                   |
| Промывка                                               | 1                             | 17±3                                     |
| Осветление                                             | 3                             | 20±0,5                                   |
| Промывка                                               | 5                             | 17±3                                     |
| Засветка лампой 500 Вт на расстоянии 0,7 м от фотослоя | 1                             | 20±0,5                                   |
| Проявление в растворе II                               | 33                            | 17±3                                     |
| Промывка                                               | 1                             | 20±0,5                                   |
| Фиксирование                                           | 2                             | 20±0,5                                   |
| Окончательная промывка                                 | 5-10                          | 17±3                                     |
| Сушка                                                  | До полного высыхания          |                                          |

9.5. Провести фотохимическую обработку экспонированных фотопластин (фотоленки) при красном

свете в соответствии со стадиями обработки и по соответствующим режимам.

Извлечь пленку из кассеты при красном свете в лаборатории; используя пинцет или зажим погрузить пленку в ванну с проявляющим раствором эмульсией вниз, дважды перевернуть, оставить в положении эмульсией вниз, ванночку слегка покачивать для смены раствора над эмульсией, следить периодически за появлением изображения, по истечении времени проявления извлечь пленку, перенести в следующую ванну. Извлечение следует проводить плавно во избежание срыва на некоторых участках разбухшего желатинового фотослоя и появления вследствие этого “проколов”. Уменьшает риск появления таких дефектов добавка капли этилового спирта в момент извлечения; кроме того в раствор может добавляться смачиватель. Промывку вести в проточной воде, следить за тем чтобы струя воды не попадала на эмульсионный слой. Сушка пластин проводится в естественно вентилируемом помещении на подставке в вертикальном положении, фотопленки подвешиваются с помощью прищепок.

10. Исследовать качество полученного ФШ, назначить марку ФШ.

Измерить с использованием бинокулярного или инструментального микроскопа минимальный размер элемента на ФШ, по таблице 1 определить группу, например, при размере элемента 10 мкм – группа А.

Определить класс точности ФШ после измерения неровности края; неровность края определить как разницу между вершинами и впадинами на границе светлых и темных участков, выполнить 20-30 измерений, взять среднее значение, назначить класс точности, например, если среднее значение составляет 0,16 мкм – класс точности – 1 (принять поле допуска на размер элемента 2,0 мкм, шаг мультипликации 1,0 мкм).

Определить класс дефектности, считая критической площадью  $10,0 \text{ мм}^2$ . Для этого определить площадь ФШ, подсчитать количество проколов на темных участках, рассчитать удельную плотность проколов, т.е. на  $\text{см}^{-2}$ , подсчитать количество включений на светлых участках ФШ и удельную плотность включений; далее назначить класс дефектности, считая допустимыми плотность проколов и включений 1,5;  $2,0 \text{ см}^{-2}$  соответственно.

Назначить марку ФШ, используя полученные результаты и ориентируясь на данные, приведенные в таблице 1.

### **Отчет**

по лабораторной работе

Отчет должен содержать задание, выбранную схему изготовления ФШ, краткое содержание выполненной работы, образец ФШ с указанием марки, выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулировать понятие фотошаблона.
2. Маркировка ФШ.
3. Сущность одно- и двухступенчатого процесса изготовления ФШ.
4. Конструкции ФШ, понятие образцового и рабочего ФШ.
5. Сущность мультиплицирования.
6. Содержание фотохимической обработки при выполнении ФШ.

### **Литература:**

1 Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. - М.: Высшая школа, 1979. - 367 с.

2. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование ИМС. -М.: Радио и связь, 1983. - 232 с.



Лабораторная работа № 6

**Анализ топологии БИС методом оптической  
микроскопии**

Цель работы:

- знакомство с методикой микроанализа интегральных структур;
- знакомство с реальной топологией ИМС;
- знакомство с элементной базой ИМС

Приборы, образцы: микроскоп МИМ-8М,  
лабораторная коллекция образцов ИМС с открытой  
поверхностью

**Методика микроанализа топологии ИМС**

Для осознанного оперирования конструктивно-технологическими ограничениями при проектировании топологии необходимо ознакомиться с ними непосредственно на реальном кристалле.

Представление о взаимном расположении изолированных зон, топологических элементов в интегральной схеме дает микрофотография кристалла с общим видом топологии усилителя широкополосного 140УД6, представленная на рисунке 1..

Размер кристалла 900х1000 мкм; цифрами 1-7 обозначены периферийные контактные площадки, с которых идет разводка на внешние выводы. На периферии располагаются также элементы, необходимые для решения технологических задач. К ним относятся группа знаков совмещения, изображенная на выноске д); в этой же области располагаются элементы – свидетели, например транзистор, показанный на выноске е); элементы информационного характера – маркировка кристалла – 140УД6.

На поле кристалла просматривается несколько изолированных зон. Более темная составляющая представляет собой изолирующую зону. Более светлое поле – изолированные области, в которых и располагаются активные и пассивные элементы. В качестве примера в выноске а) выделен вертикальный биполярный транзистор; в выноске б) – горизонтальный транзистор; диод представлен фрагментом в); резисторы – ж); конденсатор показан на выноске г).

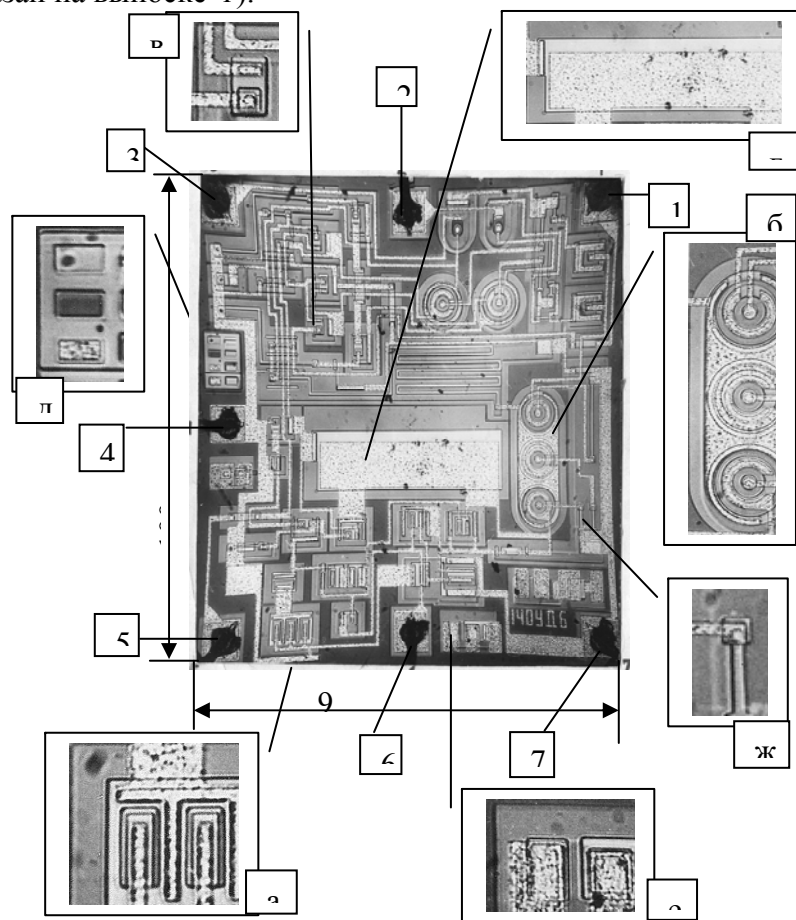


Рисунок 1 Топология кристалла полупроводниковой микросхемы:

цифрами 1 – 7 обозначены контактные площадки и внешние выводы; а) диод; б), в) – транзисторы; г) конденсатор; д) знаки совмещения; е) технологический транзистор-свидетель; ж) диффузионные полосковые резисторы.

Кроме того, имеет смысл идентифицировать все элементы на электрической схеме (рисунок 2) с их реальной топологией и положением на кристалле.

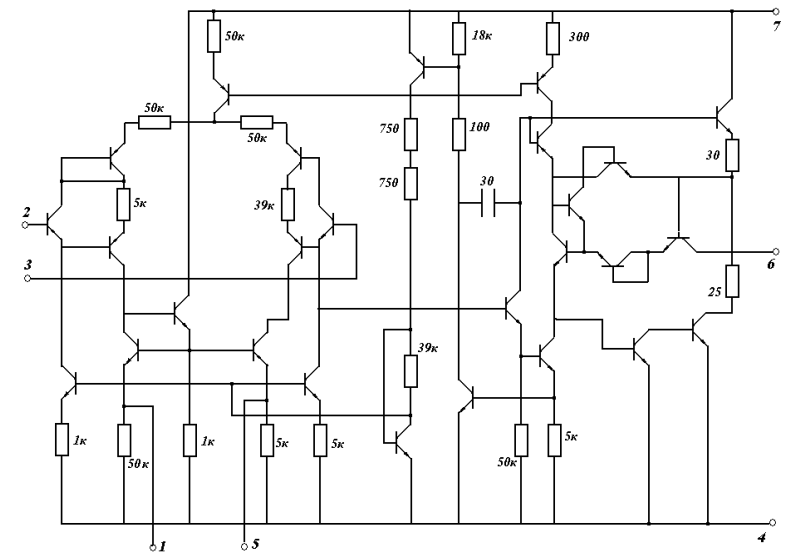


Рисунок 2 Электрическая принципиальная схема усилителя (140УД6)

### **Порядок выполнения работы**

- 1 Ознакомиться с металлографическим микроскопом МИМ-8М
- 2 Освоить работу на металлографическом микроскопе МИМ-8М
- 3 Изучит топологию фрагмента ИМС
- 4 Проанализировать электрическую принципиальную схему представленного фрагмента
- 5 Сопоставить реальную топологию с электрической принципиальной схемой
- 6 Выделить на топологии активные элементы, проанализировать их конструкцию
- 7 Привести поперечную структуру конструктивно различающихся транзисторов
- 8 Проанализировать технологические элементы топологии, указать их назначение

Отчет должен содержать:

- изображение топологической структуры (фото);
- изображение электрической схемы принципиальной;
- эскизы поперечных сечений конструктивно различающихся активных элементов
- выводы по работе

Контрольные вопросы:

- какие характерные черты отличают биполярный транзистор;
- в чем различие вертикального и горизонтального (латерального) транзисторов;
- какие технологические элементы присутствуют в топологии ИМС.

Лабораторная работа № 7

**Диффузия в технологии микросхем**

**Цель работы:** изучить основы процесса термической диффузии, ознакомиться с методами формирования и контроля основных параметров диффузионных слоев на пластине монокристаллического кремния.

**Оборудование, материалы, приборы:** лабораторная установка диффузии по методу открытой трубы, кварцевые контейнеры (ампулы), диффузенты, полупроводниковые пластины, приборы контроля поверхностного сопротивления, растворы для очистки, материалы и приспособления для подготовки косых шлифов.

**Основы теорий процесса диффузии**

Диффузия легирующей примеси является одной из основных операций планарной технологии полупроводниковых интегральных микросхем (ИМС). Она используется для формирования р-п переходов, а также областей полупроводниковых приборов и ИМС. Широкое применение диффузии в технологии полупроводниковых ИМС обусловлено возможностью создания полупроводниковых структур с заданными геометрическими размерами (погрешность воспроизведения размеров составляет доли микрометра) и распределением концентрации примеси по глубине.

Диффузией называют перенос вещества, обусловленный хаотическим тепловым движением атомов, возникающий вследствие наличия градиента концентрации данного вещества и направленный в сторону убывания этой концентрации в той среде, где происходит диффузия.

Впервые математическое описание диффузионных процессов было предложено немецким ученым А.Фиком в

виде двух законов.

Первый закон Фика определяет скорость проникновения атомов диффундирующего вещества при постоянном во времени потоке атомов и неизменном градиенте их концентрации. Для одномерного случая он имеет вид

$$F(x) = -D \frac{\partial N}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $F(x)$  - вектор плотности потока атомов диффундирующего вещества;

$D$  - коэффициент диффузии ;

$\frac{\partial N}{\partial x}$  - вектор градиента концентрации.

Коэффициент  $D$  (см<sup>2</sup>/с) определяет скорость выравнивания разности концентраций и зависит от подвижности диффундирующих атомов.

Второй закон Фика определяет скорость, с которой накапливаются атомы диффундирующей примеси. Для случая одномерного процесса уравнение имеет вид

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial N}{\partial x} \right). \quad (2)$$

В выражении (2) учтена зависимость коэффициента  $D$  от концентрации диффундирующей примеси. Если же эту зависимость не учитывать, выражение (2) принимает следующий вид

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Для сокращения времени проведения диффузионного процесса необходимо увеличивать коэффициент  $D$ , что в первую очередь достигается путем повышения температуры. Температурная зависимость коэффициента  $D$  имеет вид

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (4)$$

где  $D_0$  - постоянная, численно равная коэффициенту диффузии при бесконечно большой температуре;

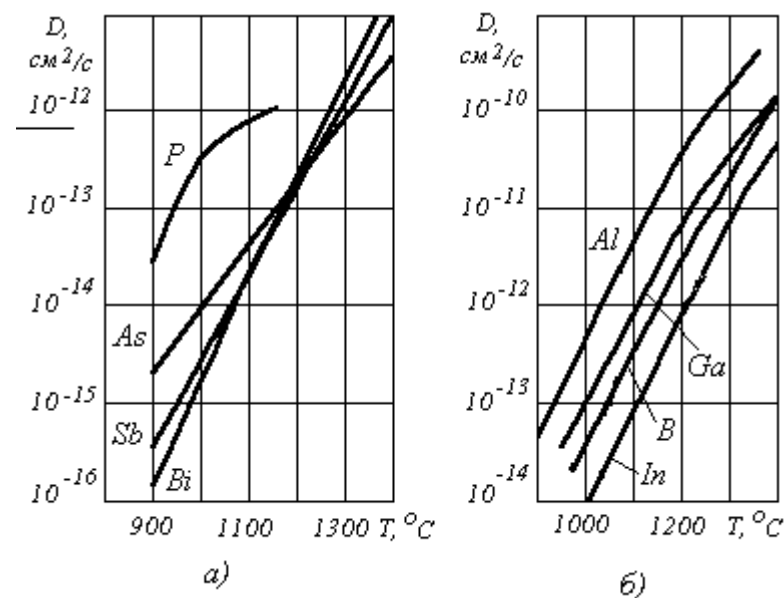
$\Delta E$  - энергия активации ( в пределах 3,5 – 4,3 эВ в кремнии );

$k$  - постоянная Больцмана (  $k = 1,32 \cdot 10^{-23}$  Дж/град ) ;

$T$  - температура проведения диффузии.

При диффузии в кремний для бора коэффициент  $D_0$  равен  $10 \text{ см}^2/\text{с}$ , для фосфора -  $10,5 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Температурные зависимости коэффициента диффузии для донорных и акцепторных примесей



приведены на графиках рис.1.

Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента диффузии примеси: *а* – доноры, *б* – акцепторы.

Уравнение (4) имеет два частных случая решения, зависящих от принятых начальных условий и ограничений и описывающих два варианта распределения концентрации примеси, имеющих место при проведении диффузии в планарной технологии.

Первый частный случай - диффузия из источника бесконечной мощности ("загонка" примеси). Начальное и граничные условия для решения уравнения (4) имеют вид:

$$\begin{aligned} N(x, t) &= 0 && \text{при } t = 0; \\ N(0, t) &= N_0 && \text{при } t > 0, x = 0. \end{aligned}$$

Распределение концентрации примеси по глубине проникновения диффузионного слоя  $x$  описывается следующим выражением:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \quad (5)$$

где  $N_0$  - концентрация примеси на поверхности кристалла;

$t$  - время проведения диффузии ;

$\operatorname{erfc}$  - функция дополнения интеграла ошибок до единицы.

Значения функции  $\operatorname{erfc}$  приводятся в таблицах; они содержатся и в рекомендуемой работе [2] и в математическом обеспечении ПК.

Данный случай диффузии реализуется при формировании сильнолегированных разделительных (изолирующих) областей, а также эмиттеров.

Второй случай - диффузия из источника ограниченной мощности ("разгонка" примеси). В этом случае приток диффузанта извне отсутствует, а диффузия ведется из тонкого приповерхностного слоя, содержащего определенное количество заранее введенных атомов примеси  $Q$ .



Распределение концентрации примеси описывается функцией Гаусса и имеет вид

$$N(x, t) = N_0 \exp\left(-\frac{x^2}{Dt}\right). \quad (6)$$

В планарной технологии часто диффузию осуществляют в две стадии. Вначале проводят кратковременную диффузию из источника бесконечной мощности ("загонка"), а затем при более высокой температуре - "разгонку". В этом случае распределение примесей описывается выражением

$$N(x, t) = \frac{2N_0}{\pi} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right), \quad (7)$$

где  $D_1$  и  $t_1$  - коэффициент и время диффузии при "загонке".

На рис.2 изображено распределение примеси для двух приведенных выше частных случаев диффузии.

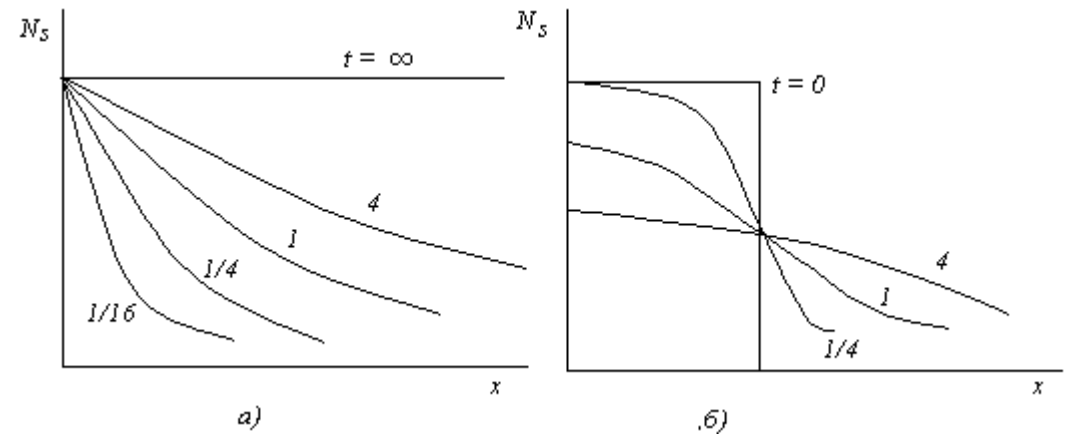
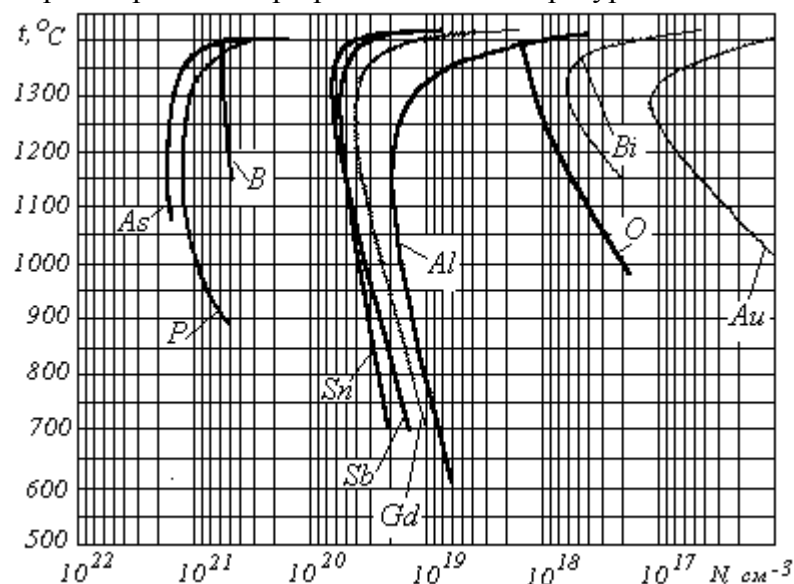


Рис.2. Распределение концентрации примесей: а) диффузия из неограниченного источника; б) диффузия из

ограниченного источника; цифры у кривых – время  
диффузии в условных относительных единицах.

Концентрация примеси  $N_0$  определяется предельной  
растворимостью примеси в кремнии; данные по  
предельной растворимости при различных температурах



для наиболее часто используемых диффузантов  
приведены на рис.3.

Рис.3. Предельная растворимость примесей в  
кремнии по температуре.

В таблице 1 показаны численные значения  
электрофизических характеристик по кремнию и оксиду  
кремния, необходимые для расчетов параметров  
диффузионного процесса.

*Таблица 1*  
 Параметры диффузии элементов 3 и 5 групп в кремнии

| Примес<br>ь | Тип<br>про<br>во-<br>дим<br>о-<br>сти | Коэф-<br>фициент<br>диффу-<br>зии при<br>бесконеч<br>но<br>большой<br>температ<br>уре $D_0$ ,<br>$\text{см}^2/\text{с}$ | Энерг<br>ия<br>актива<br>ции<br>диффу<br>зии $E$ ,<br>эВ | Максим<br>альная<br>раствор<br>имость<br>атомов,<br>$\text{см}^2$ | Темпе-<br>ратура<br>макси-<br>мальной<br>раствор-<br>имости, °C | Оц                                      |
|-------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|             |                                       |                                                                                                                         |                                                          |                                                                   |                                                                 | в<br>интер<br>ле<br>темпе<br>тур,<br>°C |
| Бор         | $p$                                   | 5.1                                                                                                                     | 3.7                                                      | $5 \cdot 10^2$                                                    | 1300                                                            | 900                                     |
| Алюми       | $p$                                   | 8.0                                                                                                                     | 3.5                                                      | $2 \cdot 10^1$                                                    | 1150                                                            | 1100                                    |
| Галлий      | $p$                                   | 60.0                                                                                                                    | 3.9                                                      | $4 \cdot 10^1$                                                    | 1250                                                            | 1100                                    |
| Индий       | $p$                                   | 16.5                                                                                                                    | 3.9                                                      | $10^{19}$                                                         | 1300                                                            | -                                       |
| Таллий      | $p$                                   | 16.5                                                                                                                    | 3.9                                                      | —                                                                 | —                                                               | -                                       |
| Фосфор      | $p$                                   | 10.5                                                                                                                    | 3.7                                                      | $1.5 \cdot 1$                                                     | 1150                                                            | 100...                                  |
| Мышья       | $p$                                   | 3.0                                                                                                                     | 3.9                                                      | $2 \cdot 10^2$                                                    | 1100                                                            | 1100..                                  |
| Сурьма      | $p$                                   | 8.0                                                                                                                     | 4.0                                                      | $6 \cdot 10^1$                                                    | 1300                                                            | 10                                      |
| Висмут      | $p$                                   | $1.0 \cdot 10^3$                                                                                                        | 4.6                                                      | $8 \cdot 10^1$                                                    | 1300                                                            | -                                       |

Следует отметить, что приведенные выражения не очень точно описывают реальное распределение примесей в планарной технологии. Причины этого разнообразны: зависимость коэффициента диффузии от концентрациями примеси ; образование дефектов (дислокаций в процессе диффузии) ; образование оксидных пленок на поверхности пластин . Поэтому на производстве при изготовлении полупроводниковых ИМС пользуются эмпирическими кривыми, которые

позволяют получить хорошую воспроизводимость электрофизических параметров диффузионных слоев.

### Технология проведения процесса

Диффузию примесных атомов проводят, как правило, в диапазоне температур от 1000 до 1300°C. При температуре ниже 1000°C значения коэффициентов диффузии очень малы (рис. 3) и поэтому глубина проникновения примеси незначительна. Выше 1300°C параметры диффузионных слоев ухудшаются из-за нарушения поверхности полупроводниковой пластины под действием температуры.

В технологии диффузии наибольшее распространение нашли следующие примеси: бор, фосфор, сурьма и мышьяк. Обычно мышьяк из-за высокой растворимости (рис. 3) и малому коэффициенту диффузии используется при создании скрытого  $p^+$ -слоя. Источниками указанных примесей являются их химические соединения, которые могут быть жидкими, твердыми и газообразными. Наименее опасными в работе и удобными в регулировании параметров являются жидкие источники. Газообразные источники (фосфин  $PH_3$ , треххлористый бор  $BCl_3$ , диборан  $B_2H_6$ ) очень токсичны и поэтому их использование затруднено.

Диффузия проводится в закрытой или открытой трубе в печах с термическим нагревом. В первом случае полупроводниковые пластины и источник помещают в ампулу из кварцевого стекла, запаивают ее и устанавливают в печь с окислительной атмосферой.

Во втором случае (рис. 4) диффузионная труба I сообщается с атмосферой непосредственно через вытяжную систему 2, чтобы уменьшить загрязнения. Через входное отверстие трубы 3 вводится газ-носитель для подачи диффузанта и кислород. Диффузант может

наносится и перед загрузкой пластин 4 в трубу путем их окунания в жидкий источник.

На рис.4 изображена диффузионная система с жидким источником диффузанта, содержащемся в барботере 5, расположенном в термостате, обеспечивающем регулировку температуры источника и давление его паров.

Наиболее распространенными жидкими источниками фосфора являются оксихлорид фосфора  $POCl_3$  (не гигроскопичен, стабилен по концентрации во времени), трихлорид фосфора  $PCl_3$  и пентафторид фосфора  $PF_5$ , а для бора - трехбромистый бор  $BBr_3$ . Концентрация диффузанта на поверхности пластины управляется путем изменения температуры источника и в печи, состава и расхода газа-носителя, диаметра диффузионной трубы.

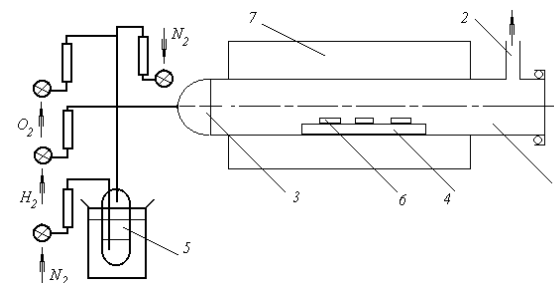


Рис. 4. Установка для проведения диффузии в открытой трубе и в потоке газа-носителя: 1- кварцевая труба; 2- вытяжная система; 3 – входное отверстие трубы; 4 – загрузочная кассета; 5 – источник диффузанта; 6 – полупроводниковые пластины; 7 – печь нагрева.

Технологический процесс диффузии укрупненно можно представить следующей последовательностью операций:

- контроль параметров исходной пластины ;
- определение времени и температуры процесса, обеспечивающих требуемые параметры диффузионного слоя (определяются по температурно-временному графику

и эмпирическим зависимостям) ;

- подготовка печи и вывод ее на режим;
- обработка пластин (очистка и выдержка в течение нескольких минут в печи при подаче только азота для установления заданного температурного режима) ;
- проведение диффузии ;
- контроль параметров ;
- отбраковка.

Обычно при изготовлении ИМС диффузия проводится в две стадии, что делает процесс более управляемым, повышает его воспроизводимость и позволяет получить на пластине оксид с хорошими защитными свойствами.

Первая стадия введения примеси ("загонка") проводится при сравнительно низкой температуре ( $700...1100^{\circ}\text{C}$ ) в течение короткого промежутка времени (1...20 мин). При этом образуется тонкий диффузионный слой с *erfc* - распределением. После "загонки" пластины извлекаются из печи и с их поверхности удаляется слой оксида, содержащий примеси бора или фосфора.

На второй стадии ("разгонке") пластины выдерживают при высокой температуре ( $900...1200^{\circ}\text{C}$ ) в течение длительного времени (от десятков минут до нескольких часов) до получения требуемого распределения концентрации примеси в диффузионном слое. При этом диффузант не подается в трубу. Происходит окисление поверхности пластины для создания защитного слоя.

По истечении времени диффузии пластины из печи извлекаются не сразу, а после медленного охлаждения (со скоростью 10...20 град/мин), чтобы не произошла термозакалка пластины и изменение ее параметров.

После проведения каждой стадии диффузии осуществляется контроль параметров диффузионных слоев. Контролируются толщина слоя и его удельное сопротивление. Толщина слоя может быть определена методом косого олифа, удельное сопротивление -

четырёхзондовым методом.

### **Оборудование и измерительные приборы**

В данной лабораторной работе для проведения диффузии используется диффузионная печь типа СДО-125, которая широко используется в электронной промышленности. Эта печь поддерживает температуру с точностью  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  в диапазоне  $900 - 1250^\circ\text{C}$ . Труба и кассета для пластин изготовлены из кварцевого стекла.

Для обеспечения воспроизводимости параметров диффузионных слоев необходима тщательная химическая очистка пластин, которая проводится в плавиковой ( $\text{HF}$ ) и азотной ( $\text{HNO}_3$ ) кислотах. Эти кислоты очень токсичны, а их попадание на кожу человека может привести к несчастным случаям. Поэтому работа с кислотами проводится только в вытяжном шкафу.

Измерение удельного сопротивления осуществляется на специальной установке (измерителе удельного сопротивления ИУС-1 или ИУС-2) четырёхзондовым методом. Методика измерения прилагается к описанию установки.

Емкость р-п перехода измеряется на приборе Е7-9, а напряжение пробоя путём снятия вольтамперной характеристики на приборе для наблюдения характеристик транзистора (ПНХТ-1). Контакт к пластине при измерении параметров р-п перехода осуществляется на зондовой установке.

### **Содержание работы.**

1. Провести диффузию бора в кремниевую пластину с заданной исходной концентрацией донорной примеси.
2. Рассчитать глубину залегания р-п перехода, используя параметры диффузионного процесса, заданные преподавателем.

3. Определить толщину и удельное сопротивление полученного диффузионного слоя.

4. Рассчитать и измерить емкость и напряжение пробоя р-п перехода диффузионных структур, используя технологические параметры, заданные преподавателем.

### **Порядок выполнения работы**

1. Включать диффузионную печь и прогреть ее до заданной температуры.

2. Получить кремниевые пластины и произвести химическую очистку.

2.1. Обработать в азотной кислоте;

2.2. Промыть в дистиллированной воде;

2.3.. Обработать в плавиковой кислоте;

2.4. Промыть в дистиллированной воде.

3. Нанести на пластины диффузант.

3.1. Окунуть в спиртовой раствор борной кислоты.

3.2. Просушить пластины в термостате.

4. Установить пластины в кварцевую кассету.

5. Кассету загрузить в печь.

6. Выполнить индивидуальное задание по расчету параметров диффузионных структур.

7. По истечении времени диффузии извлечь пластины из печи и снять с них оксид путем окунания в плавиковую кислоту.

8. Измерить удельное сопротивление диффузионного слоя, емкость и напряжение пробоя р-п перехода.

9. Изготовить косой шлиф, закрепив пластину в специальном приспособлении с помощью воска. Для получения шлифа использовать абразивный порошок и алмазную пасту.

10. Окунуть пластину в плавиковую кислоту, а затем промыть дистиллированной водой.

11. Измерить толщину диффузионного слоя под микроскопом.



### **Контрольные вопросы**

1. Законы диффузии и их частные решения.
2. Источники диффузанта.
3. Технологическая последовательность проведения диффузии.
4. Взаимосвязь технологических и электрических параметров диффузионных структур.
5. Методы контроля параметров диффузионных структур.

### **Литература**

1. Достанко А.П. Технология интегральных схем. - Мн.: Высшая школа, 1982. - 206 с
2. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. - М.: Высшая школа, 1979. - 367 с.
3. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование ИМС. - М.: Радио и связь, 1983. - 232 с.