

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

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

**Е. В. Телеш, В. Ф. Холенков, Г. М. Шахлевич**

## **ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области экономики и организации  
производства в качестве учебно-методического пособия для студентов  
специальности 1-27 01 01-11 «Экономика и организация производства»  
(направление «Радиоэлектроника и информационные услуги»)*

Минск БГУИР 2015

УДК 658.51(076)  
ББК 30.606я73  
Т31

Рецензенты:

кафедра конструирования и производства приборов  
Белорусского национального технического университета  
(протокол №10 от 17.03.2014 г.);

профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники  
Белорусского государственного университета,  
доктор физико-математических наук, профессор Н. А. Поклонский

**Телеш, Е. В.**

Т31 Производственные технологии. Лабораторный практикум :  
учеб.-метод. пособие / Е. В. Телеш, В. Ф. Холенков, Г. М. Шахлевич. –  
Минск : БГУИР, 2015. – 60 с. : ил.  
ISBN 978-985-488-987-0.

Содержит лабораторные работы по исследованию механических свойств  
конструкционных материалов, изучению термообработки сталей, процессов  
диффузии и фотолитографии в микроэлектронном производстве, технологии  
изготовления печатных плат.

Предназначено для закрепления и углубления теоретических знаний студентов,  
получения практических навыков.

УДК 658.51(076)  
ББК 30.606я73

ISBN 978-985-488-987-0

© Телеш Е. В., Холенков В. Ф.,  
Шахлевич Г. М., 2015  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиэлектроники», 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	4
Лабораторная работа №2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ .....	15
Лабораторная работа №3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ .....	24
Лабораторная работа №4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИФФУЗИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ .....	34
Лабораторная работа №5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ .....	44
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	58

## Лабораторная работа №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы:** изучение основных видов механических испытаний материалов, формирование навыков проведения испытаний, определение прочностных характеристик испытываемых материалов.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В широком смысле под механическими свойствами понимают параметры, которые дают информацию о поведении материала под действием внешних нагрузок. Количественные величины этих параметров обусловлены природой взаимодействия молекул и атомов в твердом теле, фазовым составом сплавов, их структурой.

Значения механических свойств позволяют определить пределы нагрузки для каждого конкретного материала. Результаты определения механических свойств используют в расчетной конструкторской практике при проектировании машин, приборов, конструкций.

Большое разнообразие условий эксплуатации материалов, повышение и расширение требований к ним привело к разработке различных методов определения их свойств. В зависимости от скорости роста нагрузки испытания делятся на **статические**, когда процесс осуществляется медленно, нагрузка возрастает плавно или остается постоянной длительное время и **динамические**, когда нагрузка возрастает мгновенно (ударно). Испытания могут проводиться при комнатных, повышенных и отрицательных температурах. Различны и схемы нагрузки образцов: **растяжение, сжатие, изгиб, кручение, срез**.

К основным механическим свойствам конструкционных материалов и сплавов, определяющим работоспособность и область их применения, относят: **твердость, прочность, упругость, пластичность, вязкость, выносливость**.

**Твердость** – сопротивление материала проникновению в него индентора из другого более твердого материала. **Прочность** – способность материала сопротивляться разрушению при воздействии внешних напряжений. **Упругость** – способность материала восстанавливать свои размеры и форму при снятии внешних нагрузок. **Пластичность** – способность материала изменять форму и размеры при воздействии усилия. **Вязкость** – сопротивление материала динамическому, ударному воздействию нагрузки. В этом случае мы определяем работу разрушения.

Испытания на растяжение при комнатной температуре проводят в соответствии с ГОСТ 1497–84 на разрывных машинах. В зависимости от принципа действия нагружающего механизма испытательные машины подразделяют на механические и гидравлические. Основной характеристикой

разрывной машины является развиваемое ею максимальное усилие. На рис. 1.1 показана упрощенная схема гидравлической машины. По давлению в цилиндре определяют растягивающую силу, а смещение поршня, измеренное точным прибором, дает возможность определить изменение размера образца.

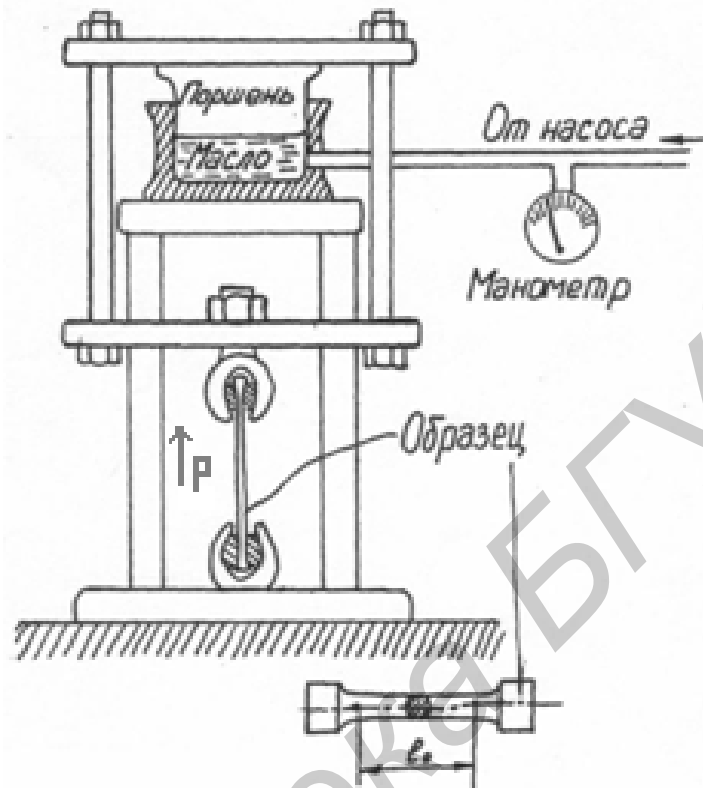


Рис. 1.1. Схема гидравлической разрывной машины

Механические свойства обычно определяют по первичным кривым растяжения в координатах: нагрузка –  $P$ , абсолютное удлинение –  $\Delta l$ , которые автоматически записываются на диаграммной ленте испытательной машины. Все многообразие этих кривых при комнатной температуре в первом приближении можно свести к трем типам диаграмм растяжений (ДР) (рис. 1.2).

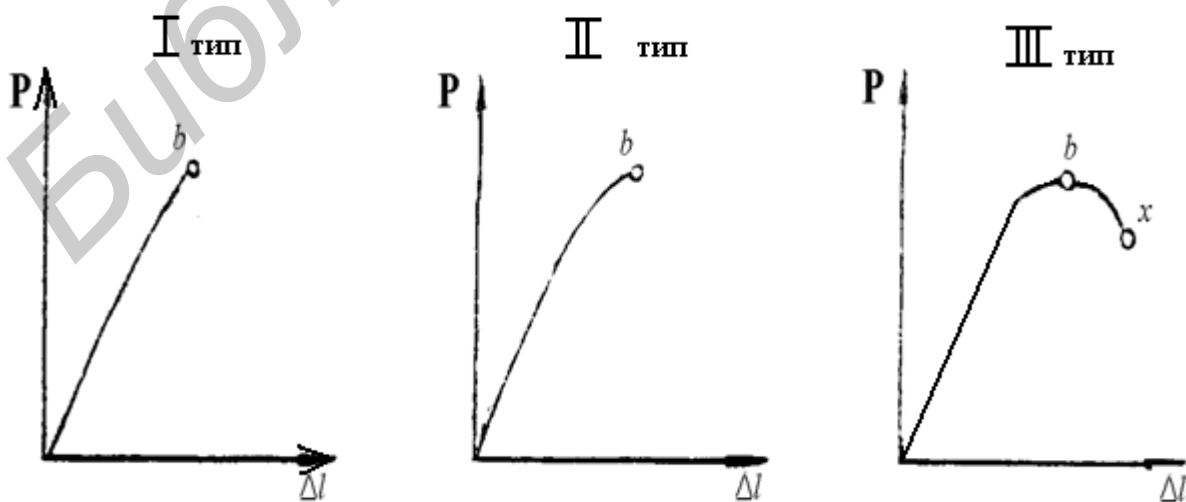


Рис. 1.2. Типы диаграмм растяжения

ДР I типа характерна для образцов, разрушающихся без заметной пластической деформации (хрупкие материалы). ДР II типа получается при растяжении образцов, равномерно деформирующихся вплоть до разрушения. Наконец, ДР III типа характерна для образцов, разрушающихся после образования шейки в результате сосредоточенной деформации.

### Прочностные свойства

Прочностные свойства – характеристики сопротивления материала образца деформации или разрушению. Поскольку величина усилия  $P$  не может рассматриваться как характеристика материала, в практике используется понятие механического напряжения ( $\sigma$ ), представляющего собой усилие, отнесенное к площади поперечного сечения:

$$\sigma_i = P/F_0, \quad (1.1)$$

где  $P$  – усилие растяжения;

$F_0$  – начальное поперечное сечение образца перед испытанием.

Большинство стандартных прочностных характеристик рассчитывают по положению определенных точек на ДР. На рис. 1.3 дана диаграмма III типа, на которой нанесены характерные точки, по ординатам которых рассчитывают прочностные характеристики. Кривая  $OAC$  характеризует поведение (деформацию) металла под действием напряжений  $\epsilon$ . До точки  $A$  деформация пропорциональна напряжению. Тангенс угла наклона прямой  $OA$  к оси абсцисс характеризует модуль упругости материала  $E = \sigma/\epsilon$ , где  $\epsilon = \Delta l/l_0$  – относительная деформация.

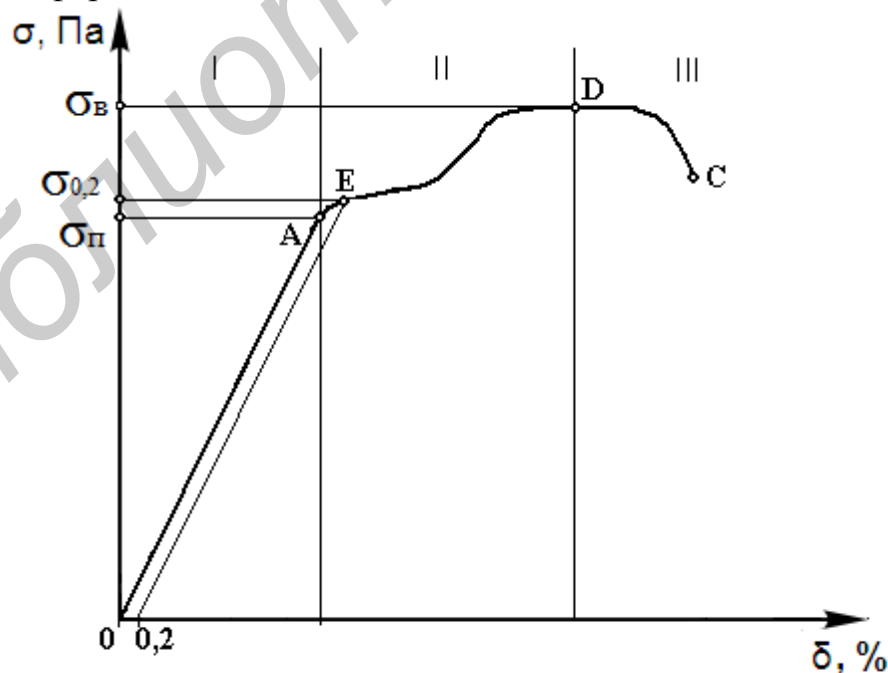


Рис. 1.3. Диаграмма растяжения металлов в координатах  $\sigma$ - $\epsilon$

Модуль упругости  $E$  определяет жесткость материала и практически не зависит от структуры металла.

Напряжение, соответствующее точке  $A$ , называют **пределом пропорциональности** ( $\sigma_p$ ). **Предел упругости** определяется как напряжение, при котором остаточная деформация достигает 0,05 % (или еще меньше) первоначальной длины образца:

$$\sigma_y = P_{0,05} / F_0. \quad (1.2)$$

Напряжение, вызывающее остаточную деформацию, равную 0,2 %, называют **пределом текучести** ( $\sigma_T$  или  $\sigma_{0,2}$ ):

$$\sigma_{T(0,2)} = P_{0,2} / F_0. \quad (1.3)$$

Дальнейшее повышение нагрузки вызывает более значительную пластическую деформацию во всем объеме металла. Напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца, называют **временным сопротивлением, или пределом прочности** ( $\sigma_B$ ):

$$\sigma_B = P_{\max} / F_0. \quad (1.4)$$

У пластичных металлов, начиная с напряжения  $\sigma_B$ , деформация сосредоточивается в одном участке образца, где появляется местное сужение поперечного сечения – так называемая шейка. В результате развития множественного скольжения в шейке образуется высокая плотность вакансий и дислокаций, возникают зародышевые несплошности, укрупнение которых приводит к возникновению пор. Сливаясь, поры образуют трещину, которая распространяется в направлении, поперечном оси растяжения, и в некоторый момент образец разрушается (точка  $C$  на рис. 1.3).

В процессе растяжения металл испытывает деформационные упрочнения (наклеп), поскольку сетка деформаций действует как арматура в структуре металла.

Увеличение длины образца в результате деформации характеризуется абсолютным удлинением  $\Delta l$ , но для оценки пластических свойств материалов удобнее использовать относительное удлинение  $\epsilon = \Delta l / l_0$ , которое при выражении в процентах обозначается как  $\delta$ :

$$\delta = (l_k - l_0) / l_0 \cdot 100 \% , \quad (1.5)$$

где  $l_0$  и  $l_k$  – начальная и конечная длины образца соответственно.

Величина  $\delta$  является условной характеристикой, поскольку деформация с самого начала развивается при непрерывно меняющейся длине  $l$ , а отношение  $\Delta l / l_0$ , воспринимаемое как удлинение образца на единицу длины, не имеет физического смысла.

Разница между  $l_K$  и  $l_0$  тем больше, чем больше степень деформации и характеризует способность материала к пластической деформации. Уменьшение поперечного сечения образца при испытаниях на растяжение характеризуется величиной относительного сужения  $\psi$ , %:

$$\psi = (F_0 - F_K) / F_0 \cdot 100 \% , \quad (1.6)$$

где  $F_0$  и  $F_K$  – начальная и конечная площади поперечного сечения образца.

Как и  $\delta$ , это условная характеристика деформации, ибо площадь сечения непрерывно меняется в процессе испытания.

Характеристики  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ , а также  $E$  являются базовыми – они включаются в ГОСТы на поставку конструкционных материалов, в паспорта приемочных испытаний и входят в расчеты прочности и ресурса.

### Методика проведения испытаний на растяжение

Для испытания на статическое растяжение применяют цилиндрические или плоские образцы (рис. 1.4). По ГОСТ 1497–73 рекомендуется применять цилиндрические образцы диаметром 3 мм и более и плоские толщиной 0,5 мм и более с начальной расчетной длиной соответственно  $l_0 = 5,65 \sqrt{F_0}$  и  $l_0 = 11,3 \sqrt{F_0}$ .

Первые образцы называют короткими, вторые – длинными.

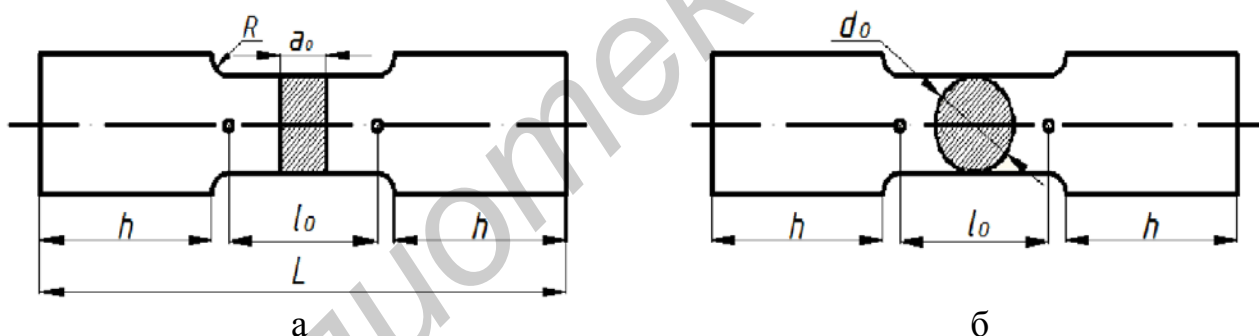


Рис. 1.4. Стандартные образцы для испытания на растяжение:  
а – образец с квадратным сечением; б – образец с круглым сечением

Применение коротких образцов предпочтительнее. На рабочей части образцов недопустимы следы механической обработки, забоины и другие дефекты.

Перед испытаниями измеряют поперечное сечение образцов (у цилиндрических – начальный диаметр рабочей части  $d_0$  мм, у плоских – начальную толщину рабочей части  $t_0$  мм, и начальную ширину  $h_0$  мм). Измерения проводят в трех местах рабочей части образца (в середине и по краям). Начальная расчетная длина образца ограничивается неглубокими кернами, рисками или иными метками. Точность измерения  $t_0$ ,  $h_0$  и  $l_0$  не менее 0,01 мм.



## Проведение испытаний

Установив образец на машине и выбрав зазоры, его медленно нагружают, через 3–7 с увеличивают нагрузку до заданного значения. Нагрузку следует увеличивать плавно, чтобы испытатель мог следить за положением стрелки силоизмерителя относительно шкалы в любой момент испытания, при нарушении плавности возрастания нагрузки нужно снизить скорость нагружения. После разрыва образца немедленно выключают машину, записав максимальную нагрузку, снимают образец и диаграмму. Стол (траверсу) и стрелку силоизмерителя возвращают в исходное положение. Рабочее пространство машины очищают от осколков образца и от масла, после чего приступают к испытанию следующего образца.

Для каждого образца в протоколе записывают его номер и условное обозначение, а также размеры расчетной части образца до испытания (начальную расчетную длину  $l_0$ , толщину  $t_0$  и ширину  $h_0$ ). Кроме того, в протоколе записывают рассчитанную начальную площадь поперечного сечения образца  $F_0$ . После разрыва измеряют и заносят в протокол размеры образца  $l_K$ ,  $\Delta l$ ,  $t_K$ ,  $h_K$ ,  $F_K$ , а также указывают максимальную нагрузку  $P_{\max} = P_6$  и рассчитанные по диаграмме нагрузки  $P_n$ ,  $P_y$  и  $P_{0,2}$ , соответствующие пределу пропорциональности, упругости и условному пределу текучести соответственно.

Относительное удлинение можно определить по первичной ДР. Определив абсолютное удлинение  $\Delta l$  к момент разрушения в точке  $C$  и зная начальную длину  $l_0$ , рассчитаем  $\delta$  по формуле (1.5). Недостаточная жесткость многих испытательных машин делает расчет по ДР менее точным, чем по результатам измерения  $l_K$  разорванного образца. Для определения длины  $l_K$  обе части разорванного образца плотно прикладывают одну к другой и измеряют расстояние между метками.

### Определение прочностных характеристик

Обработка диаграммы растяжения позволяет определить усилия  $P_n$ ,  $P_y$ ,  $P_{0,2}$ . Начинают с построения осей  $P$  и  $\Delta l$ , для чего продолжают прямолинейный участок диаграммы вниз (рис. 1.5), затем проводят ось  $\Delta l$  таким образом, чтобы исключить начальные и конечные искажения при вычерчивании диаграммы растяжения. Из точки пересечения прямолинейного участка линии растяжения и оси  $\Delta l$  (точка  $O$ ) проводят ось нагрузок  $P$ . В данном случае точку  $O$  принимаем за новое начало координат, исключая искаженный из-за недостаточной жесткости машины начальный участок  $DP$ .

Далее на произвольной высоте в пределах упругой области восстанавливают перпендикуляр  $AB$  к оси нагрузок  $P$ , откладывают вдоль него отрезок  $BC = 0,5AB$  и проводят линию  $OC$ . Если теперь провести касательную к кривой растяжения параллельно  $OC$ , то точка касания  $E$  определит координату нагрузки  $P_n$ .

Для определения  $P_n$ ,  $P_y$  и  $P_{0,2}$  вначале определим масштабы по оси нагрузок  $P$  и оси удлинений  $\Delta l$ . Масштаб по оси нагрузки равен отношению  $P_B/n$ , где  $P_B$  – максимальное усилие разрыва в ньютонах,  $n$  – число делений на диаграммной бумаге по оси  $P$  на диаграмме растяжения, соответствующей усилию  $P_B$ . Масштаб оси удлинений  $\Delta l$  равен отношению  $\Delta l/m$ , где  $\Delta l$  в миллиметрах – увеличение длины образца при растяжении (определяется по показаниям разрывной машины или измерением при сложенных частях образца после разрыва),  $m$  – число делений на диаграммной бумаге в пределах  $L_{деф}$  – длина отрезка  $ON$  в миллиметрах на диаграмме.

Для определения  $P_y$  находится  $\Delta l_{0,05}$ , соответствующее деформации образца 0,05 % от его длины  $l_0$  (рис. 1.6). Поскольку эта величина очень мала, то в учебных целях на диаграмме откладываем отрезок  $OK$  с учетом наименьшего разрешения при построении графика. Из точки  $K$  проводим отрезок  $KS$ , параллельный прямолинейному участку диаграммы. Проекция точки  $S$  на ось нагрузок  $P$  соответствует координате усилия  $P_y$ . Исходя из масштаба нагрузки определяем усилие  $P_y$ , равное длине отрезка  $OP_y$ , умноженного на масштаб нагрузок.

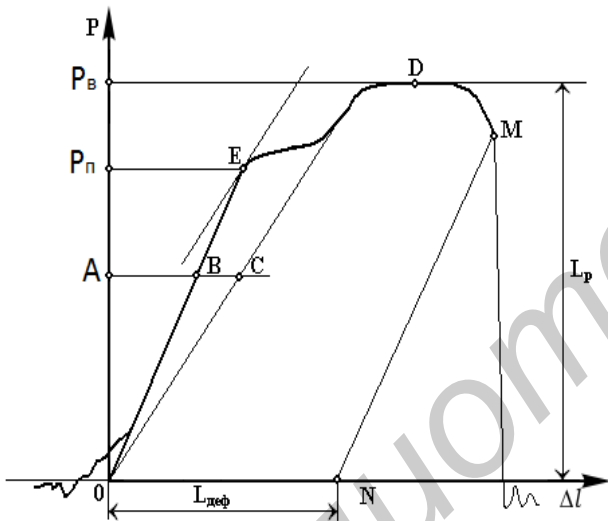


Рис. 1.5. Графическое определение предела пропорциональности и масштаба

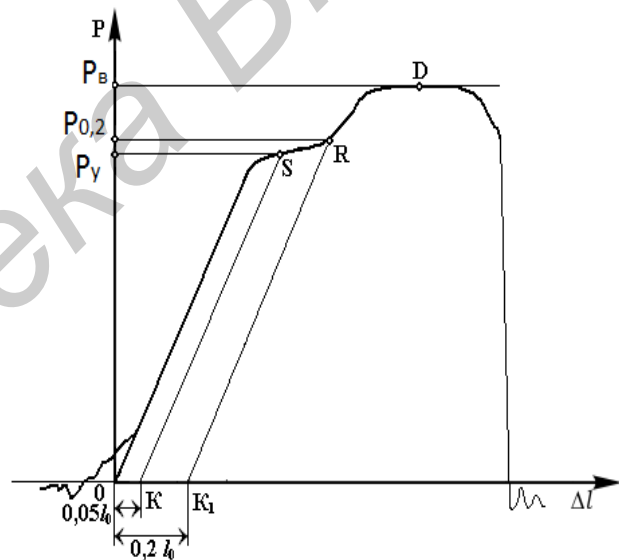


Рис. 1.6. Графическое определение условных пределов упругости и текучести

Повторяем построение отрезка  $OK_1$  для  $\sigma_{0,2}$ , а также определение нагрузки  $P_{0,2}$ .

Исходя из формулы  $\sigma = P/F_0$ , где  $P$  – соответствующая величина нагрузки,  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца ( $F_0 = t_0 \cdot b_0$ , где  $t_0$  – толщина в миллиметрах,  $b_0$  – ширина в миллиметрах средней части образца), тогда соответственно

$$\sigma_n = P_n/F_0, \sigma_y = P_{0,05}/F_0, \sigma_{0,2} = P_{0,2}/F_0, \sigma_e = P_e/F_0. \quad (1.7)$$

Необходимо помнить, что графическое определение прочностных характеристик возможно только при достаточно большом масштабе увеличения по оси деформаций.

### Динамические испытания на изгиб образцов с надрезом (согласно ГОСТ 9454 –78)

Динамические испытания на ударный изгиб выявляют склонность материала к хрупкому разрушению. Метод основан на разрушении образца с надрезом (концентратором) посередине одним ударом маятника массой  $P$ , падающего с определенной высоты  $H$  (рис. 1.7). При падении он разрушает образец и поднимается на высоту  $h$ . Работа  $K$  в джоулях, затраченная на разрушение образца, определяется по разнице показаний шкалы копра.

По величинам полной работы деформации и разрушения рассчитывается основная характеристика данного вида испытаний – ударная вязкость:

$$K_C = K/F, \quad (1.8)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания. Стандартная единица измерения ударной вязкости – кДж/м<sup>2</sup> или Дж/см<sup>2</sup>.

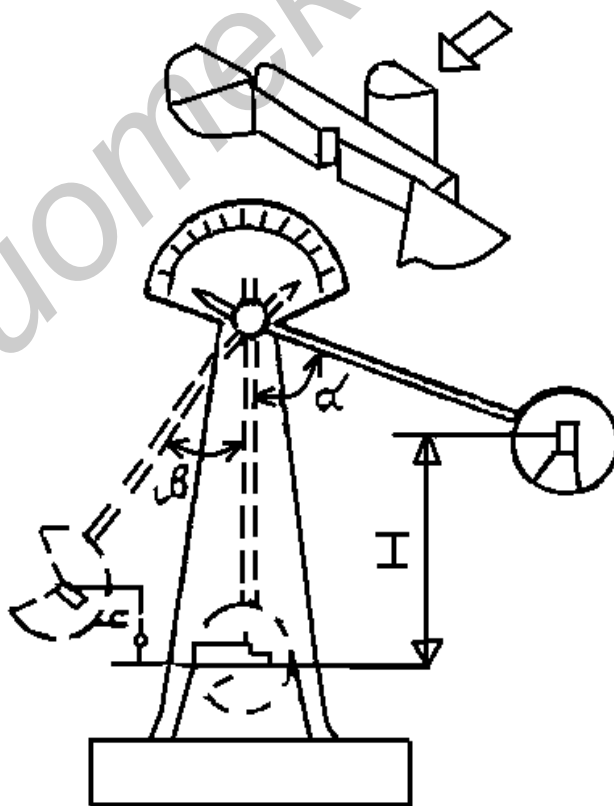


Рис. 1.7. Схема испытания на ударную вязкость на маятниковом копре

Ударная вязкость – сложная, комплексная характеристика, зависящая от совокупности прочностных и пластических свойств материала. Хрупкий и вязкий характер разрушения при ударном изгибе четко различаются по виду излома: блестящий «кристаллический» или матовый «волоконистый».

Испытания на ударную вязкость выполняются на маятниковых копрах типа МК-30, предназначенных для испытания металлов, и на копрах типа МК-0,5-1, предназначенных для испытания пластмасс и других неметаллических материалов.

Основным образцом по ГОСТ 9454–68 служит стержень с квадратным сечением 10×10 мм и длиной 55 мм.

### Лабораторное оборудование и инструменты

1. Машина разрывная любого типа.
2. Маятниковый копер МК-0,5-1.
3. Печь муфельная с измерителем температуры любого типа.
4. Шаблон для подготовки образцов по ГОСТ 9458–78.
5. Штангенциркуль с ценой деления 0,01 мм.
6. Керн для маркировки.
7. Молоток слесарный, клещи.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить описание лабораторной работы и инструкции по эксплуатации используемого оборудования.
2. По указанию преподавателя получить у лаборанта материалы для испытания на растяжение.
3. Подготовить образцы для испытания на растяжение по ГОСТ 1497–73.
4. Провести испытание образцов на растяжение по ГОСТ 1497–73.
5. Оформить протокол испытаний (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Протокол испытаний на растяжение

Размеры образца до испытаний, мм, мм <sup>2</sup>				Величины нагрузок, Н				Условные механические напряжения, МПа				Размеры после испытания, мм, мм <sup>2</sup>		Характеристики пластичности,	
$t_0$	$b_0$	$\bar{l}_0$	$F_0$	$P_n$	$P_y$	$P_{0,2}$	$P_e$	$\sigma_n$	$\sigma_y$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_b$	$l_k$	$F_k$	$\delta$	$\psi$

6. Получить у лаборанта материалы для испытаний на ударную вязкость.
7. Провести испытание образцов на ударную вязкость.
8. Оформить протокол испытаний (табл. 1.2).

Протокол испытания на ударную вязкость

Материал образца	Размеры и площадь сечения образца, мм, мм <sup>2</sup>	Показания шкалы копра, кг·с·см		Работа удара, кДж	Уд. вяз- кость, кДж/м <sup>2</sup>	Характер излома
		до излома	после излома			

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Индивидуальное задание (основные характеристики испытуемых материалов, чертежи образцов).
3. Теоретическая проработка вопроса.
4. Первичные и истинные диаграммы растяжения.
5. Протоколы испытаний материалов на растяжение и ударную вязкость.
6. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Основные виды динамических испытаний материалов.
2. Основные виды статических испытаний материалов.
3. Основные прочностные характеристики материалов.
4. Основные пластические характеристики материалов.
5. Основные динамические характеристики материалов.
6. Методика проведения испытаний на статическое растяжение при нормальных условиях.
7. Как определяется ударная вязкость при различных температурах?
8. Что такое «вязкий» и «хрупкий» излом материала?
9. Зависят ли параметры прочности и пластичности от дислокационной структуры?
10. Что такое порог хладоломкости и температурный запас вязкости?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев, А. П. Металловедение : учебник для вузов / А. П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Худокормова, Р. Н. Металловедение: лабораторный практикум : учеб. пособие для вузов / Р. Н. Худокормова, Ф. И. Пантелеенко ; под ред. Л. С. Ляховича. – Минск : Выш. шк. 1988. – 224 с.

3. Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.

4. Костин, П. П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов / П. П. Костин. – М. : Машиностроение, 1990. – 256 с.

5. Золоторевский, В. С. Механические свойства металлов : учебник для вузов / В. С. Золоторевский. – 2-изд. – М. : Metallurgy, 1983. – 352 с.

Библиотека БГУИР

## Лабораторная работа №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

**Цель работы:** изучение основных видов термообработки сплавов железа с углеродом и их назначения. Изучение механизмов структурных превращений при термообработке. Изучение технологии термообработки и определение твердости исследуемых образцов после различных видов термообработки.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

После отливки, прокатки,ковки стальные заготовки охлаждаются неравномерно, результатом чего является неоднородность состава и структуры заготовок. Из-за этого в объеме заготовки появляются внутренние напряжения. Для устранения этих дефектов и получения заданных свойств стальных заготовок назначают требуемый режим термообработки. Например, при механической обработке необходимо улучшить обрабатываемость за счет уменьшения твердости, а после – придать изделию износостойкость за счет увеличения твердости.

Для лучшего понимания процессов, происходящих при термообработке, рассмотрим диаграмму системы «железо – углерод», представленную на рис. 2.1.

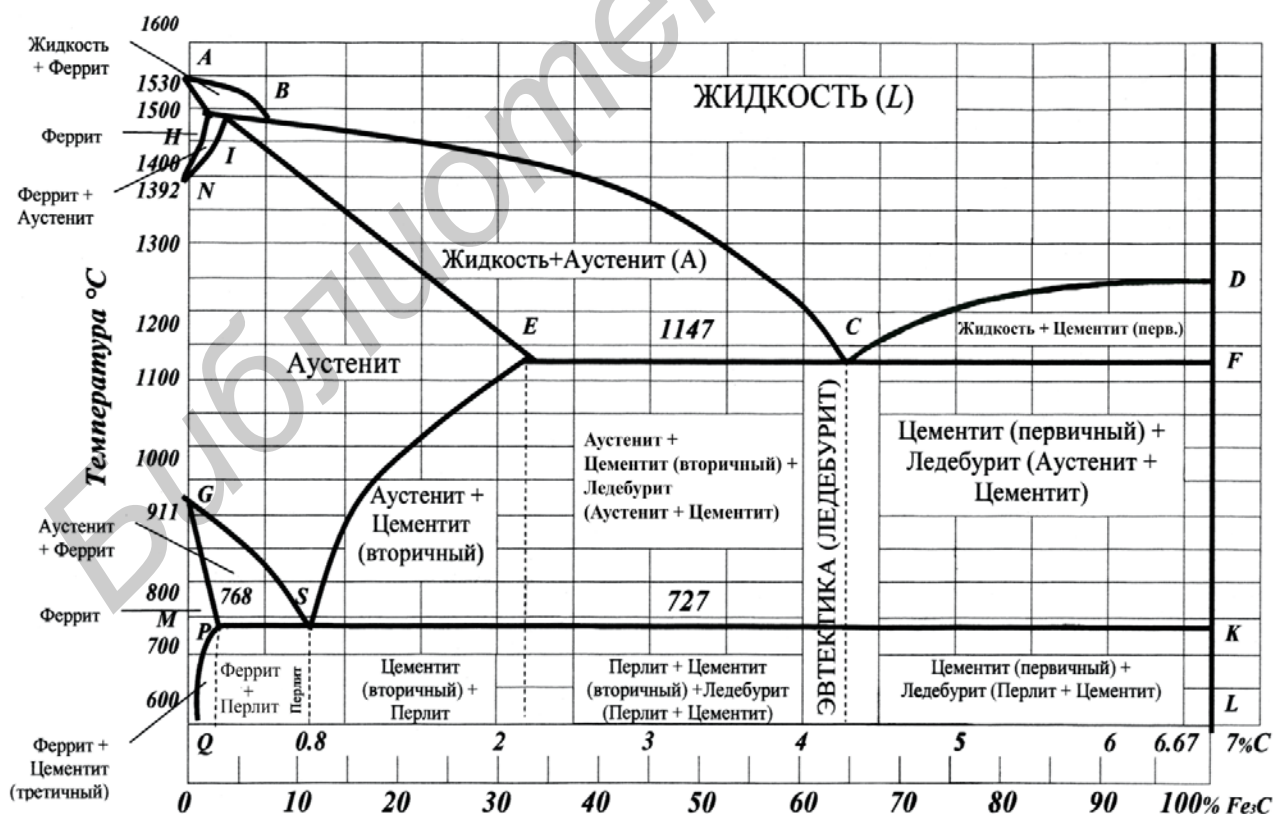


Рис. 2.1. Диаграмма системы «железо – углерод»

Основными компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо и углерод, которые относятся к полиморфным элементам. В железоуглеродистых сплавах эти элементы взаимодействуют, образуя различные фазы (фаза – однородная часть сплава, отделенная от других поверхностью раздела, при переходе через которую свойства сплава резко изменяются). Взаимодействие железа и углерода состоит в том, что углерод может растворяться как в жидком (расплавленном) железе, так и в различных его модификациях в твердом состоянии. Помимо этого, он может образовывать с железом химическое соединение. Таким образом, в железоуглеродистых сплавах могут образовываться следующие фазы: жидкий раствор, аустенит, феррит, цементит.

**Аустенит** (обозначают  $A$  или  $\gamma$ ) – твердый раствор внедрения углерода в  $Fe\gamma$ . Имеет ГЦК решетку, растворяет до 2,14 % углерода, немагнитен, твердость составляет НВ 160–200.

**Феррит** (обозначают  $\Phi$  или  $\alpha$ ) – твердый раствор внедрения углерода в  $Fe\alpha$ . Имеет ОЦК решетку, растворяет до 0,02 % углерода (727 °С), при 20 °С – менее 0,006 %, ферромагнитен до температуры 769 °С, твердость – НВ 80–100.

**Цементит** ( $C$ ) – химическое соединение железа с углеродом ( $Fe_3C$ ). Содержит 6,67 % С. При нормальных условиях цементит имеет твердость НВ 800 и довольно хрупок. Слабо ферромагнитен до 210 °С.

Превращения в железоуглеродистых сплавах происходит как при кристаллизации (затвердевании) жидкой фазы (Ж), так и в твердом состоянии. Первичная кристаллизация идет в интервале температур, ограниченных линиями ликвидус ( $ACD$ ) и солидус ( $AECF$ ). Вторичная кристаллизация происходит за счет превращения железа одной аллотропической модификации ( $\gamma$ ) в другую ( $\alpha$ ) и за счет изменения растворимости углерода в аустените. Избыток углерода выделяется из твердых растворов в виде цементита ( $Fe_3C$ ).

Эвтектическая смесь аустенита и цементита содержит 4,3 % углерода и называется **ледебуритом** ( $L$ ), а эвтектоидная смесь феррита и цементита – **перлитом** ( $P$ ) – однородная мелкодисперсная смесь феррита и цементита, который может быть пластинчатым или зернистым и содержит 0,8 % углерода.

Линии диаграммы представляют собой совокупность критических точек сплавов с различным составом, характеризующих превращения в этих сплавах при соответствующих температурах.

Основные линии диаграммы:

–  $ACD$  – линия ликвидус. Выше этой линии все сплавы находятся в жидком состоянии;

–  $AECF$  – линия солидус. Ниже этой линии все сплавы находятся в твердом состоянии;

–  $ECF$  – линия эвтектического превращения;

–  $PSK$  – линия эвтектоидного превращения.

Линии диаграммы делят все поле диаграммы на области равновесного существования фаз. Каждой области диаграммы соответствует определенное



структурное состояние, сформированное в результате происходящих в сплавах превращений.

**Термической обработкой** называют технологические процессы теплового воздействия, состоящие из нагрева, выдержки и охлаждения металлических изделий по определенным режимам и производимые с целью изменения структуры, а также прочностных, пластических и других свойств материала. Под структурой понимают форму, размеры, количество и характер взаимного расположения соответствующих фаз, образующих зерна. Зерна могут различаться между собой по величине и форме в зависимости от способа получения металла и термической обработки заготовки.

В основе теории термической обработки – фазовые и структурные превращения, протекающие при нагреве и охлаждении металлов и сплавов. Эти превращения характеризуются определенными критическими точками ( $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_{ст}$ ).

В зависимости от температуры нагрева и скорости охлаждения различают следующие виды термической обработки: отжиг, нормализация, закалка, отпуск.

**Отжиг** позволяет придать необходимые механические свойства после литья,ковки, прокатки и улучшить обрабатываемость резанием (уменьшает твердость, увеличивает пластичность, увеличивает величину зерна).

**Закалка** позволяет получить высокую твердость (мелкое зерно).

**Отпуск**, уменьшая внутренние напряжения после закалки, позволяет получить требуемые эксплуатационные свойства изделия.

На рис. 2.2 показан фрагмент диаграммы Fe–C, где находятся углеродистые стали.

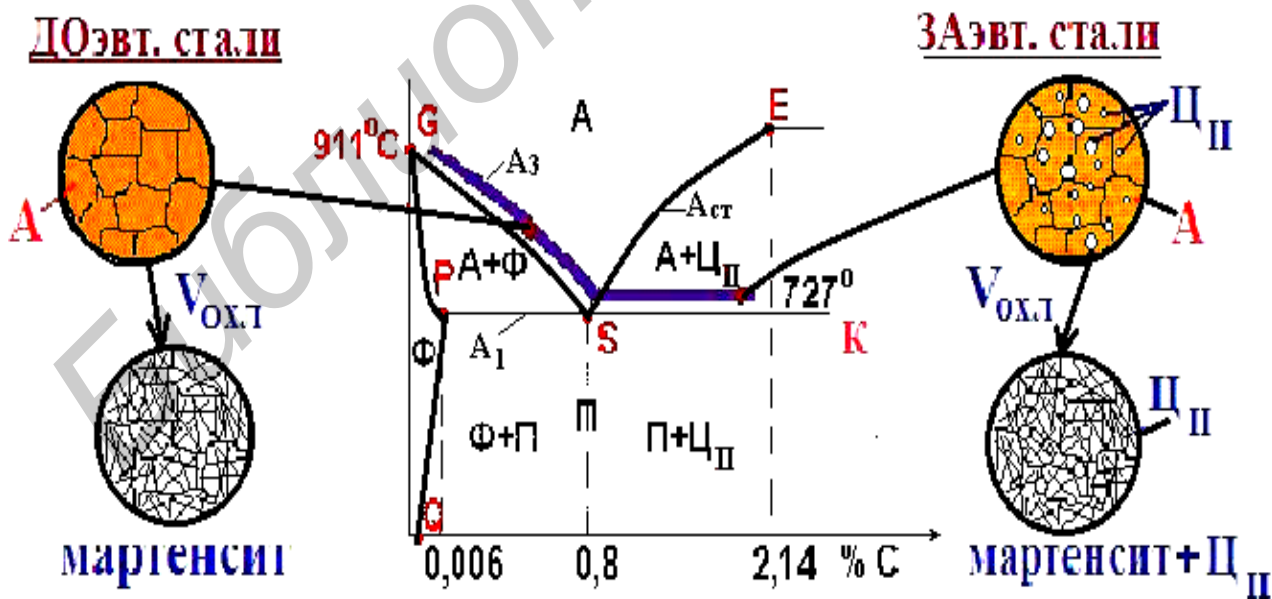


Рис. 2.2. Фрагмент диаграммы «железо – углерод» с указанием фаз и критических температур  $A_1$ ,  $A_3$  и  $A_{ст}$

На диаграмме линия  $A_1$  (линия  $PSK$ ,  $727\text{ }^\circ\text{C}$ ) показывает начало образования аустенита при нагреве, линия  $A_3$  (линия  $GS$ ) – конец образования аустенита, линия  $A_{ст}$  (линия  $SE$ ) – конец растворения цементита в аустените.

После нагрева до заданной температуры в зависимости от скорости охлаждения структуры стали при различном содержания углерода будут отличаться. При нагреве эвтектоидной стали выше  $A_1$  перлит превращается в аустенит. При этом кристаллическая решетка феррита (ОЦК) перестраивается в решетку аустенита (ГЦК), а цементит растворяется в аустените.

При понижении температуры ниже  $A_1$  происходит распад аустенита на феррит и цементит. Процесс распада аустенита на феррит и цементит носит диффузионный характер, поскольку сопровождается перемещением атомов углерода на сравнительно большие расстояния. При этом происходят следующие превращения:

- перегруппировка атомов из решетки аустенита  $\gamma$  (ГЦК) в решетку феррита  $\alpha$  (ОЦК);

- выделение мельчайших частичек цементита и дальнейший их рост в пластинчатой форме в феррите.

Таким образом, при медленном охлаждении эвтектоидной стали формируется структура пластинчатого перлита. Увеличение скорости охлаждения приводит к понижению критических точек по сравнению с равновесной диаграммой – распад аустенита будет происходить не при температуре  $727\text{ }^\circ\text{C}$ , а несколько ниже. При этом скорость диффузии уменьшается, частички цементита не успевают вырасти, твердость повышается. Структуры с более мелкими частичками цементита (по сравнению с цементитом перлита) называются **сорбитом** и **троститом**.

Таким образом, при сравнительно медленных скоростях охлаждения формируются структуры перлита, сорбита и троостита, состоящие из феррита и цементита, которые различаются только размером частичек цементита и твердостью.

В доэвтектоидных и заэвтектоидных сталях распад аустенита протекает аналогично, с той лишь разницей, что до начала образования перлита выделяется избыточный феррит или цементит соответственно.

Если скорость охлаждения аустенита настолько велика, что даже мельчайшие частицы цементита не успевают выделяться, получается принципиально новый тип структуры – **мартенсит**. В этом случае происходит только перестройка решетки ГЦК в решетку ОЦК. Весь углерод остается в решетке  $\alpha\text{Fe}$  и искажает ее. Решетка становится не кубической, а тетрагональной, что соответствует структуре мартенсита (мартенсит – пересыщенный, переохлажденный твердый раствор углерода в  $\alpha\text{Fe}$ ). Степень искаженности решетки мартенсита зависит от содержания в ней углерода. Чем больше углерода, тем больше искажения решетки и выше твердость.

Образование мартенсита сопровождается некоторым увеличением объема, что приводит к возникновению значительных внутренних напряжений, которые могут привести к деформациям и трещинам.

Рассмотрим основные виды термообработки более подробно.

**Отжиг** – вид термической обработки, заключающийся в нагреве стали до определенной температуры, выдержке и медленном охлаждении. Применяется для устранения различного рода структурных неоднородностей, возникающих при ковке, прокатке, отливке и внутренних механических напряжениях. Различают несколько видов отжига, различающихся по технологии выполнения и цели: полный отжиг, нормализация, неполный отжиг, изотермический отжиг, отжиг на зернистый перлит.

**Полный отжиг** проводится для доэвтектоидных и эвтектоидных сталей. Температура нагрева на 30–50 °С выше  $A_3$ , т. е. структуру полностью переводят в аустенитное состояние. После выдержки сталь медленно охлаждают в печи. Скорость охлаждения углеродистых сталей 100–150 °С/ч, легированных – 30–40 °С/ч. Структура стали после полного отжига получается феррито-перлитная, т. е. такая, как по диаграмме Fe–C.

**Нормализация** заключается в нагреве стали на 30–50 °С выше критических температур  $A_3$  и  $A_{cm}$  с последующим охлаждением на воздухе. Цель нормализации доэвтектоидных конструкционных сталей – несколько повысить прочность (по сравнению с прочностью после отжига) за счет измельчения структурных составляющих (феррита и перлита). Цель нормализации заэвтектоидных инструментальных сталей – устранить цементитную сетку по границам перлитных зерен и тем самым предотвратить повышенную хрупкость стали при последующей закалке. Структура таких сталей после охлаждения на воздухе из аустенитной области (выше  $A_{C3}$ ) соответствует сорбиту.

**Закалка** – это вид термической обработки, состоящий в нагреве стали до определенных температур (доэвтектоидных на 30–40 °С выше  $A_3$ , заэвтектоидных на 30–40 °С выше  $A_1$ ), выдержке и быстром охлаждении со скоростью более верхней критической. Цель закалки – повысить твердость, прочность, износостойчивость. Скорость охлаждения при закалке обычно задают охлаждающей средой. Один из способов закалки – закалка в одном охладителе (вода или масло). Это наиболее простой и распространенный способ. Однако некоторые стали при охлаждении в воде склонны к возникновению трещин. При охлаждении в масле скорость охлаждения меньше, и многие стали при таком охлаждении не закаляются.

**Отпуск** – это вид термической обработки, состоящий в нагреве закаленной стали до температур ниже  $A_1$ , выдержке и охлаждении в воде или на воздухе. Отпуску подвергают все закаленные стали с целью уменьшения внутренних напряжений, повышения ударной вязкости при некотором снижении твердости и прочности. В зависимости от требований, предъявляемых к изделиям, их подвергают отпуску при различных температурах.

**Низкий отпуск** (150–220 °С) проводят с целью снизить остаточные напряжения без существенного снижения твердости.

**Средний отпуск** (300–500 °С) проводят с целью более полно снять напряжения и повысить ударную вязкость за счет более значительного снижения твердости.

**Высокий отпуск** (500–680 °С) проводят обычно для деталей из легированных сталей с целью получить хорошее сочетание прочности и ударной вязкости.

Механические свойства металлов оценивают при помощи основных характеристик: временного сопротивления (предел прочности), предела текучести, истинного сопротивления разрыву, относительного удлинения или сужения, ударной вязкости, предела выносливости, твердости. **Твердость** – способность материала оказывать сопротивление механическому проникновению в его поверхностный слой другого твердого тела – индентора, выполненного в виде стального шарика, алмазного конуса или иглы.

Существуют следующие основные методы измерения твердости вдавливанием:

- вдавливание стального шарика с определением твердости по величине поверхности оставляемого отпечатка (**метод Бринелля**);

- вдавливание алмазного конуса (или стального шарика) с определением твердости по глубине получаемого отпечатка (**метод Роквелла**);

- вдавливание алмазной пирамиды с определением твердости по величине поверхности получаемого отпечатка (**метод Виккерса**).

В работе применяется измерение твердости по Роквеллу. Определение твердости вдавливанием алмазного конуса с углом при вершине 120° или маленького стального шарика диаметром 1,588 мм производится на специальных приборах. Алмазный конус применяется для определения твердости закаленной стали, особо твердых металлов, тонких металлических пластин; стальной шарик – для незакаленной стали, бронзы и других материалов, не обладающих большой твердостью. При измерении твердости на приборе Роквелла необходимо, чтобы на поверхности образца не было окалины, трещин, выбоин и др. Необходимо контролировать перпендикулярность приложения нагрузки к поверхности образца и устойчивость его положения на столике прибора. Расстояние отпечатка должно быть не менее 1,5 мм при вдавливании конуса и не менее 4 мм при вдавливании шарика. Алмазный конус применяется для определения твердости закаленной стали, особо твердых металлов, тонких металлических пластин; стальной шарик – для незакаленной стали, бронзы и других материалов, не обладающих большой твердостью. Прибор для измерения твердости приведен на рис. 2.3, а. Конус или шарик вдавливаются в исследуемый материал двумя последовательными нагрузками: предварительной  $P = 10$  кг и окончательной, или основной, значительно превышающей предварительную. При вдавливании стального шарика основная нагрузка равняется 100 кг (шкала *B*) и при вдавливании алмазного конуса – 150 кг (шкала *C*) или 60 кг (шкала *A*)

(рис. 2.3, б). Разность между глубиной, на которую проникает в испытуемый материал конус или шарик под действием основной и предварительной нагрузок, характеризует его твердость. Результаты вдавливания отсчитываются по одной из двух шкал индикатора после удаления основной нагрузки.

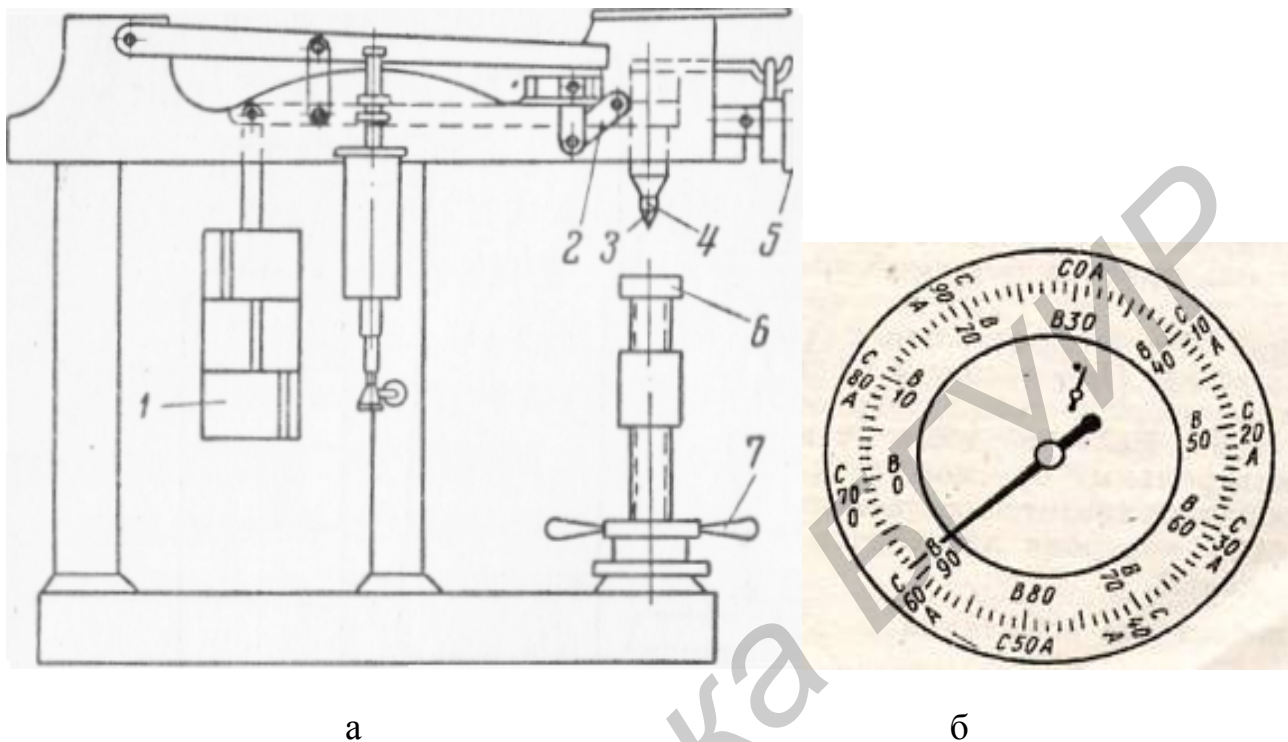


Рис. 2.3. Измеритель твердости (а) и внешний вид шкалы измерителя (б)

При испытании образец или деталь укладывается на столик 6 и вращением маховика 7 по часовой стрелке подводится вплотную к наконечнику 4, в котором в зависимости от степени твердости исследуемого материала закреплен алмазный конус или стальной шарик 3. Вращение маховика продолжают до тех пор, пока давление наконечника на образец не станет равным 10 кг, что показывает стрелка индикатора 5 (малая стрелка совмещается с красной точкой, а большая корректором устанавливается на нуль шкалы рис. 2.3, б). Затем с помощью клавиши, расположенной ниже маховика 7, включают основную нагрузку. Величина нагрузки регулируется количеством гирь 1. Острие наконечника постепенно вдавливается в материал образца, что сопровождается вращением стрелки индикатора 5. Когда стрелка останавливается, то стрелка на шкале индикатора показывает величину твердости металла.

Прибор для испытания твердости материала по методу Роквелла позволяет определять качество термической обработки стали, поэтому он имеет широкое применение в термических цехах для проверки твердости инструментов после термической обработки.

## Порядок выполнения работы

1. До проведения термообработки определить твердость заданных образцов стали (образец №1 – Ст20, образец №2 – Ст60). Измерения твердости осуществлять в средней части образца.

2. Закрепить образец №1.

3. Включить пакетный выключатель сети макета.

4. Плавно поворачивая ручку регулятора напряжения, выставить температуру в соответствии с процентным содержанием углерода. Контроль температуры вести с помощью термопары. Выждав при установившейся температуре 10–20 с, выключить сеть, одновременно поливая образец водой (закалка).

5. Снять образец и замерить твердость в середине образца (закаленная часть) и на конце образца. Записать данные.

6. Закрепить образец после закалки в макете.

7. Плавно поворачивая ручку регулятора напряжения, выставить температуру в соответствии с процентным содержанием углерода. Контроль температуры вести с помощью термопары.

8. Выждать 10–20 с и плавно регулятором сбросить температуру.

9. Дождавшись охлаждения образца, снять его и замерить твердость. Записать результат.

10. Повторить пп. 1–10 с образцом №2.

11. По изменению твердости сделать соответствующие выводы о влиянии температуры нагрева и скорости охлаждения на изменение структуры и механических свойств углеродистой стали.

## Содержание отчета

1. Перечертить участок диаграммы Fe–Fe<sub>3</sub>C, соответствующий области термообработки образцов.

2. В соответствии с полученными результатами заполнить табл. 2.1, указав условия опыта и полученные данные.

3. Зарисовать схемы структур, получаемых до и после каждого вида термообработки (см. прил.).

4. Сделать общие выводы о закономерностях термической обработки.

## Результаты испытаний и измерений

Марка стали	Вид термической обработки	Температура нагрева, °С (выбрать согласно диаграмме)	Охладитель (вода, воздух).	Твердость, НВ	Структура (№ схемы)
СТ20					
СТ60					
СТ20					
СТ60					

**Контрольные вопросы и задания**

1. Что такое термообработка и с какой целью она производится?
2. Перечислить основные операции термической обработки.
3. Что такое аустенит и при каких температурах эта структура устойчива в углеродистых сталях?
4. Что такое мартенсит и каковы его свойства?
5. Чем определяется скорость закалки?
6. Какие структуры получаются при охлаждении стали, нагретой до аустенитного состояния со скоростью ниже критической?
7. Что такое тростит и сорбит, в чем их отличие?
8. При каких условиях из мартенсита получаются сорбит и тростит?
9. Дать определение и указать назначение процессов закалки, отпуска, отжига, нормализации.
10. Перечислить разновидности отпуска и их назначение.
11. Два образца стали закалены на мартенсит, одному сделан отпуск на 500 °С, другому – на 300 °С. Сравнить их механические свойства после отпуска.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Арзамасов, Б. Н. Материаловедение / Б. Н. Арзамасов. – М. : Машиностроение, 1986. – 383 с.
2. Гуляев, Н. П. Металловедение / Н. П. Гуляев. – М. : Metallurgy, 1986. – 541 с.
3. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин. – М. : Metallurgy, 1983. – 369 с.
4. Башнин, Ю. А. Технология термической обработки / Ю. А. Башнин, Б. К. Ушаков, А. Г. Секей. – М. : Metallurgy, 1986. – 424 с.
5. Блантер, М. Е. Теория термической обработки / М. Е. Блантер. – М. : Metallurgy, 1984. – 328 с.

## Лабораторная работа №3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

**Цель работы:** изучение процесса формирования конфигурации (рисунка) интегральных схем методом контактной фотолитографии, ознакомление с методами контроля качества рисунка и исследование основных видов дефектов.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

**Литографией** в технологии микроэлектроники называют процесс получения микрорисунка слоев интегральных схем (ИС) требуемой конфигурации. Процесс литографии занимает особое место в технологии микроэлектроники, особенно в планарной технологии изготовления ИС. Дальнейшее развитие технологии сверхбольших интегральных схем (СБИС) требует перехода к созданию элементов микронных и субмикронных размеров, что невозможно без совершенствования существующих и разработки новых методов литографии.

По роду воздействующих энергетических частиц на актиночувствительный слой и в зависимости от длины волны излучения  $\lambda$  следует различать оптические и неоптические методы литографии. К первой группе относятся контактная и проекционная фотолитографии ( $\lambda = 250\text{--}440$  нм), ко второй – электронная ( $\lambda = 0,05$  нм), ионная ( $\lambda = 0,05\text{--}1,0$  нм) и рентгенолитография ( $\lambda = 0,5\text{--}2$  нм). Актиночувствительным называется слой, который изменяет свои свойства (растворимость, химическую стойкость) под воздействием излучения. В качестве таких слоев применяют фоторезисты, рентгенорезисты, электронрезисты и ионрезисты.

При контактной фотолитографии фотошаблон непосредственно контактирует с пластиной, т. е. масштаб переноса изображения равен 1:1. Наличие контакта рабочего фотошаблона с полупроводниковой пластиной постепенно выводит его из строя. Предельные возможности контактной фотолитографии по разрешающей способности составляют 1,25–0,8 мкм. Однако дифракция света в слое фоторезиста (ФР) и в зазоре между пластиной и фотошаблоном снижает разрежающую способность, что является основным ограничивающим фактором фотолитографии при создании СБИС.

В проекционной литографии изображение фотошаблона проецируется на пластину через специальный объектив с высокой разрешающей способностью. Основное преимущество проекционной фотолитографии заключается прежде всего в отсутствии механического контакта фотошаблона с пленкой ФР.



Проекционная фотолитография упрощает процесс совмещения, повышает его точность и снижает затрачиваемое время.

Проекционная фотолитография позволяет получать минимальную ширину линий 0,6–0,8 мкм и более высокий процент выхода годных. Существуют некоторые трудности в создании оптических систем, обеспечивающих равномерное освещение и однородное разрешение на большой площади. Кроме того, высокая стоимость установок и необходимость высококвалифицированного обслуживания накладывает ограничения на широкое использование данного метода в промышленности. В настоящее время проекционная фотолитография применяется в основном при изготовлении сложных приборов, особенно с большой площадью (БИС, ЗУ, СБИС, микропроцессоров).

Существует три основных способа проекционной литографии:

- одновременная передача всех элементов, входящих в фотошаблон, на поверхность полупроводниковой пластины, покрытой слоем ФР;
- поэлементный «шаговый» перенос изображения на пластину, покрытую ФР;
- вычерчивание изображения на пластине тонким лучом лазера, управляемым от ЭВМ.

Перенос изображения этими методами может осуществляться без изменения масштаба и с уменьшением (1:4; 1:5; 1:10; 1:20).

При рентгенолитографии изображение на пластину переносится с шаблона, называемого рентгеношаблоном, с помощью мягкого рентгеновского излучения. Разрешающая способность рентгенолитографии составляет 0,2–0,3 мкм. Одним из достоинств метода является возможность получения структур субмикронных размеров с низким уровнем дефектности. Это объясняется тем, что загрязняющие частицы (пыль) существенно не ослабляют рентгеновское излучение, вследствие чего дефекты не переносятся на слой резиста.

Электронолитография основана на непосредственном создании или проекционном переносе изображения пучком электронов. Этот метод наиболее перспективен для формирования субмикронных элементов. В электронолитографии применяют два способа непосредственного формирования элементов изображения – последовательной экспозицией тонким сфокусированным электронным пучком круглого сечения (сканирующий способ) и экспонированием широким прямоугольным пучком (проекционный способ). Недостатком электронной литографии является рассеяние электронов в слое резиста, который является диэлектриком, сложность оборудования, наличие вакуума, воздействие внешних электромагнитных полей.

При ионолитографии сохраняются принципы формирования изображения, но вместо пучка электронов используется ионный пучок. Поскольку ионы обладают большей массой, чем электроны, то и рассеяние их в слое резиста незначительно. Поэтому ионная литография обеспечивает

большую разрешающую способность. Кроме того, ионы обладают и большей энергией, т. е. перенос изображения можно проводить при меньших дозах облучения, чем при электронной литографии.

### Контактная фотолитография

Фотолитография – сложный технологический процесс, основанный на использовании необратимых фотохимических явлений, происходящих в нанесенном на подложки слое ФР при его обработке ультрафиолетовым излучением через маску (фотошаблон). При контактной фотолитографии фотошаблон на установке совмещения и экспонирования с помощью специального приспособления плотно прижимают к пленке ФР, после чего экспонируют пучком параллельных ультрафиолетовых лучей.

Технологический процесс фотолитографии можно разделить на три основные стадии:

- формирование фоторезистивного слоя (обработка подложек для их очистки и повышения адгезионной способности, нанесение ФР и его сушка);
- формирование защитного рельефа в слое ФР (совмещение, экспонирование, проявление, вторая сушка слоя ФР – задубливание);
- создание рельефного изображения на подложке (травление технологического слоя – пленки диэлектрика, металла или полупроводника), удаление слоя ФР, контроль качества фотолитографии.

Блок-схема процесса контактной фотолитографии показана на рис. 3.1.

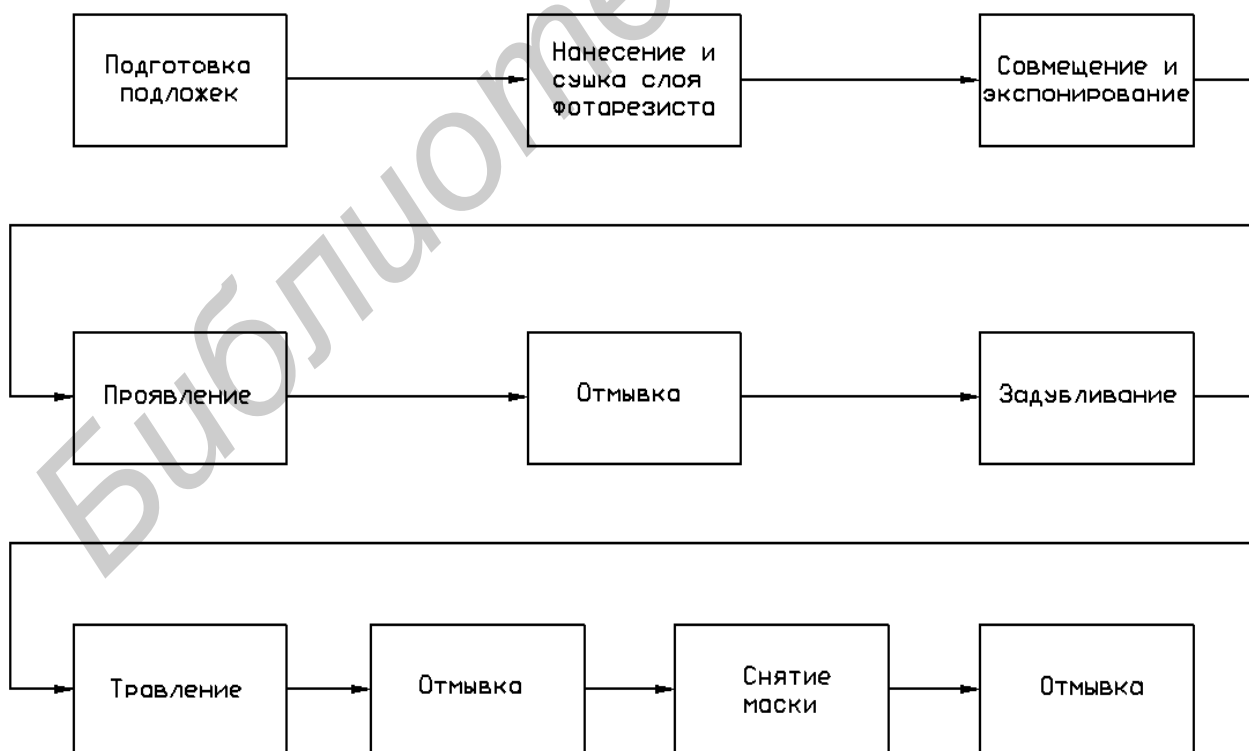
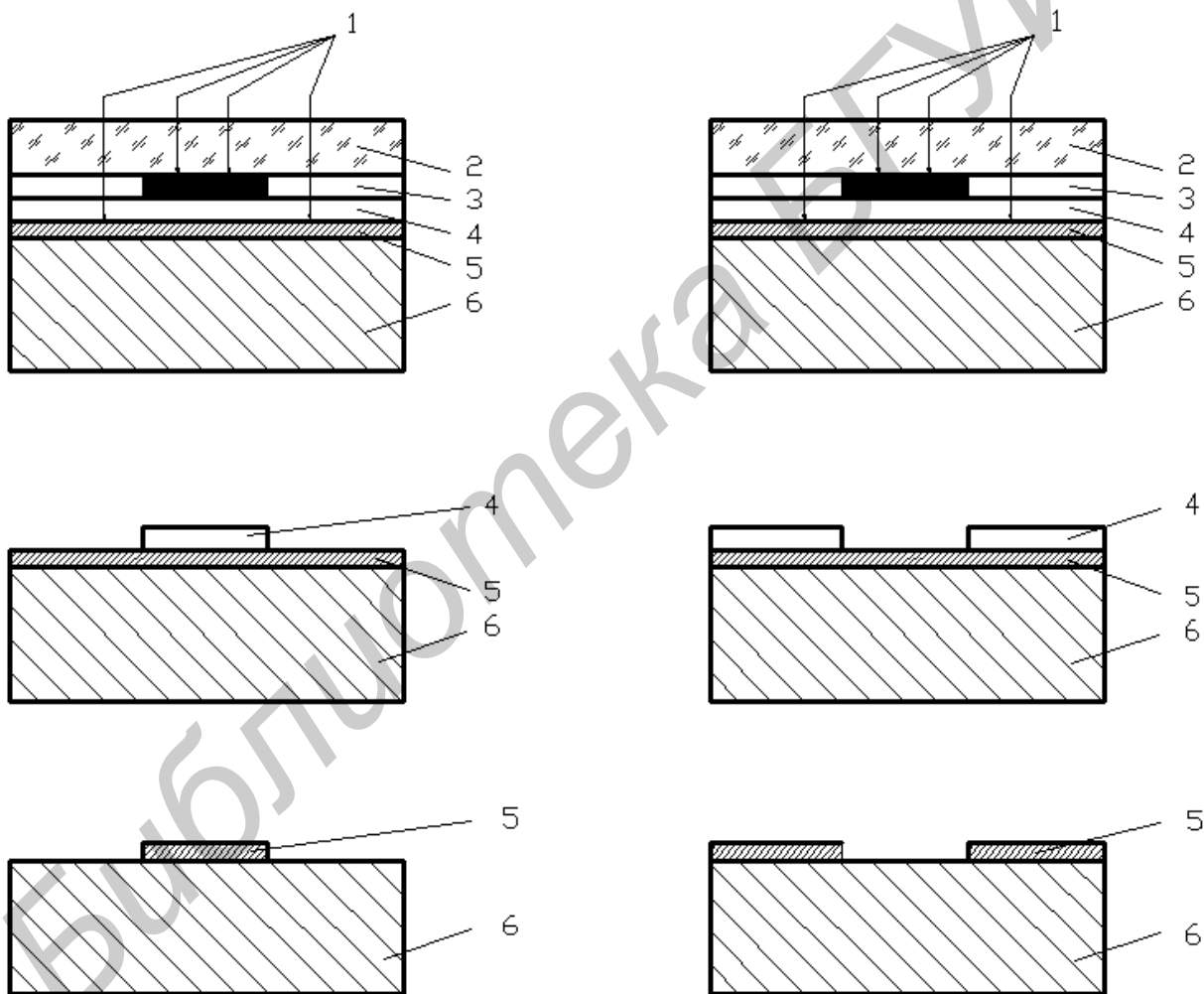


Рис. 3.1. Блок-схема процесса контактной фотолитографии

**Фоторезисты** – светочувствительные органические материалы с изменяющейся под воздействием света растворимостью. ФР, растворимость экспонированного участка которых уменьшается, называются негативными, а ФР, растворимость которых после облучения возрастает, – позитивными. В основе создания рельефа в пленке негативного ФР заложено использование фотохимической реакции фотоприсоединения – *фотополимеризации*, а в пленке позитивного ФР – реакции фоторазложения – *фотолиза*. При фотополимеризации происходит поперечная сшивка молекул полимера и его химическая стойкость увеличивается. При фотолизе происходит разрыв слабых связей между молекулами, что приводит к снижению химической стойкости.

После обработки экспонированного ФР в проявителе, удаляющем растворимые участки, образуется рельефное изображение (рис. 3.2).



а

б

Рис. 3.2. Формирование рельефа изображения элементов при использовании позитивного (а) и негативного (б) ФР:  
1 – ультрафиолетовое излучение; 2, 3 – фотошаблон; 4 – слой ФР;  
5 – технологический слой; 6 – подложка

Основными параметрами ФР являются светочувствительность, разрешающая способность, кислотоустойчивость, стабильность и вязкость (концентрация).

Светочувствительность – величина, обратная экспозиции, т. е. времени облучения, требуемой для перевода ФР в растворимое или нерастворимое состояние (экспозиция определяется экспериментально и зависит от толщины пленки ФР).

Разрешающая способность – максимальное число линий одинаковой ширины, которое можно получить в ФР на 1 мм. Разрешающая способность  $R$  и ширина линий  $L$  связаны между собой соотношением  $R = 1000/2L$ .

Стойкость к воздействию агрессивных сред (кислотоустойчивость) – величина, пропорциональная времени отслаивания пленки в используемом травителе, оно должно быть, по крайней мере, на порядок выше времени проявления.

Стабильность эксплуатационных свойств определяется временем службы ФР при определенных условиях хранения и использования.

**Фотошаблон (ФШ)** – плоскопараллельная пластина из прозрачного материала, на которой имеется рисунок, состоящий из сочетания непрозрачных и прозрачных участков на основе пленочного покрытия, образующих топологию одного из слоев структуры интегральной схемы. В зависимости от материала пленочного покрытия различают ФШ на основе фотографической эмульсии (эмульсионные ФШ), металлической пленки (металлизированные ФШ) и других материалов, например оксида железа (оксидные ФШ). Эмульсионные ФШ принципиально не могут обеспечить разрешающую способность, поскольку эмульсия имеет минимальную толщину слоя 4...6 мкм, кроме того, крайне низка их эксплуатационная стойкость (1...10 совмещений). Металлизированные ФШ (хромированные) обеспечивают значительно бóльшие разрешающую способность и стойкость (до 100 совмещений), однако коэффициент отражения пленки хрома высок, и это не позволяет стабильно получать элементы размерами менее 1,5 мкм. Оксидные ФШ (оксиды  $Cr_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ) более удобны с точки зрения простоты совмещения, поскольку непрозрачные для УФ излучения оксиды являются прозрачными для видимого света, кроме того, их износостойкость выше, чем у металлизированных ФШ. Металлизированные и оксидные ФШ получают вакуумными и химическими методами, а также осаждением из парогазовой фазы с последующим травлением.

**Технологический процесс контактной фотолитографии** включает следующие операции:

- подготовку поверхности перед нанесением ФР;
- нанесение слоя ФР;
- сушку пленки ФР;
- совмещение ФШ с подложкой и экспонирование (засветку) ФР;
- проявление/удаление определенных участков пленки ФР (получение микрорисунка);

- контроль качества проявления и геометрических размеров изображения;
- задубливание ФР, повышающее устойчивость ФР к травителю;
- травление слоя оксида или металла через полученную фоторезистивную маску в специальном травителе;
- контроль качества травления;
- удаление пленки ФР с поверхности;
- контроль качества проведенной фотолитографии.

Рассмотрим основные операции технологического процесса контактной фотолитографии.

**Обработка поверхности подложек** необходима для удаления органических и неорганических загрязнений. Необходимо, чтобы поверхность была гидрофильна к ФР и гидрофобна к травителю. Для удаления загрязнений используется обработка подложек в горячих органических растворителях, обработка в растворах кислот и щелочей с последующей гидромеханической отмывкой в деионизованной воде.

Для **нанесения слоя ФР** на пластину применяют методы центрифугирования, пульверизации, электростатического нанесения, окунания, полива. Самое широкое применение в полупроводниковой технологии нашел метод центрифугирования, поскольку он при несложном оборудовании позволяет получать пленки ФР с разбросом по толщине  $\pm 10\%$ . Толщина ФР зависит от скорости вращения центрифуги и вязкости ФР. Метод центрифугирования позволяет формировать слой ФР на подложке диаметром до 300 мм. Формирование слоя происходит за 20...30 с. При нанесении ФР на неподвижную подложку время между нанесением жидкого резиста и включением центрифуги должно быть минимальным (0,5...1 с), чтобы вязкость ФР не менялась в результате испарения растворителей.

Нанесение ФР пульверизацией (распылением) позволяет получать широкий интервал толщин слоев и может использоваться для неплоских поверхностей. При этом расход ФР можно уменьшить примерно в 10 раз, дефектность слоя в 3...4 раза меньше по сравнению с центрифугированием, а отсутствие краевого утолщения делает этот метод особенно эффективным при нанесении ФР на прямоугольные подложки.

При электростатическом нанесении ФР диспергируется с помощью форсунки либо само электрическое поле дробит жидкость на мелкие капли диаметром около 10 мкм. Заряженные капли ускоряются электрическим полем напряжением 15–20 кВ и осаждаются на подложку.

Нанесение ФР окунанием – наиболее простой способ нанесения покрытия, когда обрабатываемую подложку погружают в ФР и выводят из него с регулируемой скоростью. Полив ФР на горизонтально расположенные подложки обеспечивает лучшую по сравнению с окунанием равномерность по толщине, однако имеются утолщения по краям.

**Сушка слоя ФР** необходима для окончательного удаления растворителя. Для этого подложку со слоем ФР нагревают до 90–100 °С. При этом также происходит уплотнение молекулярной структуры слоя, уменьшаются внутренние напряжения, повышается адгезия к подложке. При конвективной сушке подложки выдерживаются в термокамере в течение 15–20 мин. При инфракрасной сушке источником тепла является сама подложка, поглощающая ИК-излучение от галогенной лампы или от накаливаемой спирали. Время сушки составляет 5–10 мин. При СВЧ-сушке подложки нагреваются, поглощая энергию СВЧ-поля. Время сушки – несколько секунд.

**Совмещение и экспонирование** – одни из наиболее ответственных операций, обеспечивающих качество фотолитографии. Передача изображения с ФШ на подложку должна выполняться с точностью до десятых долей минимального размера элемента, что обычно составляет 0,1–0,5 мкм. Поэтому процессы совмещения и экспонирования проводят на одном рабочем месте одновременно на одной установке, не допуская даже малой вибрации ФШ и подложки. Современные установки совмещения и экспонирования представляют собой сложные оптико-механические комплексы. При первой фотолитографии ФШ ориентируют относительно базового среза подложки. При последующих фотолитографиях, когда на подложке уже сформированы топологические слои, рисунок фотошаблона ориентируют относительно рисунка предыдущего слоя с помощью меток совмещения, которые представляют собой концентрические окружности, вложенные квадраты, крестики и т. п. Время экспонирования зависит от толщины слоя ФР, его светочувствительности и энергии падающего излучения.

**Проявление** слоя ФР заключается в удалении в зависимости от использованного типа ФР экспонированных или неэкспонированных участков, в результате чего на поверхности подложки остается защитный рельеф – фоторезистивная маска требуемой конфигурации. Проявителями для негативных ФР служат органические растворители, а для позитивных – слабые водные растворы щелочей (NaOH, KOH). Типовое время проявления составляет 30–40 с.

**Задубливание** слоя ФР является второй сушкой при более высокой температуре и выполняется теми же способами, что и первая сушка.

**Травление** технологического слоя через маску из ФР осуществляют химическим жидкостным или плазменным «сухим» травлением. Химическое жидкостное травление основано на растворении в химических реагентах незащищенных фоторезистивной маской участков технологического слоя. Скорость травления зависит от концентрации реагента и его температуры. Недостатком жидкостного травления является образование так называемого «клина травления», который образуется из-за затекания травителя под фоторезистивную маску, что приводит к уменьшению размера рисунка. При «сухих» методах нет бокового подтравливания, потому что травление технологических слоев осуществляется с использованием плазменных потоков, которые удаляют технологический слой за счет физического распыления путем бомбардировки

ионами инертного газа или разрушением технологического слоя ионами активных газов ( $CF_4$ ,  $CCl_3$ ,  $SF_6$ ).

**Удаление** пленки ФР осуществляют двумя методами. В первом методе ФР смывают с помощью органических растворителей (ацетон, диметил-формамид, четыреххлористый углерод), во втором – с использованием плазмы кислорода, в результате чего образуются летучие соединения  $CO_2$  и  $H_2O$ ,  $NO_2$  и др.

**Контроль** качества воспроизведения конфигурации осуществляют с помощью оптического микроскопа с увеличением не менее 100 раз.

В данной лабораторной работе ставится задача провести фотолитографическую гравировку медной пленки толщиной 0,3 мкм, нанесенной на подложку из ситалла или стекла.

### **Используемые материалы**

Фоторезист ФП-РН-7. Проявитель – раствор NaOH. Травитель для меди – (кислота азотная  $HNO_3$ ). Вода дистиллированная. Диметилформамид или ацетон. Подложки ситалловые с пленкой меди.

### **Оборудование, технологическая оснастка**

Центрифуга горизонтальная. Шкаф сушильный 2В-151. Установка совмещения и экспонирования Цейс 830-02. Микроскоп МИИ-4. Шкаф вытяжной. Стакан мерный. Чашка Петри. Пинцет с фторопластовыми наконечниками. Секундомер. Салфетки бязевые.

### **Порядок выполнения работы**

1. Провести обезжиривание поверхности подложки салфеткой, смоченной в ацетоне.

2. Нанести на подложку слой ФР, для чего поместить подложку на диск центрифуги рабочей стороной вверх, нанести 2–3 капли ФР на подложку, равномерно распределив его по поверхности, включить центрифугу и выдержать время 30–40 с. Толщина пленки ФР при этом составит ~ 3 мкм.

3. Поместить подложку в сушильный шкаф-термостат и выдержать при температуре 95–100 °С в течение 10–20 мин. Извлечь подложку из шкафа и охладить ее на воздухе.

4. Поместить подложку с металлизацией на рабочий столик установки Цейс 830-02 и расположить поверх нее ФШ рабочей стороной к металлической пленке. Порядок экспонирования приведен в технологической инструкции к установке Цейс 830-02. Время экспонирования – 90 с.

5. Для проведения операции проявления рисунка необходимо налить в чашку Петри 50–60 мл проявителя, опустить подложку в проявитель рабочей стороной вверх, выдержать подложку в проявителе до полного проявления рисунка, слегка покачивая чашку. Промыть пластину в дистиллированной воде в течение 15–20 с и высушить пластину на центрифуге в течение минуты.

6. Проконтролировать качество рисунка после проявления под микроскопом МИИ-4. Край рельефа должен быть четким и ровным. Не должно быть остатков ФР в засвеченных участках. В противном случае ФР допроявить в течение 30–40 с.

7. Провести задубливание ФР в термошкафу при 130 °С в течение 10–15 мин.

8. Осуществить травление меди, для чего налить в чашку Петри травитель и выдержать подложку в травителе до полного стравливания металла в незащищенных ФР участках. По окончании травления промыть пластину в дистиллированной воде в течение 20–30 с и высушить на центрифуге в течение минуты.

9. Проконтролировать качество травления металла под микроскопом. При наличии остатков металла в окнах дотравить пленку в течение 1–2 минут.

10. С помощью салфетки, смоченной ацетоном, удалить пленку ФР с поверхности подложки.

11. Проконтролировать качество фотолитографии под микроскопом и выявить основные виды дефектов:

- остатки ФР на поверхности;
- наличие проколов в металлическом слое;
- остатки металла на поверхности пластины;
- определить неровность края элементов;
- определить величину бокового подтравливания по формуле

$$K = (d_2 - d_1) / 2, \quad (3.1)$$

где  $d_1$  – размер выбранного элемента рисунка на рабочей пластине, мкм;  
 $d_2$  – размер этого же элемента рисунка на фотошаблоне, мкм.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Описание реального технологического процесса фотолитографии с указанием режимов основных операций, применяемых материалов, оборудования и оснастки.
3. Описание качества проведенной фотолитографии с указанием измеренных размеров, основных видов обнаруженных дефектов, возможных причин их возникновения и устранения.
4. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что такое фотолитография, виды литографии?
2. Сущность процесса контактной ФЛ.



3. ФР, их виды, процессы, протекающие в ФР под действием излучения.
4. Основные параметры ФР.
5. Способы нанесения ФР.
6. ФШ, их особенности, требования к фотошаблону.
7. Особенности проекционной ФЛ.
8. По каким критериям оценивается качество процесса фотолитографии?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мартынов, В. В. Литографические процессы / В. В. Мартынов, Т. Е. Базарова. – М. : Высш. шк. – 1990. – 128 с.
2. Технология изделий интегральной электроники : учеб. пособие / Л. П. Ануфриев [и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко и Л. И. Гурского. – Минск : Алмафед, 2010. – 536 с.
3. Технология микроэлектронных устройств : справочник / З. Ю. Готра. – М. : Радио и связь. – 1991. – 528 с.

## Лабораторная работа №4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИФФУЗИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

**Цель работы:** изучение основных положений термической диффузии в полупроводниках, методов реализации термических процессов, технологии диффузионного легирования кремния и контроля параметров диффузионных слоев.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Ряд технологических процессов в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС) основан на непосредственном соприкосновении различных фаз и переходе при этом соответствующих компонентов из одной фазы в другую или перемещении компонентов в пределах одной фазы. Во всех этих процессах происходит перемещение компонента из одной фазы в другую или внутри одной фазы, которое называется диффузией. Диффузия протекает в результате стремления системы достигнуть физико-химического равновесия, т. е. до тех пор, пока химические потенциалы компонентов фазы во всех частях ее станут равными (для однородной системы). Таким образом, диффузией называют перенос вещества, обусловленный хаотическим тепловым движением атомов, возникающий при наличии градиента концентрации данного вещества и направленный в сторону убывания этой концентрации в той среде, где происходит диффузия.

При производстве современных изделий электронной техники (ИЭТ) диффузия является одним из методов введения в объем твердого тела примесных атомов, определяющих тип проводимости и уровень легирования диффузионного слоя. В результате диффузии образуются *p-n*-переходы, которые являются основой для формирования диодов, транзисторов, конденсаторов. Диффузионные процессы также позволяют сформировать полупроводниковые резисторы, а также при высокой степени легирования – и токопроводящие дорожки.

Математическое описание диффузионных процессов было впервые предложено в 1855 г. А. Фиком в виде двух законов, основанных на уравнениях теплопроводности.

Первый закон Фика характеризует скорость проникновения атомов одного вещества в другое при постоянном во времени потоке этих атомов и неизменном градиенте их концентрации:

$$\bar{F} = -D\bar{\nabla}C, \quad (4.1)$$

где  $F$  – вектор плотности потока атомов вещества;

$\nabla C$  – вектор градиента концентрации диффундирующих атомов;  
 $D$  – коэффициент пропорциональности, или коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии (единица измерения –  $\text{см}^2/\text{с}$ ) является мерой скорости, с которой система способна при заданных условиях выровнять разность концентраций.

Второй закон Фика определяет скорость накопления растворенной примеси в любой плоскости, перпендикулярной направлению диффузии. Для одномерного случая оно имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad (4.2)$$

где  $\frac{\partial C}{\partial t}$  – изменение концентрации диффундирующего вещества со временем.

Если коэффициент  $D$  считать постоянным (что справедливо в большинстве практических случаев диффузии в полупроводниках), то уравнение (4.2) имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (4.3)$$

Одной из основных величин в уравнении Фика является коэффициент диффузии  $D$ , который зависит от температуры, энергии связи примесных атомов в решетке полупроводника, плотности вакансий в кристалле, постоянной решетки, кристаллографической ориентации подложки и других факторов. Влияние этих параметров на величину  $D$  описывается соотношением Аррениуса

$$D = D_0 \exp \left[ -\frac{E_{\text{акт}}}{kT} \right], \quad (4.4)$$

где  $D_0$  – константа диффузии, которая в диапазоне 900–1200 °С не зависит от температуры;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура;

$E_{\text{акт}}$  – энергия активации процесса диффузии, необходимая для удаления атома из кристаллической решетки твердого тела.

Фактически это энергия элементарного «прыжка» (перемещения) примесного или собственного атома.

В соответствии с основными видами дефектов различают два основополагающих вида диффузии для реальных кристаллов – междоузельный и вакансионный. Для некоторых примесных атомов Si для вакансионного

механизма  $E_{\text{акт}} \approx 3-4$  эВ, а для механизма прямого перемещения атомов по междоузлиям  $E_{\text{акт}} \approx 0,6-1,2$  эВ.

Для практических реализаций диффузионных процессов особый интерес представляют два случая диффузии.

**Первый – диффузия из бесконечного источника**, когда в поверхностные слои твердого тела вводятся примесные атомы, концентрация которых на поверхности остается постоянной в течение всего процесса диффузии. Этот случай характерен для первой стадии диффузии, называемой в производстве ИЭТ «загонкой». Упрощенно на стадии «загонка» в поверхностные слои вводятся примесные атомы на глубину 0,15–0,8 мкм в зависимости от предельной растворимости примеси в твердом теле при данной температуре.

Распределение концентрации диффузанта при диффузии в заданную область ( $x > 0$ ) из бесконечного источника (загонка примеси) с постоянной концентрацией  $C_0$  показано на рис. 4.1.

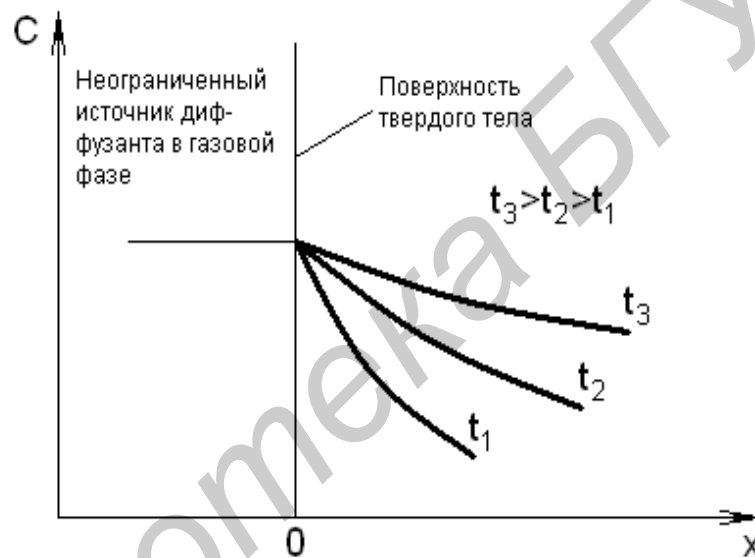


Рис. 4.1. Распределение концентраций примеси за счет диффузии из бесконечного источника

**Второй – диффузия из конечного источника.** Этот случай соответствует условиям, когда в тонком поверхностном слое полупроводника создана избыточная концентрация примеси  $C_0$ , а образец подвергается дополнительной высокотемпературной обработке. Избыточная концентрация может быть получена путем диффузии примесей на стадии «загонка» или же, что наиболее распространено на практике, – ионной имплантацией. В этом случае происходит перераспределение примеси из поверхностного слоя в объем твердого тела. Данный этап иногда называется второй стадией диффузии – «разгонкой». Во время процесса «разгонки» количество примесных атомов на поверхности образца будет непрерывно уменьшаться, и одновременно будет увеличиваться концентрация примеси в слоях, находящихся глубже легированного поверхностного слоя.

Для граничных условий конечного источника решение диффузионного уравнения дает функцию распределения Гаусса. Для одномерного случая оно выглядит так:

$$C(x,t) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{1/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (4.5)$$

где  $Q$  – количество примесей, введенное на этапе «загонка».

Графическая интерпретация выражения (4.5) приведена на рис. 4.2.

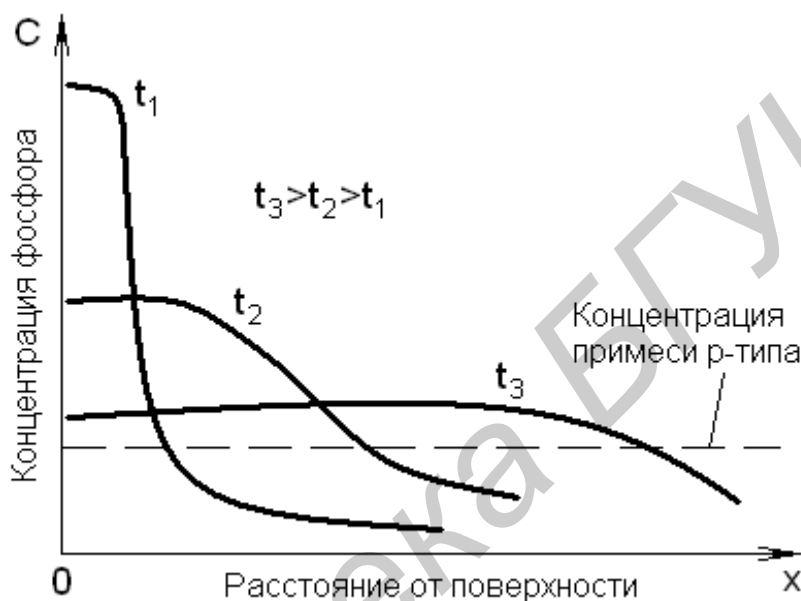


Рис. 4.2. Влияние времени диффузии на перераспределение примеси фосфора в кремниевой подложке из конечного источника, описываемое законом Гаусса

Температурный диапазон реализации диффузионных процессов составляет 950–1250 °С для Si. Ниже 950 °С значения коэффициентов диффузии очень малы и глубина залегания легированного слоя очень незначительна. Выше 1250–1280 °С качество диффузионных слоев неудовлетворительно.

В зависимости от способа введения в полупроводники диффузанта различают диффузию из газовой (или паровой) фазы, из жидкой фазы и из твердой фазы.

Диффузионные процессы проводят в закрытой или открытой трубе. В первом случае (рис. 4.3, а) пластины полупроводника 1 и источник 2 загружают в кварцевую ампулу 3, которую вакуумируют (до давления  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  Па), герметизируют и помещают в печь 4. Ампулу выдерживают при температуре 900–1300 °С определенное время, в течение которого идет процесс диффузии газообразной примеси на рассчитанную глубину. Недостаток такого метода – низкая производительность и высокая стоимость процесса, поскольку при вскрытии ампула разрушается.

Термин «открытая труба» обусловлен тем, что выходной конец диффузионной трубы сообщается с атмосферой (рис. 4.3, б–д). Через него в зону диффузии загружают кремниевые пластины 1. Чтобы свести к минимуму загрязнения из атмосферы, над выходом трубы 2 устанавливают вытяжную систему. Во входной конец диффузионной трубы вставляют шлиф для введения газа – носителя 3 – азота или кислорода.

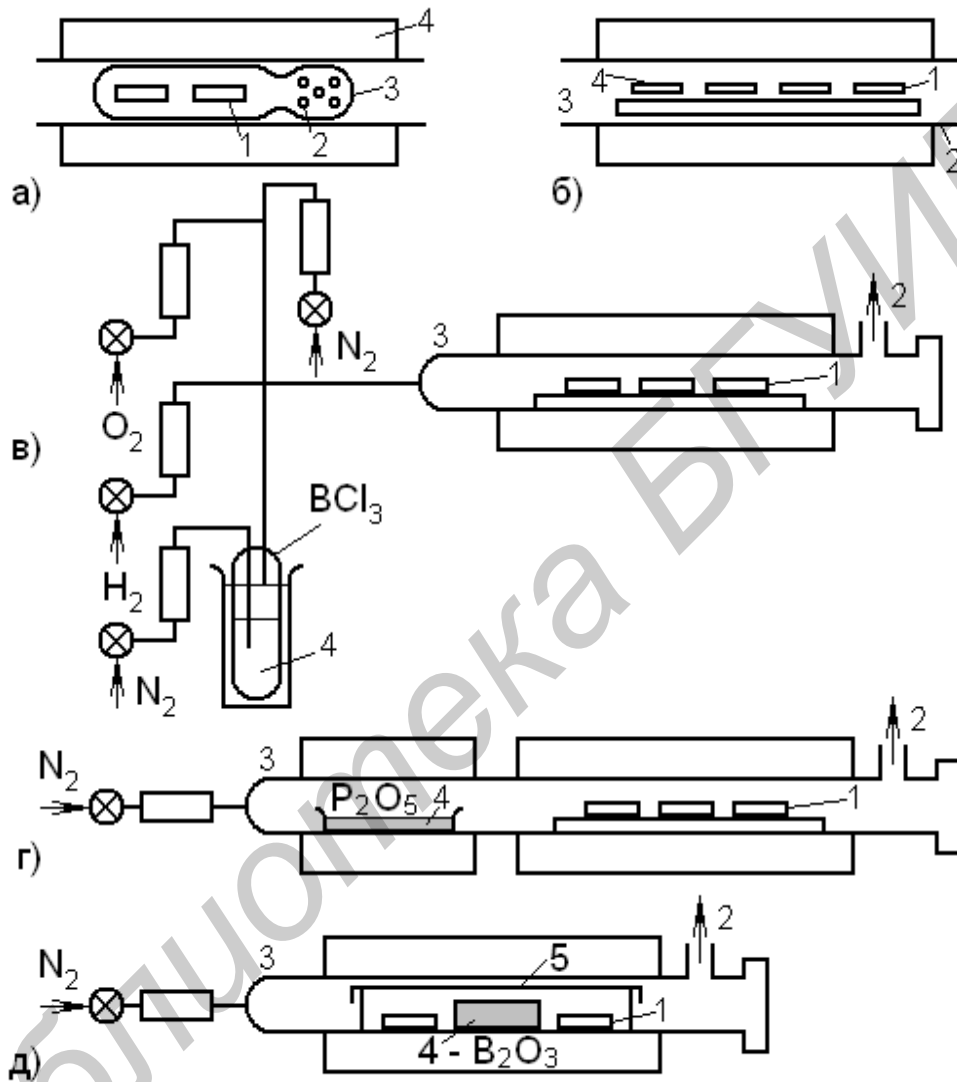


Рис. 4.3. Способы проведения диффузии

Диффузант 4 либо наносят на поверхность пластины (рис. 4.3, б), либо вводят в виде пара или газа в газ – носитель (рис. 4.3, в). На рис. 4.3, г показана схема диффузионной печи, применяемая в основном для диффузии из твердых источников методом открытой трубы, на рис. 4.3, д – схема бокс-метода. В последнем случае пластины и источник находятся в полусферическом контейнере 5 однозонной печи.

Наибольшее распространение в промышленности получила диффузия в открытой трубе, проводимая из твердых, жидких и газообразных источников.

Рассмотрим схему процесса диффузии в потоке газа-носителя с источником жидкого диффузанта, широко используемого в настоящее время.

Для загрузки партии пластин (рис. 4.4) применяют кассеты из кварцевого стекла или кремния. Пластины размещаются поперек или вдоль оси кассеты и соответственно диффузионной трубы, куда загружаются кассеты с пластинами. При продольном расположении оси снижается турбулентность потока в реакторе.

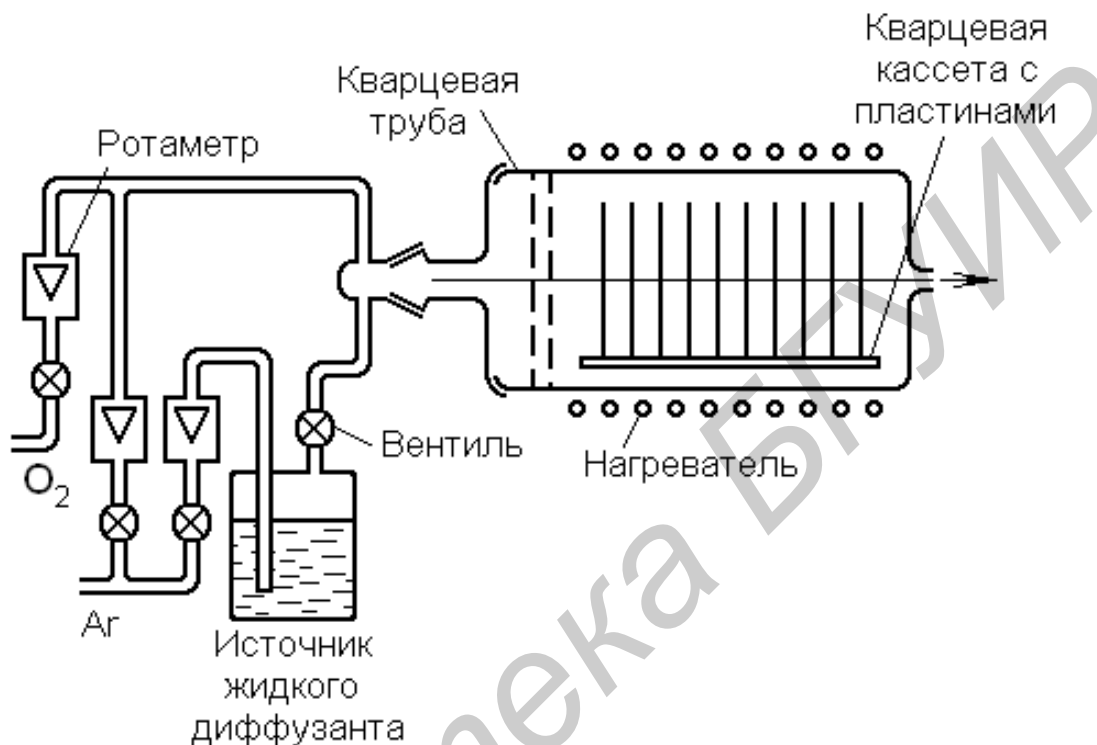


Рис. 4.4. Схема процесса диффузии в открытой трубе в потоке диффузанта

Операционный цикл включает следующие переходы:

- так называемая «промывка» реактора аргоном;
- вывод печи на заданный температурный режим (в течение 2–3 ч);
- загрузка кассеты с пластинами и прогрев ее в течение 10 мин с продувкой аргоном для удаления десорбированных газов;
- подача аргона с парогазовой смесью (диффузанта и кислород);
- выдержка в рабочей зоне при постоянной температуре в течение заданного времени (собственно диффузия);
- прекращение подачи смеси и извлечение кассеты с пластинами.

Широкое применение получили печи диффузионные однозонные с несколькими трубами, диаметр которых примерно в полтора раза превышает диаметр обрабатываемых пластин. Среди диффузионных систем следует выделить СДО 125-3/015 (диаметр пластин 76 мм), СДОМ (диаметр пластин 100 мм), ОКСИД-ПО (100–150 мм). Погрешность поддержания температуры в рабочей зоне печи не более 0,5 °С. Контроль температуры ведется в нескольких точках (обычно в трех точках) платино-платинородиевыми термопарами.

В качестве источника примесей при диффузии используют специальные вещества (чистые или химические соединения), являющиеся источником атомов примеси и называемые диффузантами. По своему агрегатному состоянию диффузанты бывают твердые, жидкие и газообразные. Электронный тип проводимости в кремнии дают фосфор, сурьма, мышьяк, а дырочный – бор, галлий, алюминий.

**Твердые диффузанты. Фосфор.** Наиболее распространенным источником является безводная пятиокись фосфора (фосфорный ангидрид)  $P_2O_5$ .

$P_2O_5$  помещают в зону источника (см. рис. 4.3, г) и нагревают до 230–300 °С. Газ-носитель захватывает молекулы  $P_2O_5$  и переносит в зону диффузии. В процессе диффузии между  $P_2O_5$  и Si происходит химическая реакция с выделением элементарного P и Si, образующих стекловидное соединение на поверхности пластины, из которого идет диффузия.

Другими источниками в твердой фазе являются нитрид фосфора  $P_3N_5$ , который требует более высоких температур источника (400–450 °С). Недостатком  $P_3N_5$  является непостоянство его состава и связанное с этим изменение давления паров, что дает невоспроизводимые результаты.

**Бор.** Самым распространенным источником в твердой фазе для диффузии в открытой трубе является борный ангидрид  $B_2O_3$  или борная кислота, которая при высокой температуре дегидратируется с образованием  $B_2O_3$ . Температура источника составляет около 900 °С. Обычно  $B_2O_3$  и  $H_3BO_3$  используют в смеси с  $SiO_2$ , поскольку соприкосновение чистого  $B_2O_3$  с кварцем вызывает его растекловывание. В последнее время широкое применение находит нитрид бора BN, который выпускается в виде дисков с диаметром, равным диаметру используемых кремниевых пластин. Диски из нитрида бора помещаются в кассету рядом с пластинами из кремния, что обеспечивает высокую равномерность легирования.

**Жидкие диффузанты. Фосфор.** В качестве жидких диффузантов используют оксихлорид фосфора  $POCl_3$ , трихлорид фосфора  $PCl_3$  и пентафторид фосфора  $PF_5$ . Обычно жидкие источники реагируют с избытком кислорода и образованием  $P_2O_5$ . Эти диффузанты негигроскопичны, имеют малый расход и стабильны по концентрации фосфора при длительном использовании.

**Бор.** Наиболее распространен трехбромистый бор  $BBr_3$ . В газ-носитель добавляют кислород для окисления  $BBr_3$  до  $B_2O_3$  и для защиты поверхности от образования черных нерастворимых отложений.

**Газообразные диффузанты. Фосфор.** Для диффузии фосфора в открытой трубе обычно используют фосфин  $PH_3$ . Механизм диффузии из  $PH_3$  такой же, как и механизм диффузии из  $P_2O_5$ . Недостатком  $PH_3$  является его высокая токсичность.

**Бор.** В качестве газообразных источников бора используют треххлористый бор  $BCl_3$  и диборан  $B_2H_6$ .  $BCl_3$  в нейтральной и восстановительной атмосфере образует с кремнием летучие соединения и



выделяет В. При добавлении в поток  $\text{BCl}_3$  кислорода образуется борный ангидрид. Диборан используют в нейтральной, восстановительной и окислительной атмосфере. Пиролиз  $\text{B}_2\text{H}_6$  происходит при  $T > 300$  °С. Недостатком  $\text{B}_2\text{H}_6$  являются токсичность, легкая воспламеняемость на воздухе при концентрации более 0,8 %, взрыв при соприкосновении с хлором.

В диффузионных структурах обычно контролируют глубину залегания  $p$ - $n$ -перехода, поверхностную концентрацию, характер распределения диффундирующей примеси и значение градиента концентрации примеси в области  $p$ - $n$ -перехода.

Для выявления диффузионных  $p$ - $n$ -переходов пользуются методом косо́го шлифа (рис. 4.5, а), т. е. кристалл, содержащий  $p$ - $n$ -переход, сошлифовывают под небольшим углом (1–5 °). При этом наблюдаемый диффузионный слой заметно расширяется. Границу диффузионной области выявляют при помощи метода селективного окрашивания специальными травителями. Глубина залегания  $x_j$  в этом случае определяется по формуле

$$x_j = h \cdot \text{tg}\alpha, \quad (4.6)$$

где  $h$  – ширина  $p$ - $n$ -перехода при заданной величине угла сошлифовывания  $\alpha$ .

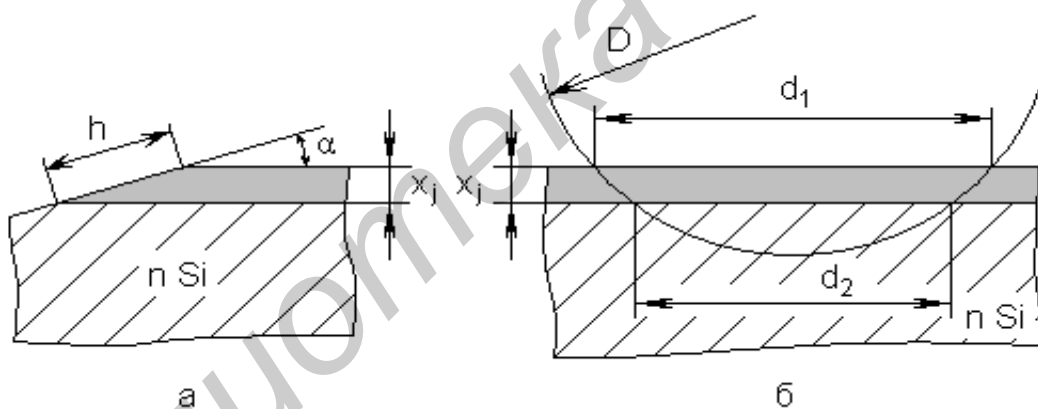


Рис. 4.5. Методы контроля глубины залегания диффузионных слоев с помощью косо́го (а) и сферического (б) шлифов

Более точные результаты получают при использовании сферического шлифа (рис. 4.5, б). В этом случае

$$x_j = \frac{d_1^2 - d_2^2}{4D}, \quad (4.7)$$

где  $d_1$  – диаметр лунки;

$d_2$  – диаметр нижней границы  $p$ - $n$ -перехода;

$D$  – диаметр шара (30...150 мм).

Диффузионный слой можно аппроксимировать последовательностью элементарных слоев с различной, но постоянной в их пределах концентрацией примеси. Проводимость вдоль диффузионного слоя является суммой

проводимостей элементарных слоев. Измерив 4-зондовым методом поверхностную проводимость  $\sigma_{so}$ , удалив элементарный слой толщиной  $\Delta$  и вновь измерив поверхностную проводимость  $\sigma_s$ , среднюю концентрацию свободных носителей заряда в удаленном слое, можно рассчитать по формуле:

$$C_i = \frac{\sigma_{so} - \sigma_s}{e\mu\Delta}, \quad (4.8)$$

где  $\mu$  – средняя подвижность носителей заряда.

Градиент концентрации примеси определяют путем измерения емкости *p-n*-перехода. При достаточно малых обратных смещениях, когда ширина перехода невелика, распределение примеси в нем с удовлетворительной точностью можно считать линейным.

### Порядок выполнения работы

1. Получить у лаборанта кремниевую подложку и пластину из нитрида бора.
2. Обработать кремниевую подложку путем протирки ее поверхности салфеткой, смоченной спиртом или ацетоном.
3. Стравить остатки оксида на кремниевой подложке в плавиковой кислоте (HF).
4. Промыть кремниевую подложку дистиллированной водой и просушить ее.
5. С помощью прибора ИУС-3 измерить удельное поверхностное сопротивление исходной кремниевой подложки.
6. Поместить кремниевую подложку на кварцевую лодочку. Положить на кремниевую подложку пластину из нитрида бора.
7. Медленно ввести лодочку в рабочую зону печи с помощью кварцевого толкателя.
8. Провести диффузию бора при следующих режимах: температура в рабочей зоне печи –  $950 \pm 1$  °С, время диффузии – 30 мин.
9. Извлечь подложку из печи и удалить образовавшееся боросиликатное стекло в растворе плавиковой кислоты.
10. Промыть подложку дистиллированной водой и просушить ее.
11. Измерить удельное поверхностное сопротивление диффузионного слоя на приборе ИУС-3.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Основные теоретические положения.
3. Описание методики проведения работы.

4. Состав аппаратуры (диффузионная печь, установка для измерения удельного сопротивления и т. п.).
5. Описание хода работы.
6. Анализ результатов измерений.
7. Выводы.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Сущность процесса диффузии.
2. Основные законы диффузии, их формулировка.
3. Запишите выражение и нарисуйте распределение примеси при диффузии из источника с постоянной поверхностной концентрацией.
4. Запишите выражение и нарисуйте распределение примеси при диффузии из источника с фиксированным количеством примеси.
5. Что такое коэффициент диффузии? Его физический смысл. Температурная зависимость коэффициента диффузии.
6. Каковы механизмы диффузии в идеальном и реальном кристаллах?
7. Источники легирующей примеси (диффузанты).
8. Методы осуществления диффузионных процессов.
9. Особенность двухстадийного процесса диффузии.
10. Основные способы контроля диффузионных структур.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Болтакс, Б. И. Диффузия в полупроводниках / Б. И. Болтакс. – М. : Физматгиз. – 1961. – 523 с.
2. Технология изделий интегральной электроники : учеб. пособие / Л. П. Ануфриев [и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко и Л. И. Гурского. – Минск : Алмафея, 2010. – 536 с.
3. Технология микроэлектронных устройств : справочник / З. Ю. Готра. – М. : Радио и связь. – 1991. – 528 с.

## Лабораторная работа №5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

**Цель работы:** изучение технологического процесса изготовления печатных плат фотохимическим методом и исследование основных параметров и дефектов плат.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

**Печатным монтажом** называется система печатных проводников, обеспечивающих электрические соединения элементов схемы, экранирование, заземление. Элементами ПП являются диэлектрическое основание, металлическое покрытие в виде рисунка печатных проводников и контактных площадок, монтажные и фиксирующие отверстия. Современный печатный монтаж обеспечивает:

- большую плотность монтажных соединений (до 40–50 паек/см<sup>2</sup>);
- резкое уменьшение числа паяных соединений, что способствует увеличению надежности изделий;
- повышение электрических нагрузок в цепях в 5–10 раз;
- улучшение вибропрочности, теплоотдачи и стойкости аппаратуры к климатическим воздействиям;
- стабильную повторяемость параметров изделий;
- микроминиатюризацию, унификацию и стандартизацию конструкций электронной аппаратуры;
- возможность автоматизации сборочно-монтажных работ.

**Основные технические требования** к печатному монтажу:

- точность получения изображения рисунка  $\pm(0,05-0,3)$  мм в зависимости от метода изготовления;
- разрешающая способность 0,1–1,0 мм;
- токонесущая способность проводников до 20 А/мм<sup>2</sup>;
- прочность сцепления с основанием не менее 15 МПа;
- сопротивление изоляции между токоведущими элементами не менее  $10^4$  МОм;
- омическое сопротивление проводника шириной 0,5 мм не более 1,4 Ом·м;
- сопротивление межслойного перехода не более 0,001 Ом.

Основные материалы для изготовления печатных плат: стеклотекстолит, гибкий фольгированный диэлектрик ФГ, гетинакс, лавсан, фторопласт, полиамид фольгированный. Медную фольгу к диэлектрикам приклеивают

клеем БФ-4. Выпускают фольгированный гетинакс марок ГФ-1-35, ГФ-2-35, ГФ-1-50, ГФ-2-50. Гибкий фольгированный диэлектрик ФГ-1-35 используется для изготовления гибких шлейфов и кабелей. Он выдерживает не менее 300 перегибов с радиусом закручивания 3 мм и углом перегиба 70 °. Для микроэлектронных устройств применяют тонкие фольгированные стекло-текстолиты ФДМ, ФДМЭ, ФДМТ толщиной 0,1...0,25 мм.

Методы изготовления печатных плат классифицируют по способам переноса рисунка печатных проводников на диэлектрик и получения токопроводящего покрытия печатного монтажа. Перенос рисунка осуществляют методом трафаретной печати, фотопечати и офсетной печати. При трафаретной печати резисты, нанесенные через сетчатый трафарет на материал основы, образуют устойчивый к травлению слой толщиной 10...30 мкм. Разрешающая способность метода 0,5 линий/мм, он эффективен при использовании автоматического оборудования для больших серий.

При методе фотопечати поверхность фольгированного диэлектрика покрывают позитивным или негативным светочувствительным материалом, устойчивым к воздействию агрессивных сред и называемым фоторезистом, на который копируют рисунок печатного монтажа. Метод обеспечивает наивысшую разрешающую способность (до 2–3 линий/мм), высокую точность и четкость контуров проводников.

Метод офсетной печати основан на переносе изображения печатной схемы с рельефной формы, покрытой химически стойкой краской, на поверхность платы с помощью резинового валика. Разрешающая способность метода 0,5–0,85 линий/мм, он используется только для больших серий ввиду значительных затрат на оборудование.

Получение рисунка печатного монтажа осуществляется либо путем травления фольги с незащищенных мест, либо электрохимическим методом. Методы травления обеспечивают равномерную толщину проводников, высокую прочность сцепления с основанием, высокую электропроводность и простой технологический цикл изготовления платы. Недостатки: значительный расход меди, невозможность металлизации в отверстиях.

Электрохимические методы предполагают первоначальное нанесение на поверхность диэлектрика химическим способом в соответствии с рисунком схемы и последующее гальваническое наращивание металла до требуемой толщины. При этом подвергаются металлизации и монтажные отверстия, экономится медь. Недостатки: слабая адгезия проводников к основанию, неравномерность толщины проводников, значительное время воздействия химических реагентов на основание.

Развитием электрохимических методов являются аддитивные методы, которые позволяют увеличить плотность монтажа, уменьшить подтравливание проводников, сократить расход травильных растворов. Аддитивные методы разделяются на химические, в которых нанесение проводников осуществляется путем селективного химического восстановления ионов металла, и химико-гальванические, в которых наряду с химическим наращиванием производится электрохимическое формирование проводников.

Высокая прочность сцепления проводников с основанием при аддитивном методе достигается использованием либо диэлектрика с введенным катализатором, либо специального адгезива. В качестве катализатора используют палладий, который дисперсно распределяется в материале в количестве от 0,1 до 10 %. Адгезивы представляют собой различные композиции, например, на основе акрилонитрилбутадиенового сополимера (АБС), толщиной 20...30 мкм, наносимые на основание окунанием и последующей термообработкой.

Для изготовления двусторонних печатных плат с металлизацией отверстий применяют комбинированные негативный и позитивный методы, сочетающие в себе принципы химических и электрохимических методов. При **негативном методе** экспонирование рисунка печатного монтажа осуществляется с фотонегатива, травление медной фольги с пробельных мест производится до металлизации отверстий (рис. 5.1).

**Позитивный метод** предусматривает экспонирование с фотопозитива. Операция травления осуществляется после металлизации отверстий. Металлическая поверхность проводников и стенки отверстий перед травлением защищаются металлическим резистом, устойчивым к травильным растворам, например сплавом олово – свинец.

При позитивном методе исключаются возможности срыва контактных площадок при сверлении монтажных отверстий, уменьшается воздействие химических реагентов на основание платы, однако происходит пассивация поверхности металла внутри отверстий при травлении фольги.

**Комбинированный негативный метод** включает следующие операции:

- получение контура заготовки и подготовка ее поверхности;
- нанесение негативного рисунка схемы, ретуширование;
- травление металлической фольги с пробельных мест;
- нанесение защитной пленки лака для защиты всей поверхности платы от химического меднения краскораспылителем и подсушивание при температуре 50–60 °С (цапонлак, клей АК-20);
- сверление отверстий;
- химическое меднение;

- снятие защитного слоя лака;
- гальваническое меднение стенок отверстий;
- снятие фоторезиста;
- покрытие проводников припоем для обеспечения их паяемости.

Преимущества метода: освоенность процесса производства, широкая номенклатура травителей. Недостатки: возможность срыва контактных площадок при сверлении; требуются специальные контактирующие приспособления при металлизации отверстий; вредное воздействие химических растворов на платы; большая величина подтравливания.

**Комбинированный позитивный** метод включает операции:

- получение контура заготовки и подготовка ее поверхности;
- нанесение позитивного рисунка схемы;
- нанесение защитного слоя лака (нитроклей АК-20, эмаль ХСЭ, ХСЛ) для предохранения от воздействия химически активных растворов при химической металлизации, количество слоев 2–3, нанесение окунающим, поливом или с помощью краскораспылителей, сушка в течение 20–40 мин при 60–80 °С;
- сверление отверстий в плате;
- химическое меднение отверстий толщиной слоя 1–2 мкм при скорости 20–30 мкм/ч;
- гальваническое меднение толщиной 25–30 мкм;
- удаление защитного слоя лака;
- нанесение металлического резиста для защиты проводников и отверстий от травления (серебрение толщиной 10–12 мкм, гальваническое покрытие сплавами Sn-Pb; Sn-Bi толщиной 20–25 мкм);
- удаление фоторезиста;
- травление пробельных мест;
- оплавление металлического резиста для удаления припоя из покрытий и улучшения паяемости покрытия;
- контроль платы, маркировка.

Гальванически нанесенный металлический резист – сплав Sn-Pb имеет пористую структуру, быстро окисляется, теряет способность к пайке. Для устранения этих недостатков проводят оплавление резиста либо с помощью ИК-излучения, либо в нагретой жидкости (глицерине) или газе. В результате покрытие приобретает структуру металлургического сплава и хорошую паяемость.

Заготовки печатных плат получают резкой листа фольгированного материала на дисковой пиле или штамповкой с одновременной пробивкой технологических отверстий. При толщине штампуемого листа более 1,5 мм, сложном профиле заготовки обрабатываемый материал подогревают до 60 °С. Заусенцы и фаски снимают на абразивных кругах.

Сверление отверстий в платах осуществляют на одно- и многошпиндельных сверлильных автоматах с цифровым программным управлением при числе оборотов шпинделя 12 000–45 000 в минуту, подаче 0,02–0,05 мм/оборот.

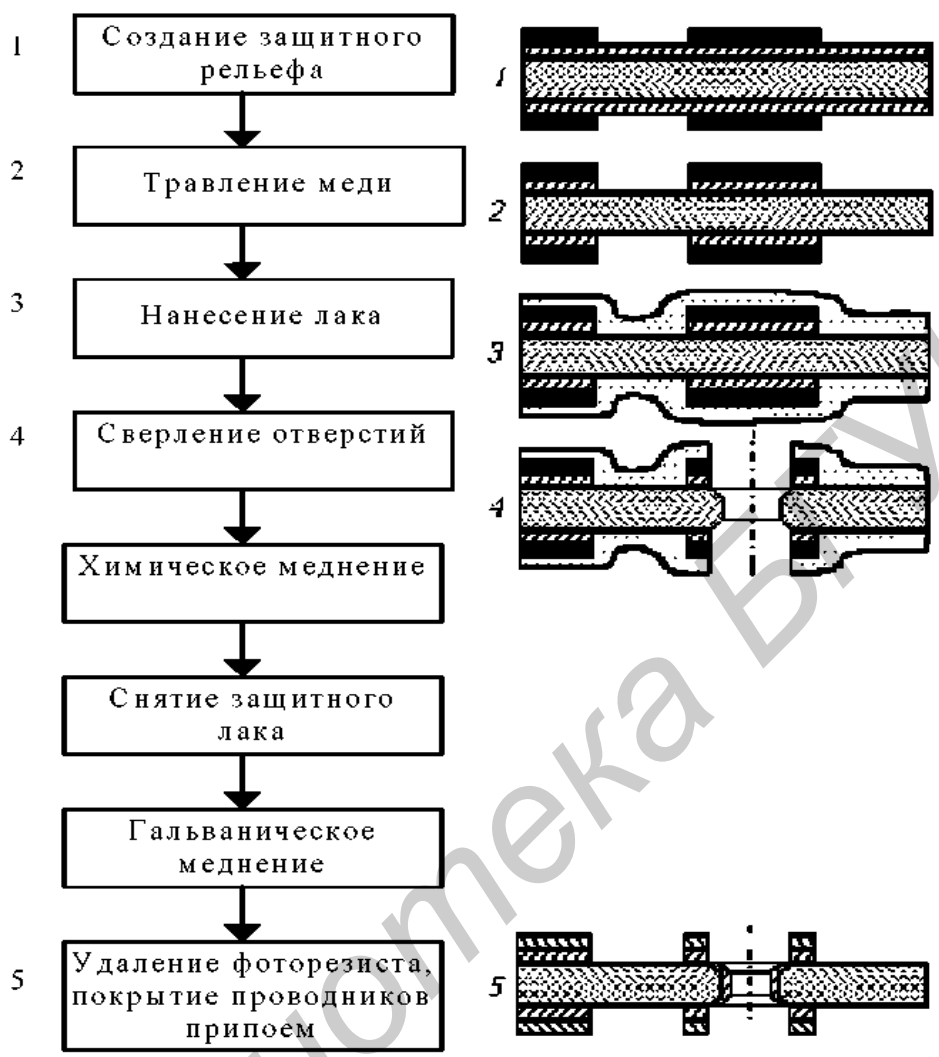


Рис. 5.1. Схема технологического процесса изготовления печатных плат комбинированным негативным методом

Применяют сверла из твердых сплавов типа ВК6М со стойкостью режущей части до 5000 отверстий и оптимальным углом при вершине 120–125 °С.

Вследствие нагревания сверла отверстия обволакиваются расплавленной эпоксидной смолой, которая может очищаться химическим травлением диэлектрика, при этом не только удаляются остатки смолы, но и подтравливается материал в отверстиях, что увеличивает поверхность для осаждения меди.

Получение изображения защитного рисунка осуществляется с помощью негативных или позитивных фоторезистов. Негативные фоторезисты под



действием ультрафиолетового излучения фотополимеризуются и образуют защитные участки на поверхности основания. Негативные фоторезисты изготавливают на основе поливинилового спирта с добавлением к его водному раствору бихромата аммония для придания светочувствительности.

Разрешающая способность негативных фоторезистов – 50 линий/мм, они не содержат токсичных соединений, проявляются теплой водой, имеют низкую стоимость. Недостатками являются эффект темнового дубления, проявляющийся в полимеризации резиста не только под действием света, но и в темноте, а также низкая стойкость к химическим реагентам.

Позитивные фоторезисты, получаемые на основе диасоединений, при действии излучения подвергаются фотохимической деструкции и вымываются при проявлении. Разрешающая способность таких фоторезистов 350–400 линий/мм, в них отсутствует эффект темнового дубления.

Широко применяются сухие фоторезисты типа СПФ, которые по своей разрешающей способности не уступают фоторезистам на основе диасоединений, а по технологичности намного их превосходят, поскольку исключаются операции сушки и термического дубления. Сухой фоторезист представляет собой тонкую пленку, состоящую из трех слоев: оптически прозрачной пленки полиэтилентерефталата, пленки светочувствительного полимера, защитной полиэтиленовой пленки. Перед нанесением фоторезиста на поверхность заготовки слой защитной пленки снимают, а фотополимер приклеивают с помощью валковой установки – ламинатора. Оптически прозрачная пленка из полиэтилентерефталата удаляется перед операцией проявления.

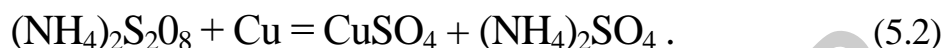
Экспонирование фоторезистов осуществляют в вакуумных светокопировальных рамах, обеспечивающих плотное прилегание фотошаблона к фоторезисту, под воздействием ультрафиолетового излучения ( $\lambda = 300\text{--}450$  нм), получаемого с использованием ртутно-паровых ламп. Установка для экспонирования с передвижным источником света КП6341 обеспечивает двухстороннее экспонирование и вакуумный прижим заготовок. Охлаждение ламп осуществляют вентилятором либо проточной водой.

Травление меди – сложный окислительно-восстановительный процесс, в котором окислителем является травильный раствор, переводящий медь из металлического состояния в ионное. В качестве травильных применяют растворы на основе хлорного железа, персульфата аммония, хлорной меди, перекиси водорода и др. Наиболее распространен раствор хлорного железа (удельный вес  $1,3\text{--}1,4$  г/см<sup>3</sup>) с небольшим количеством (до 50 г/л) соляной кислоты. Травление меди происходит по реакции



Температура раствора 35–50 °С, время травления фольги толщиной 35 мкм 15–20 мин. Предельная концентрация меди в растворе составляет 50–60 кг/м<sup>3</sup>, после чего раствор регенерируют. Недостатками состава являются малая скорость травления, потеря меди, трудность отмывки плат.

Травильный раствор на основе персульфата аммония применяется для удаления меди с плат, проводники которых защищены сплавом олово – свинец. Процесс травления описывается уравнением



Температура раствора составляет 45–50 °С, время травления фольги толщиной 35 мкм – 10–15 мин, предельная концентрация меди в растворе – 40 кг/м<sup>3</sup>.

Преимущества: более высокая скорость травления, легкость регенерации. Недостатки: наблюдается эффект подтравливания проводников, выпадение кристаллического осадка на вытравленной поверхности, что приводит к дополнительной обработке в 10%-й серной кислоте, токсичность продуктов разложения. Травление осуществляют либо погружением заготовок плат в ванны с подогреваемым раствором и перемешиванием его сжатым воздухом, либо на установках струйного травления с автоматизированной подачей раствора и перемещением плат на конвейере со скоростью 0,04–0,25 м/мин.

Химическая металлизация поверхности диэлектрика основана на реакции восстановления металла из раствора и его осаждении на поверхности, имеющей каталитические свойства. Для того чтобы передать диэлектрику способность к металлизации, проводят операции сенсбилизации и активирования. Для достижения требуемой надежности и обеспечения ремонтпригодности толщина металлизации в отверстиях печатных плат должна быть не менее 25 мкм.

Гальваническое меднение осуществляют в пирофосфатных борфтористоводородных и серноокислых блестящих электролитах. Для повышения скорости осаждения применяют перемешивание электролита, проточный электролит, нестационарные режимы электроосаждения.

Контроль качества плат производят после основных операций технологического процесса, что обеспечивает обнаружение и устранение причин брака.

**Наиболее типичные дефекты печатных плат:**

– короткое замыкание между проводниками и контактными площадками по причине сдвига внутренних слоев при прессовании или попадание раствора химического меднения в зазоры;

– разрыв проводников из-за царапин на поверхности или подтравливания меди;

– отсутствие контакта между проводниками слоев и металлизированными отводами вследствие плохой подготовки к химической металлизации или малой площади контактирования;

– выход окружности отверстия за пределы контактной площадки по причине плохой точности при сверлении отверстий;

– снижение сопротивления изоляции – проникновение в межслойные соединения влаги, растворов.

Типичными причинами брака могут быть: непрочное прилегание фоторезиста к плате, малое время экспонирования, плохая подготовка поверхности, подтравливание печатных проводников. Готовую плату проверяют визуально. Печатные проводники должны быть четкими, с ровными краями, без отслаиваний и подтравливания. Электрические и механические параметры печатных проводников исследуют с помощью специальных тестовых плат, имеющих контрольные элементы (рис. 5.2).

### **Порядок выполнения работы**

1. Получить необходимые материалы, инструмент и заготовку из фольгированного материала.

2. Зачистить шлифовальной шкуркой поверхность заготовки, снять заусенцы с помощью напильника.

3. Обезжирить поверхность заготовки с помощью салфетки, смоченной ацетоном.

4. Декапировать плату в растворе соляной кислоты в ванночке из органического стекла в течение 2 мин. Раствор слить обратно в сосуд.

5. Промыть плату в проточной воде.

6. Высушить и прогреть плату до температуры 50–60 °С под феном.

7. Снять защитную пленку с одной стороны сухого фоторезиста и наложить его этой стороной на нагретую плату.

8. Прикатать фоторезист к поверхности медной фольги с помощью валика, начиная с центра платы к ее краям, прижимая валик сначала с небольшим усилием, затем более сильно.

9. Выключить все выключатели на панели управления установки экспонирования.

10. Выставить на счетчике требуемое время экспонирования в секундах.

11. Расстегнуть защелки, удерживающие верхнюю крышку, и поднять крышку установки.

12. Совместить фотошаблон с заготовкой печатной платы таким образом, чтобы подписи на фотошаблоне не были зеркально перевернуты и правильно читались.

В случае экспонирования заготовки платы через два фотошаблона (двухсторонняя печатная плата) вставить плату между двумя фотошаблонами, выровнять и закрепить фотошаблоны.

13. Установить заготовку с фотошаблоном в вакуумную камеру.

14. Плотно закрыть вакуумную камеру, закрыв и плотно прижав верхнюю крышку.

15. Включить вакуумный насос подождать примерно 30 с до тех пор, пока воздух из вакуумной камеры полностью не удален.

16. Закрывать крышку установки, застегнуть защелки и включить ультрафиолетовые лампы: верхнюю, нижнюю или обе сразу.

Светодиодный дисплей таймера начнет отсчет оставшегося времени и подаст звуковой сигнал по окончании цикла экспонирования.

17. Выключить вакуумный насос, открыть крышку установки и подождать 20–30 с. После этого открыть крышку вакуумной камеры.

18. Если нужно экспонировать несколько одинаковых или похожих заготовок плат, воспользуйтесь кнопкой «REEXPOSE» (повтор цикла).

**ВНИМАНИЕ!** Смотреть на работающие лампы запрещено. Непосредственное ультрафиолетовое излучение вредно для глаз.

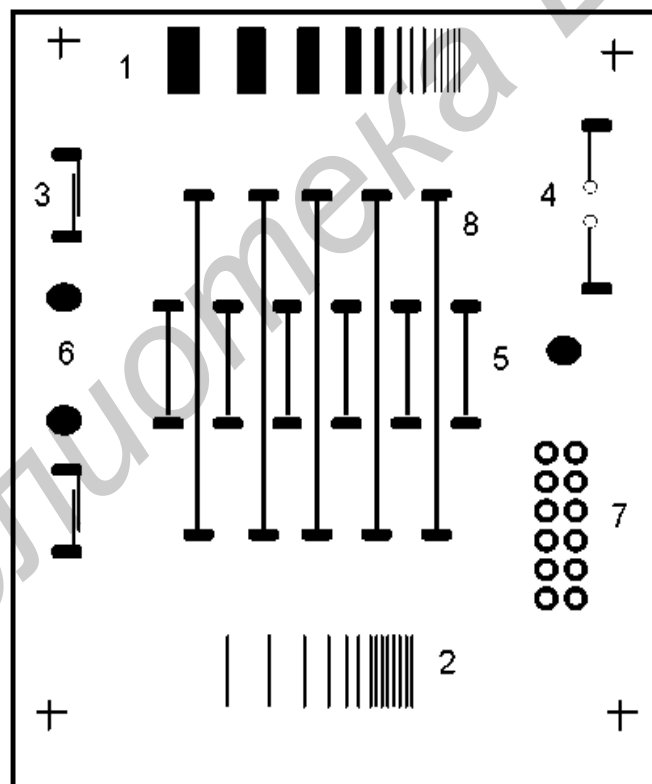


Рис. 5.2. Тестовая печатная плата с контрольными элементами для определения следующих параметров:

- 1 – минимальная ширина проводника; 2 – минимальное расстояние между проводниками;
- 3 – сопротивление изоляции поверхностное; 4 – сопротивление изоляции объемное;
- 5 – токонесущая способность проводников; 6 – прочность сцепления с основанием;
- 7 – качество металлизации, количество перепаяек; 8 – удельное электрическое сопротивление

19. После остывания платы снять вторую защитную пленку с фоторезиста.

20. Проявить фоторезист. Для этого небольшое количество проявителя (50–100 мл) налить в ванночку, опустить в ванночку плату и легким протиранием смоченной в ванночке салфеткой всей поверхности фоторезиста проявить его.

***Проявление производить в вытяжном шкафу. Отработанный раствор слить.***

21. Произвести необходимые измерения с помощью микроскопа МБС-2.

22. Протравить пробельные места медной фольги в растворе треххлористого железа. Для этого налить в керамическую ванночку травильный раствор. Поместить плату в раствор так, чтобы она была полностью закрыта раствором; включить плитку и нагреть раствор до 60 °С.

23. После травления слить раствор обратно в сосуд, вымыть ванночку, промыть плату в проточной воде.

24. Снять фоторезист. Для этого салфеткой, смоченной в ацетоне, протирать плату до полного снятия фоторезиста.

25. Промыть и высушить плату.

26. Включить установку контроля печатных плат КПП-1:

– сетевой переключатель перевести в положение 1 и прогреть установку в течение 3–5 мин;

– закрепить исследуемую плату держателями;

– после появления проводников на экране дисплея настроить четкость изображения, передвигая видеокамеру с помощью регулировочного винта;

– передвигая исследуемую плату по вертикальной и горизонтальным осям, определить качество проводников на плате (целостность, отслоение и подтравливание), а также измерить геометрические размеры проводников; выключить установку, переведя переключатель в позицию 0.

27. Произвести измерения минимальной ширины проводника 1, минимального расстояния между проводниками 2 и диаметра контактной площадки 6 с помощью микроскопа МБС-2. Измерения производить на фотошаблоне и изготавливаемой плате после процессов экспонирования и травления, полученные данные занести в табл. 5.1.

28. Измерить сопротивление изоляции между проводниками 3 и 4. Для этого собрать схему (рис. 5.3); установить измерительные щупы на контактные площадки исследуемых проводников; включить прибор Е7-14, для чего сетевой переключатель перевести в положение «Вкл.»; после установки прибора в рабочий режим нажать на его передней панели кнопки: «R», «Усреднение 10» и автоматический предел измерения; запустить прибор нажатием кнопки «Запуск» в автоматическом либо ручном режиме; полученные значения сопротивления занести в табл. 5.2.

Параметры печатных проводников на различных стадиях

Операции	Минимальная ширина проводника, мм	Минимальные промежутки, мм	Диаметр контактной площадки, мм	Причины отклонений от номинальных значений
Фотонегатив				
Получение защитного рисунка				
Травление				
Химическая металлизация				
Гальваническая металлизация				

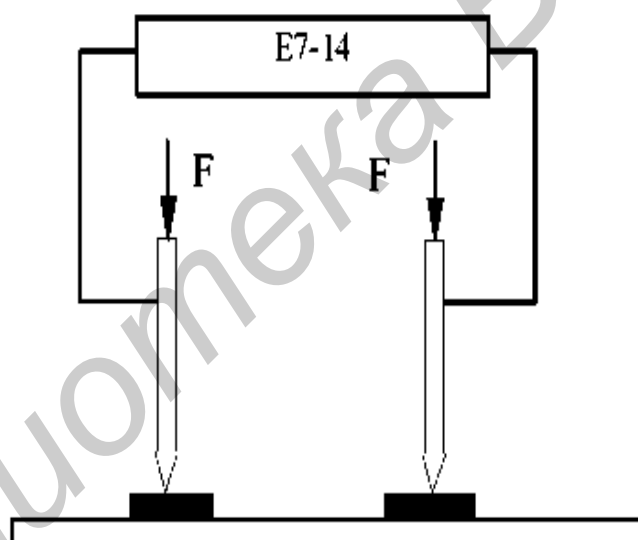


Рис. 5.3. Схема измерения сопротивления изоляции между проводниками

29. Определить удельное электрическое сопротивление проводников.

Для этого:

- собрать схему измерения падения потенциала на проводнике (рис. 5.4);
- включить вольтметр путем перевода сетевого переключателя в положение «Вкл.»;
- на лицевой панели вольтметра нажать кнопки «АВП», «U» и «T<sub>0</sub>»;
- измерительный щуп установить на контактные площадки проводника 8 наибольшей ширины (см. рис. 5.4);

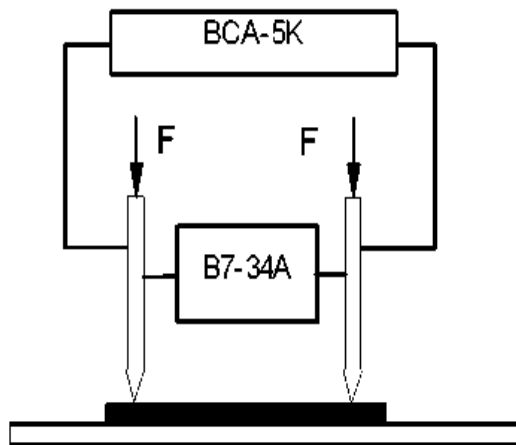


Рис. 5.4. Схема измерения падения напряжения на проводнике

- вывести ручку регулировки напряжения источника тока ВСА-5К в крайнее левое положение и включить его ручкой «Режим работы» в положение 1;
- вращая ручку регулировки напряжения вправо, выставить ток 5 А;
- измерить величину падения напряжения на проводнике с помощью вольтметра В7-34А;
- выключить выпрямитель и переставить измерительные щупы на контактные площадки следующего проводника.

Повторить измерения для оставшихся проводников. В процессе измерений следить, чтобы на передней панели вольтметра была включена кнопка «U»;

- рассчитать удельное объемное электрическое сопротивление проводников:

$$\rho_v = R \cdot S / l, \quad (5.3)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление, рассчитанное по закону Ома;

$S$  – площадь сечения проводника;

$l$  – длина проводника.

30. Определить токнесущую способность проводников  $J_{\text{доп}}$ . Для этого:

- из схемы (см. рис. 5.4) исключить вольтметр;
- измерительные щупы установить на контактные площадки проводника 5 с наибольшей шириной (см. рис. 5.4);
- вывести ручку регулировки напряжения в крайнее левое положение;
- включить выпрямитель ручкой «Режим работы» в положение 1;
- поворачивая ручку регулировки напряжения вправо, заметить на амперметре значение тока, при котором произойдет выгорание проводника;
- вывести ручку регулировки напряжения в крайнее левое положение;

– выключить выпрямитель и переставить измерительные штанги приспособления на контактные площадки следующего проводника. Рассчитать токонесущую способность  $J_{доп}$ ;

– повторить измерения для оставшихся проводников и полученные данные занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Характеристики элементов печатной платы

Исследуемые параметры	Ширина проводника b, мм					Примечание
1. Удельное объемное сопротивление, Ом·м						
2. Токонесущая способность $J_{доп}$ , А/мм <sup>2</sup>						
3. Сопротивление изоляции, МОм						
4. Прочность сцепления с основанием, Па						
5. Количество перепаек						

31. Определить количество перепаек. Для этого:

– включить тумблер «Сеть» на источнике питания паяльника;  
 – после нагрева паяльника залудить несколько контактных площадок 7 и, имитируя процесс пайки, определить количество перепаек до отслоения контактной площадки от основания.

32. Определить усилие отрыва. Для этого:

– залудить контактную площадку 6 и припаять к ней специальное приспособление;  
 – с помощью разрывного приспособления оторвать контактную площадку от основания, зафиксировав при этом величину усилия отрыва. Рассчитать прочность сцепления контактной площадки с основанием.

33. Убрать расходные материалы со столика в вытяжном шкафу, вымыть ванночки, аккуратно составить сосуды с химреактивами. Сдать рабочие места, инструмент и оставшиеся материалы дежурному.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема исследуемого в работе технологического процесса с эскизами по операциям.



3. Чертеж тестовой печатной платы.
4. Результаты исследований (табл. 5.1, 5.2).
5. Расчеты  $\rho_v$ ,  $J_{\text{доп}}$  прочности сцепления.
6. Графики зависимостей  $R = f(b)$ ;  $J_{\text{доп}} = f(b)$ .
7. Выводы, содержащие анализ экспериментальных данных.

### Контрольные вопросы

1. Преимущества печатного монтажа.
2. Требования к печатным платам.
3. Материалы оснований для печатных плат.
4. Методы формирования рисунка.
5. Какие существуют методы изготовления односторонних плат?
6. Чем различаются негативный и позитивный комбинированные методы?
7. Какие фоторезисты используются в производстве печатных плат?
8. Методы контроля параметров печатных проводников.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства : учебник / под общ. ред. А. П. Достанко. – Минск : Выш. шк., 2002. – 415 с.
2. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. О. Сорокин. – М. : Лань, 2006. – 368 с.
3. Баканов, Г. Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств / Г. Ф. Баканов, С. С. Соколов. – М. : ИЦ «Академия», 2007. – 352 с.
4. Печатные платы : справочник. В 2 книгах / под ред. К. Кумбза. – М. : Техносфера, 2011. – 879 с.
5. Медведев, А. М. Технология производства печатных плат / А. М. Медведев. – М. : ИЦ «Техносфера», 2005. – 360 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Структуры сплавов системы «железо – углерод»

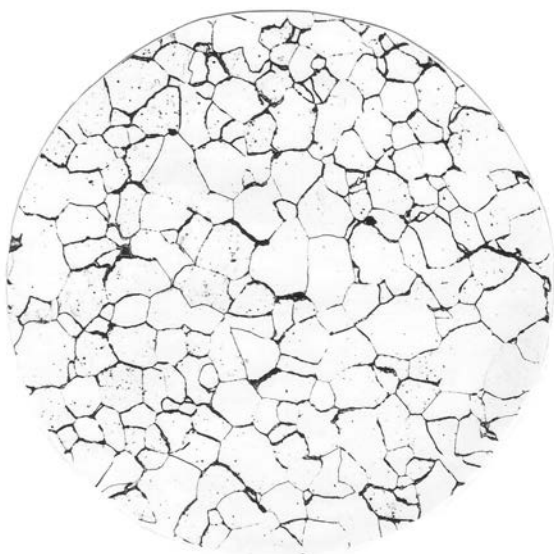


Рис. П.1. Микроструктура технического железа

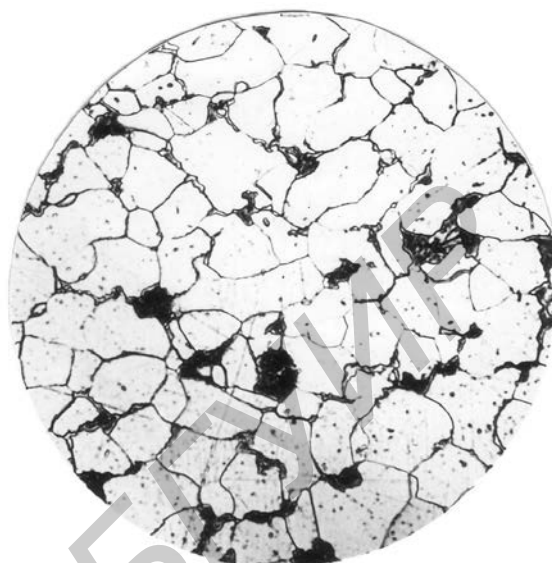


Рис. П.2. Микроструктура низкоуглеродистой стали: феррит (светлый) и перлит



Рис. П.3. Микроструктура среднеуглеродистой стали: феррит (светлый) и перлит

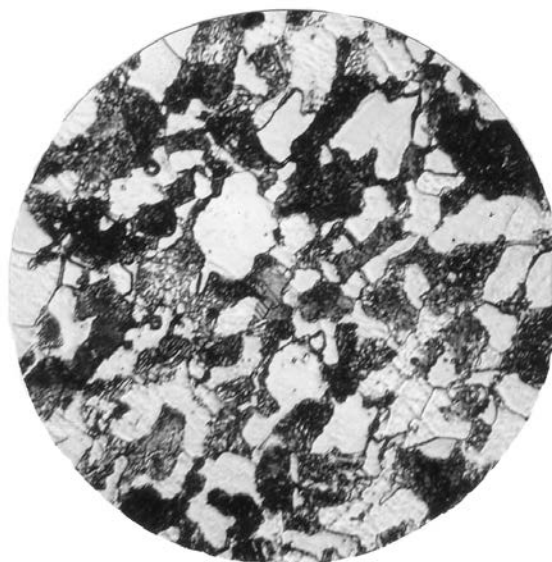


Рис. П.4. Микроструктура доэвтектоидной стали с повышенным содержанием углерода: феррит (светлый) и перлит

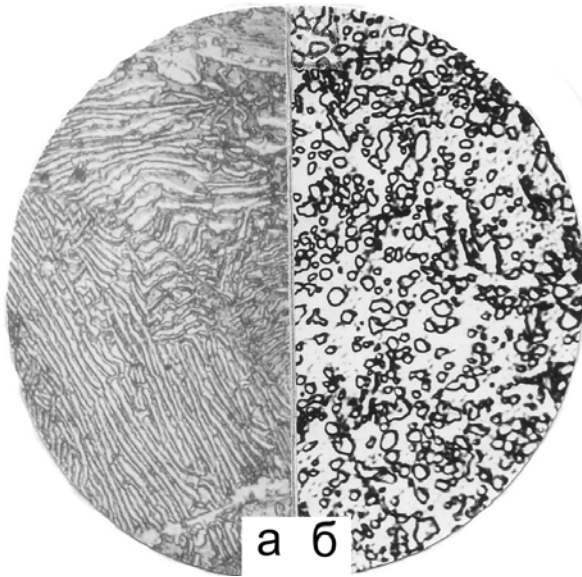


Рис. П.5. Микроструктура эвтектоидной стали: перлит пластичный (а) и перлит зернистый (б)

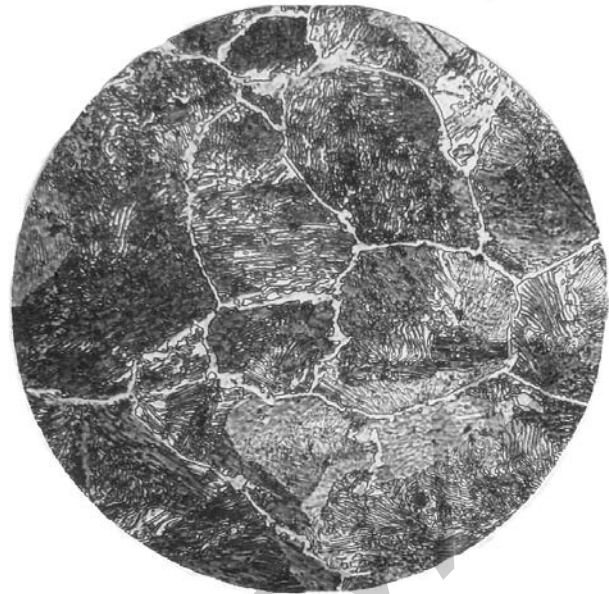


Рис. П.6. Микроструктура заэвтектоидной стали: перлит и сетка цементита (светлая) между зернами перлита

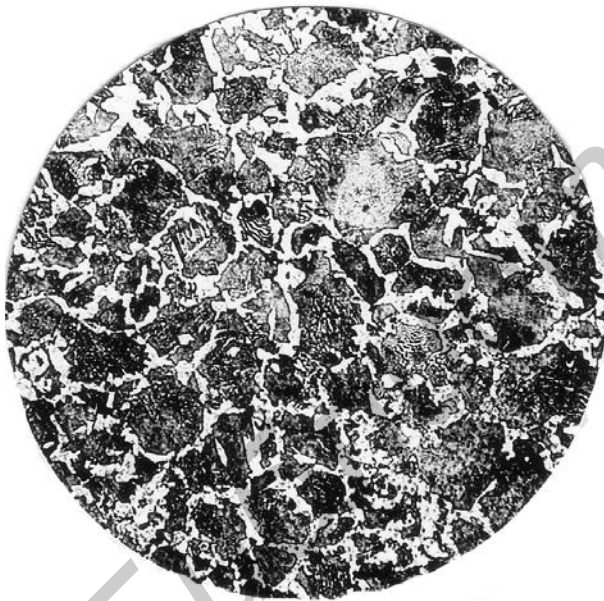


Рис. П.7. Микроструктура доэвтектоидной стали: перлит и сетчатый феррит (светлый)



Рис. П.8. Микроструктура доэвтектоидной стали: перлит и феррит пластинчатого строения

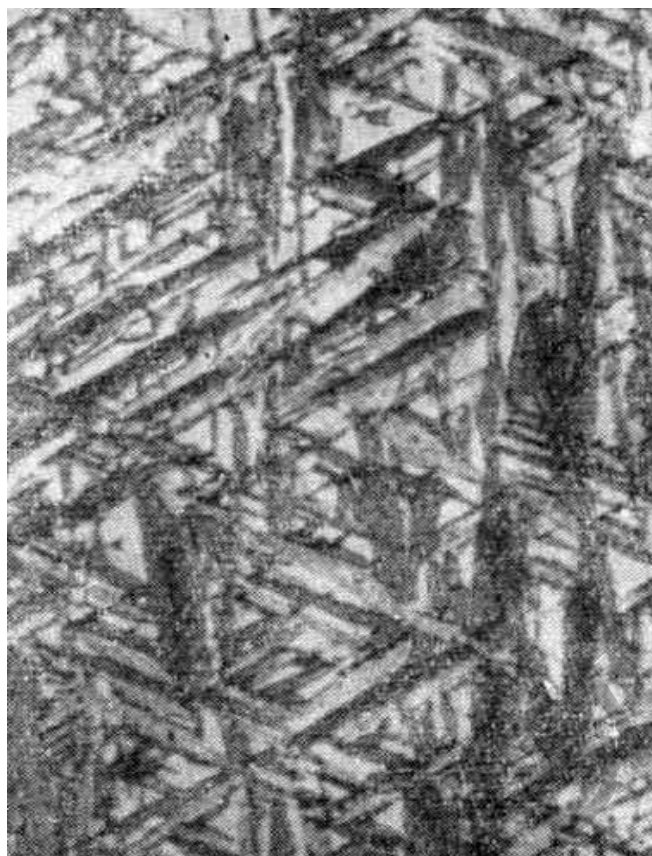


Рис. П.9. Пластины мартенсита и остаточный аустенит в закаленном сплаве  
Fe – 13,9 % Mn

*Учебное издание*

**Телеш Евгений Владимирович**  
**Холенков Вадим Федорович**  
**Шахлевич Григорий Михайлович**

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редакторы *И. В. Ничипор, Е. И. Герман*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 23.02.2015. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,0. Тираж 100 экз. Заказ 201.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6