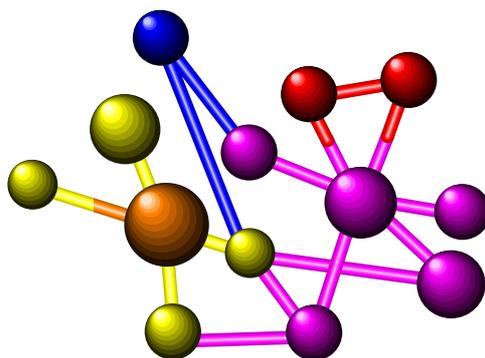


# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЭС



Издательство ТГТУ

УДК 621.396 (076.5)  
ББК з841 я 73-5

**Рецензенты:**

Кандидат технических наук, доцент  
Тамбовского государственного технического университета  
*А. М. Савельев*

Доктор физико-математических наук,  
профессор Тамбовского государственного университета  
*В. А. Федоров*

**Физико-химические основы РЭС:** Метод. пособие. / Авт.-сост.: В. П. Иванов, В. А. Пручкин, В. В. Зубец, В. Ф. Попов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. 55 с.

Методическое пособие содержит указания к выполнению лабораторных работ по изучению структуры и электрических свойств материалов электронной техники, а также влияния на них внешних факторов.

Лабораторные работы предназначены для студентов 2 курса дневного и вечернего отделений специальности 2008.

УДК 621.396 (076.5)  
ББК з841 я 73-5

© Тамбовский государственный  
технический университет ТГТУ, 2001  
Министерство образования Российской Федерации  
ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЭС**

Одобрено учебно-методическим советом по направлению 5511 (Проектирование и технология электронных средств) и учебно-методическими комиссиями по специальностям 2008 (Проектирование и технология РЭС) и 2205 (Проектирование и технология ЭВС) в качестве методического пособия для студентов, обучающихся по направлению 5511 и специальностям 2008 и 2205

Издательство ТГТУ  
Тамбов 2001

Учебное издание

# **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЭС**

Методическое пособие

Авторы-составители:

ИВАНОВ Владимир Петрович  
ПРУЧКИН Владимир Аркадьевич  
ЗУБЕЦ Виктор Васильевич  
ПОПОВ Владимир Федорович

Редактор Т. М. Федченко  
Компьютерное макетирование И. В. Евсеевой

ЛР № 020851 от 13.01.99 г. Плр № 020079 от 28.04.97 г.

Подписано к печати 24.12.2001.

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Объем: 3,25 усл. печ. л.; 2,95 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 877<sup>М</sup>.

Издательско-полиграфический центр ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

При выполнении лабораторных работ **необходимо** оформить отчет, содержащий обязательные пункты:

- 1 Название и цель работы
- 2 Материалы и приборы
- 3 Методика проведения работы
- 4 Результаты измерения, их обработка и наглядное представление
- 5 Выводы

Название и цель работы соответствуют тем, что указаны в описании лабораторных работ.

Материалы и приборы следует описать более подробно, чем это сделано в лабораторных работах, т.к. конкретные виды приборов и материалов могут изменяться. Пункт "Методика проведения работы" должен содержать краткое описание метода, который используется для изучения того или иного явления, схему установки и порядок проведения работы.

**Результаты измерений являются первичными данными и представляют особую ценность. Следует твердо запомнить, что первичные данные не должны исправляться, их необходимо фиксировать так, как они есть, потому что не всегда можно воспроизвести условия эксперимента заново. Если возникли сомнения в правильности эксперимента, его следует повторить и получить новые данные, но не исправлять старые результаты.** Протокол измерений должен быть в отчете.

Обработка результатов измерений может быть разнообразной в зависимости от цели работы. Существуют стандартные методы анализа результатов наблюдений [1]. Напомним некоторые правила.

- Расчет выборочного среднего проводится по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} x_i,$$

где  $\bar{x}$  – выборочное среднее,  $x_i$  – измеряемая величина,  $n$  – число измерений.

- Выражение для выборочной дисперсии среднего случайной величины имеет вид

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}.$$

- Доверительный интервал случайной величины будет иметь вид

$$[\bar{x} + \Delta; \bar{x} - \Delta] = \bar{x} \pm \Delta = \bar{x} \pm t s_{\bar{x}}.$$

где  $S_{\bar{x}}$  – среднеквадратичное отклонение среднего случайной величины;  $t$  – критерий Стьюдента для определенного уровня значимости  $p$  и числа степеней свободы  $k = n - 1$  (для  $p = 0,95$  и  $k = 2$ ,  $t = 2,96$ ). Доверительный интервал указывает на то, что с вероятностью  $p$  медиана случайной величины войдет в него.

Иногда возникают сомнения в отдельном измерении. Если оно не попадет в интервал  $[\bar{x} + \Delta; \bar{x} - \Delta]$ , то это – "выброс". Его следует исключить из выборки и повторить расчет для  $\bar{x}$  и  $S_{\bar{x}}$ .

После первичной обработки результатов обычно строят графические изображения зависимостей. Здесь необходимо соблюдать определенную последовательность действий:

- взять выборку экспериментальных данных  $y_i = f(x_i)$ , где  $i = 1, \dots, n$  ( $n$  – количество измерений);
- определить размах значений  $[y_{\max}; y_{\min}]$ ,  $[x_{\max}; x_{\min}]$ . Округляя эти значения до целых чисел, определить размах координат  $[Y_{\max}; Y_{\min}]$  и  $[X_{\max}; X_{\min}]$ ;
- выбрать масштаб по осям  $X$  и  $Y$

$$M_Y = (Y_{\max} - Y_{\min}) / m_Y; \quad M_X = (X_{\max} - X_{\min}) / m_X,$$

где  $m_Y, m_X$  – количество интервалов на осях обычно равно 4 – 6. Для удобства масштаб  $M_Y$  и  $M_X$  выбирается кратным 5, 10 ... делениям миллиметровой бумаги или 2, 4 ... клеточкам бумаги. Размеры графика обычно выбирают – 120 × 120 или 150 × 120 мм;

- построить оси координат на графике и указать на осях единицы измерений (например,  $Y$ , мВ;  $X$ , кг).

Если все величины  $y_i$  или  $x_i$  определяются числом типа  $A \cdot 10^m$ , то множитель  $10^m$  можно вынести на ось координат (пример,  $Y, 10^{-3}$  Ом). При этом каждое значение по оси  $Y$  умножается на  $10^{-3}$ . Если на оси обозначено  $[Y \cdot 10^{-3}, \text{Ом}]$ , каждое значение величины умножается на  $10^3$ ;

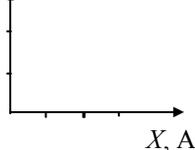
– после построения осей координат нанести на график экспериментальные точки  $y_i = f(x_i)$ . В случае, когда значения  $x_i$  определяются с точностью много большей чем  $y_i$  (пример, они заданы – вес гирек) и для каждого измерено несколько значений  $y_i$  ( $j = 3$ ), то для построения зависимости  $y = f(x)$  следует для каждого  $x_i$  посчитать среднее значение

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=3} y_{ij}}{3}$$

среднее квадратичное отклонение  $S_{\bar{y}}$ , доверительные интервалы и нанести на график эти значения для каждого  $x_i$ .

Линию на график (рис. 1) наносят так, что она  $Y$ , в  $X$  на:

- проходить через отрезки, характеризующие разброс значений вокруг среднего (доверительные интервалы);



– быть наиболее простой (если можно провести прямую линию, то проводят прямую, а не ломанную или кривую).

Если в работах требуется найти коэффициент линейной зависимости  $y = ax + b$ , где  $y$  – функция,  $x$  – аргумент,  $a$  и  $b$  – искомые коэффициенты, то в этом случае желательно применять метод наименьших квадратов, для чего необходимо выбрать на графике линейный участок и для него рассчитать коэффициенты по формулам:

$$a = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2},$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x}$$

где  $N$  – число обрабатываемых точек,  $i$  – номер точки.

## Лабораторная работа № 1

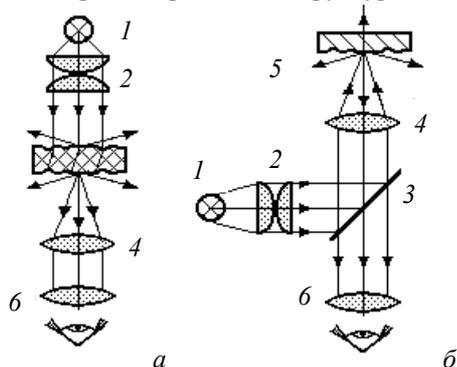
### ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

*Цель работы:* освоить приемы и методы работы на оптических микроскопах.

*Приборы и принадлежности:* микроскопы проходящего света, микроскопы отраженного света, объект-микрометр, окуляр-микрометр, образцы для наблюдения микроструктуры.

#### Методические указания

Световой микроскоп предназначен для формирования изображения структур, мелкие детали которых нельзя различить невооруженным глазом, и для измерения линейных размеров этих деталей. Для этого видимое изображение должно быть увеличенным, достаточно контрастным и, кроме того, должно обеспечивать правильное воспроизведение характерных особенностей рассматриваемых структур.



**Рис. 1.1** Схема микроскопов на просвет (а) и отражение (б):

- 1 – источник света; 2 – конденсор;
- 3 – объект; 4 – объектив; 5 – окуляр;
- 6 – полупрозрачное зеркало

По принципу действия микроскопы делятся на отражательные, просвечивающие и универсальные (рис. 1.1).

В микроскопе на просвет исследуемый объект, помещенный на предметный столик микроскопа, освещается световым пучком. Свет частично рассеивается на верхней и нижней поверхностях образца, преломляется и поглощается в его теле. Различие в оптических свойствах отдельных участков объекта обуславливает разную интенсивность прошедших через него лучей. В результате – получается "теневое" изображение объекта.

В микроскопе на отражение контраст изображения формируется за счет гашения или отражения света на микронеровностях поверхности обычно непрозрачного объекта. Очевидно, что в этом случае на полированной гладкой поверхности нельзя различить детали микроструктуры. Поэтому при работе "на отражение" объект специально приготавливают с целью создания микрорельефа, связанного с его внутренним строением.

Одной из важнейших характеристик любой оптической системы, в том числе и микроскопа, является увеличение,  $M$ . В общем случае его

можно определить по формуле

$$M = M_{об} M_{ок} = \frac{l_{туб}}{F_{об} F_{ок}}, \quad (1.1)$$

где  $M_{об}$ ,  $M_{ок}$  – увеличение объектива и окуляра;  $l_{туб}$  – оптическая длина тубуса;  $F_{об}$  и  $F_{ок}$  – фокусные расстояния объектива и окуляра. Если в формировании изображения участвует еще одна линза (промежуточная), в формуле (1.1) появится новый множитель и т.д.

Следует учитывать, что оптическую длину тубуса часто не удастся измерить точно, особенно при фотографировании, и это вносит определенные погрешности в расчет увеличения по формуле (1.1). Для определения истинного масштаба изображения используют специальные тарированные шкалы – объект-микрометры.

Согласно (1.1) как будто имеется возможность неограниченного повышения масштаба увеличения в световом микроскопе. Однако рост масштаба увеличения, начиная с некоторого предельного значения, не позволяет получить четкого контрастного изображения, различить наиболее мелкие детали объекта. Это нельзя объяснить геометрической оптикой. Если же рассматривать распространение света как волновой процесс, то существование такого предела легко объяснимо.

Впервые такой волновой подход использовал ученый-оптик Эрнст Аббе, который ввел понятие разрешающей способности линзы. Ее показателем является разрешаемое расстояние  $d_p$  – наименьшее расстояние между двумя точками объекта, при котором они воспринимаются раздельно, не сливаясь в одно пятно. По формуле Аббе

$$d_p = k\lambda / A, \quad (1.2)$$

где  $k = 0,6 \dots 0,8$  – постоянная (качество оптики);  $\lambda$  – длина волны излучения, используемого для освещения объекта;  $A$  – числовая апертура объекта,  $A = n \sin \theta$ ; где  $n$  – коэффициент преломления;  $\theta$  – апертурный угол, равный половине угла, вершина которого лежит на объекте, а основание опирается на диаметр объектива. Фокусное расстояние (или увеличение) и числовая апертура обычно указаны на объективе. Чем меньше  $d_p$ , тем больше (лучше) разрешающая способность. Из выражения (1.2) следует, что имеются только два пути уменьшения разрешаемого расстояния: либо увеличить числовую апертуру, либо уменьшить длину волны используемого света.

В световом микроскопе разрешаемое расстояние обычно не менее 200 мкм, т.к. наименьшая длина волны видимого света составляет примерно  $\lambda = 400$  нм и наибольшая числовая апертура достигает примерно 1,4. В действительности оно оказывается еще большим из-за аббераций второго порядка (хроматическая и сферическая абберации, астигматизм, дисторсия и кома). В поисках излучения с меньшей длиной волны необходимо выйти за пределы электромагнитного спектра и вступить в область частиц (электронная микроскопия).

### Порядок выполнения работы

1 С помощью преподавателя или лаборанта ознакомиться с устройством отражающего и просвечивающего микроскопов.

**Внимание! При работе с микроскопом очки следует снять.**

Для настройки микроскопа по зрению оператора следует включить его освещение и, вращая глазную линзу окуляра, получить резкое изображение окулярной шкалы.

Затем рукоятками грубой и тонкой настройки сфокусировать изображение образца, установленного на предметном столе микроскопа.

2 Зарисовать участок образца, указанный преподавателем и измерить линейные размеры одного из его фрагментов с помощью шкалы окуляра микроскопа.

*Применение окуляра с линейной шкалой:*

- повернуть окуляр вокруг его оптической оси так, чтобы его шкала стала параллельно измеряемому фрагменту;
- подсчитать число делений шкалы, укладывающихся на выбранном фрагменте.

*Применение винтового окуляр-микрометра ВОМ*

В поле зрения ВОМ видна шкала 0 – 8, относительно которой перемещается перекрестие и связанный с ним двойной визирный штрих. Одно деление этой шкалы соответствует ста делениям (полному обороту) лимба барабанчика.

– С помощью микрометрических винтов координатного перемещения предметного столика, наблюдая в окуляр, подвести перекрестие окуляра к какому-нибудь краю детали микроструктуры (рис. 1.2, а);

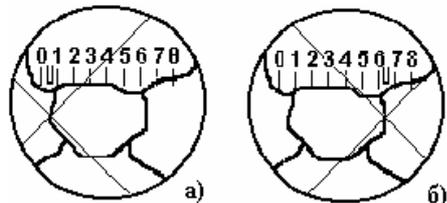


Рис. 1.2 Измерения линейных размеров участка микроструктуры с помощью винтового окуляр-микрометра

– записать показания окулярной шкалы и лимба барабана ( $n_1$ ), цифра слева от двойного штриха показывает сотни делений барабана;

– подвести перекрестие окуляра вращением барабанчика к противоположному краю измеряемого участка (рис. 1.2, б) и снять показания шкалы и лимба ( $n_2$ );

– найти разность показаний  $n = n_2 - n_1$ .

3 Определить цену деления шкалы окуляра, пользуясь следующими указаниями:

– объект-микрометр (ОМ) поместить на предметный столик микроскопа вместо объекта и вращением ручек грубой и тонкой настройки получить резкое изображение его шкалы;

– совместить изображение шкалы ОМ с изображением шкалы окуляра (рис. 1.3), что достигается перемещением предметного столика микроскопа и поворотом всего окуляра в его тубусе;

– после совмещения шкал подсчитать число делений ОМ, укладывающихся в некоторое число делений шкалы окуляра при полном совпадении крайних выбранных рисок;

– цена деления окулярной шкалы показывает расстояние на объекте, соответствующее минимальному делению окуляра и определяется по формуле

$$x = \frac{m_{\text{ом}} \cdot 0,01}{n_{\text{ок}}},$$

где  $m_{\text{ом}}$  и  $n_{\text{ок}}$  – число совмещенных делений ОМ и окуляра; 0,01 – цена деления ОМ, мм.

**Внимание! Микроскоп и объект-микрометр являются точными, дорогостоящими оптическими приборами. При работе с ними запрещается прикасаться пальцами к поверхности линз, развинчивать оптику, вращать винты грубой и особенно тонкой наводки рывками, с большим усилием.**

4 Рассчитать размеры деталей объекта, умножив полученную длину (в делениях) на цену деления.

### Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Тип и марка микроскопа, обозначения на объективах и окулярах.

- 3 Порядок определения цены деления окуляра и окуляр-микрометра.
- 4 Рисунок объектов с указанием масштаба.
- 5 Указать цену деления шкалы окуляра, цену деления лимба барабанчика окуляр-микрометра, увеличение и разрешающую способность микроскопа.

### Контрольные вопросы

- 1 Характеристики микроскопа: увеличение и разрешающая способность.
- 2 Порядок определения цены деления шкалы окуляра и лимба барабанчика окуляр-микрометра.
- 3 Типы микроскопов.

[2, с. 422 – 424]

## Лабораторная работа № 2

### ИЗУЧЕНИЕ ПЬЕЗОЭФФЕКТА

*Цель работы:* изучить пьезоэффект в кристаллах кварца. Определить пьезоэлектрический модуль исследуемого кристалла.

*Приборы и принадлежности:* пьезодатчик, источник постоянного напряжения, устройство для нагружения кристалла, вольтметр.

### Методические указания

Работа пьезоэлектрических преобразователей основана на использовании пьезоэлектрического эффекта, представляющего собой способность некоторых материалов образовывать на гранях поверхности при механическом нагружении электрические заряды (прямой пьезоэффект), и механически деформироваться при приложении электрического поля (обратный пьезоэффект).

Количественно эффект оценивается пьезомодулем  $d$ , устанавливающим пропорциональность между величиной возникающего заряда  $Q$  и приложенной силой  $P$

$$Q = dp. \quad (2.1)$$

Пьезоэффект наблюдается только в веществах с гетерополярной связью (ионных или сильнополярных диэлектриках). Вторым необходимым условием является отсутствие центра симметрии в кристаллической решетке, что приводит при ее деформации к несимметричному смещению зарядов разного знака. Еще одно требование – высокое удельное электросопротивление материала, затрудняющее внутреннюю компенсацию избыточных зарядов на поверхности пьезокристалла.

Основными природными пьезоматериалами являются кварц и турмалин.

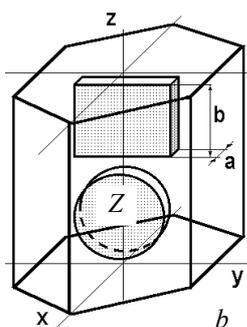


Рис. 2.1 Ориентация врезки кварцевой пластины

Для получения наибольшего пьезомодуля кварцевая шайба, пластинка или диск вырезаются из монокристалла таким образом, чтобы наибольшая плоскость была перпендикулярна кристаллографической оси  $X$  (рис. 2.1).

Ось  $X$  называют электрической (или пьезоэлектрической) осью. Обычно у вырезанной прямоугольной пластинки ребро  $a$  параллельно оси  $X$ ; ребро  $b$  – оптической оси  $Z$ , а ребро  $l$  – третьей координатной оси  $Y$ , называемой механической осью. При нагружении пластины силой  $P_x$  в направлении оси  $X$  (рис. 2.1 и 2.2) на ее грани образуется заряд

$$Q_{\text{пр}} = d_{\parallel} P_x. \quad (2.2)$$

Следует отметить, что этот заряд не зависит от геометрических размеров пластины (продольный пьезоэффект).

Если подвергнуть пластину сжатию в направлении оси  $Y$ , то на тех же гранях вновь появляется заряд, но только противоположного знака. При поперечном пьезоэффекте заряд зависит от соотношения  $l/a$

$$Q_{\text{поп}} = -d_{\perp} \frac{l}{a} P_e. \quad (2.3)$$

Это можно сделать путем соответствующего выбора отношения изменить чувствительность преобразователя, предел которой ограничивается механической прочностью пластинки. При механическом воздействии на пластинку в направлении оси  $Z$  заряды на электродах не появляются вовсе.

При практическом использовании обычно измеряют не заряд, а напряжение  $U$ , развиваемое на емкости  $C$  образуемой обкладками пластины

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{dP}{a}. \quad (2.4)$$

## Порядок выполнения работы

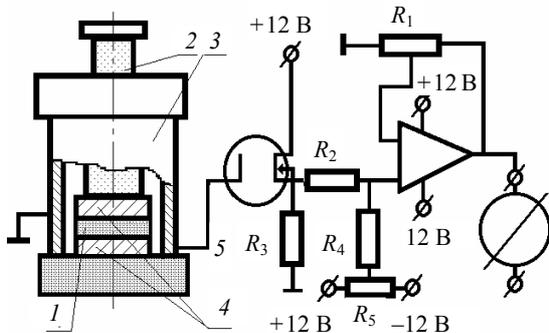


Рис. 2.3 Схема экспериментальной установки

1 Изучить и зарисовать схему экспериментальной установки, представленной на рис. 2.3.

Кристалл 1 представляет собой кварцевый диск (рис. 2.1). Для обеспечения омического контакта на плоскости диска наносят слой серебра 4. Кристалл помещен в изолирующий корпус 3, в верхнюю крышку которого вставлен нагружающий шток 2 с платформой для размещения гирь.

Таким образом, пьезодатчик представляет собой, плоский конденсатор, одна обкладка которого заземлена, а другая подключается к входу пьезоэлектрического усилителя 5. Входной каскад усилителя собран на транзисторе КП305, что позволяет

получить высокое входное сопротивление усилителя с истока транзистора. Сигнал подается на усилитель тока, выполненный на микросхеме 140УД6. С помощью подстроечного сопротивления  $R_1$  компенсируют напряжение смещения на выходе операционного усилителя. При отсутствии входного сигнала  $U_{\text{вых}}$  должно быть равно нулю. С помощью  $R_2$  регулируют коэффициент усиления операционного усилителя так, чтобы

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}.$$

2 Включить питающие стабилизаторы напряжения регуляторами на панели приборов.

3 Построить график зависимости

$$U_{\text{вых}} = f(P), \quad (2.5)$$

где  $U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение датчика;  $P$  – нагружающее усилие.

При работе с экспериментальной установкой следует придерживаться следующих рекомендаций:

- груз опускать на платформу плавно во избежание поломки и порчи кристалла;
- не следует помещать на платформу весь комплект гирь сразу, а увеличивать нагрузку последовательно;
- выходное напряжение следует отмечать по отклонению стрелки милливольтметра после приложения нагрузки;
- после использования всего комплекта гирь снять нагрузку и выключить питание;
- через 5 – 7 минут повторить измерения;
- результаты измерений записать.

4 По полученным данным, пользуясь формулой (2.4), методом наименьших квадратов, определить значение пьезомодуля.

Емкость  $C$  рассчитать по формуле

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{F}{t}, \quad (2.6)$$

где  $\epsilon = 4,5$  – относительная диэлектрическая постоянная кварца,  $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная,  $F$  и  $t$  – площадь и толщина пьезодатчика.

5 Сравнить полученное экспериментально значение пьезомодуля с табличным и определить вид пьезоэффекта (поперечный или продольный).

## Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Типы и марки приборов, описание пьезоматериала, схема экспериментальной установки.
- 3 Методика определения пьезоэлектрического модуля.
- 4 Таблица экспериментальных данных.
- 5 График зависимости  $U_{\text{вых}} = f(P)$ .
- 6 Расчет значения пьезомодуля.
- 7 Определение типа пьезоэффекта.

## Контрольные вопросы

- 1 Сущность пьезоэффекта.
- 2 Анизотропия кристаллов, полярные направления и их связь с пьезоэффектом.
- 3 Индексы Миллера плоскостей и направлений.
- 4 Применение пьезоэффекта в технике.
- 5 Объяснить механизм возникновения пьезоэффекта.
- 6 В каких точечных группах возможно возникновение пьезоэффекта, показать на кристалле кварца элементы симметрии и полярные направления.

[3, с. 237 – 255]

## ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ТРАВЛЕНИЯ

**Цель работы:** ознакомиться с типами дефектов в реальных кристаллах. Научиться выявлять дислокации, границы зерен, определять плотность дислокаций в кристаллах и разориентировку субграниц.

**Приборы и принадлежности:** оптический микроскоп, реактивы для выявления дислокаций методом травления, монокристаллы LiF или NaCl, объект-микроскоп.

### Методические указания

Реальные кристаллы содержат большое количество нарушений в упорядоченном расположении атомов. По их величине (в сравнении с размером атома) дефекты разделяют на точечные, линейные, плоские (поверхностные) и объемные.

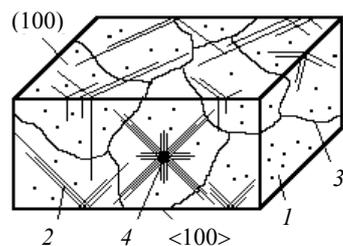
Точечные дефекты (межузельные атомы, вакансии, атомы замещения и внедрения) малы по своим размерам и не видны даже в самом мощном оптическом микроскопе.

Дислокации (линейные несовершенства) так же соизмеримы с размерами атома в двух направлениях, но в третьем – могут простираться через весь кристалл.

Примерами плоских дефектов являются границы зерен и поверхность кристалла. В поликристаллах при затвердевании образующиеся зародыши ориентированы в пространстве случайно. Поэтому когда кристаллизация заканчивается, кристаллиты срастаются случайным образом с образованием дефектов – границ зерен. На поверхности кристалла (даже самого идеального) нарушается его важнейшее свойство – трансляционная симметрия, рвутся межатомные связи, возникает поверхностное натяжение.

Размеры объемных дефектов велики во всех трех направлениях – это поры, трещины и раковины в кристаллах.

Для выявления дислокаций методом травления образец помещают в раствор, который растворяет (травит) его поверхность. При этом скорость растворения материала вблизи точки выхода дислокаций на поверхность больше средней скорости растворения поверхности. Это различие возникает в результате следующих свойств дислокаций: искажения решетки и существования поля деформаций; особенности геометрии плоскостей, связанных с винтовой дислокацией; повышенной концентрации примесных атомов на дислокации [4]. Поэтому в местах выхода дислокаций на поверхность образуются ямки травления.



**Рис. 3.1 Структура монокристалла после травления**

На рис. 3.1 видны хаотично расположенные дислокации роста 1. Ямки травления дислокаций деформации выстраиваются по прямым линиям 2 полос скольжения. Извилистые кривые линии малоугловых границ 3 из плотно расположенных или слившихся в одну канавку ямок травления разбивают монокристалл на множество субзерен. Такую структуру имеет каждое отдельное зерно реального поликристаллического материала.

### Порядок выполнения работы

1 Отколоть образец от монокристалла LiF или NaCl, пользуясь тем, что эти вещества легко разрушаются по плоскостям спайности  $\{100\}$ . На свежую поверхность скола нанести иглой два-три легких укола. После этого опустить кристалл в травитель и выдержать там (состав реактива и время травления – по указанию преподавателя). Затем промыть в растворителе и высушить фильтровальной бумагой.

2 Изучить дислокационную структуру кристалла в микроскопе с увеличением 200–400<sup>x</sup>.

3 Зарисовать форму фигуры травления дислокации и указать на эскизе направления  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 110 \rangle$  с учетом того, что ребра (края) монокристалла имеют ориентировку  $\langle 100 \rangle$ .

4 Определить плотность дислокации роста  $\rho_d$  (см<sup>-2</sup>)

$$\rho_d = N / F, \quad (3.1)$$

где  $N$  – число выходов дислокаций на площади поверхности  $F$  (см<sup>2</sup>).

5 Найти дислокационную розетку от укола иглы 4 (рис. 3.1) и определить плотность дислокаций в этой деформированной области и сравнить с ранее определенным значением.

6 Найти и зарисовать тройной стык субграниц 3 (рис. 3.1) и определить угол разориентировки соседних зерен  $\theta$ .

Для малоугловой границы наклона справедлива формула Рида:

$$\theta = b / D,$$

где  $D$  – расстояние между дислокациями в субгранице;  $b$  – вектор Бюргерса краевой дислокации (для NaCl  $b = 3,9 \cdot 10^{-10}$  м, для LiF  $b = 2,83 \cdot 10^{-10}$  м).

### Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Тип микроскопа, его характеристика, тип кристалла, состав травителя.
- 3 Методика определения плотности дислокаций и угла разориентировки субзерен.
- 4 Рисунки скоплений дислокаций и субграниц.
- 5 Результаты измерений и вывод о влиянии деформации на плотность дислокаций.

### Контрольные вопросы

- 1 Классификация дефектов в кристаллах.
  - 2 Что такое дислокация? Чем отличается винтовая дислокация от краевой? Что такое смешанная дислокация?
  - 3 Контур и вектор Бюргерса. Какую симметрию кристалла нарушают дислокации?
  - 4 Как влияет плотность дислокаций на прочность и пластичность кристаллов?
  - 5 Классификация границ зерен.
  - 6 Дислокационная модель границы субзерен.
- [4, с. 60 – 93]; [3, с. 297 – 336]

## Лабораторная работа № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ В КРИСТАЛЛАХ

*Цель работы:* ознакомиться с методикой определения скорости движения дислокаций, разработанной Д. Гилманом. Определить экспериментально скорость движения дислокаций в кристалле LiF.

*Приборы и принадлежности:* микроскоп, кристалл, реактив для выявления дислокаций.

#### Методические указания

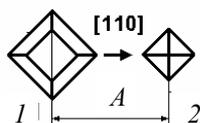
Для определения скорости движения дислокаций необходимо воспользоваться методом двойного травления дислокаций, разработанным Д. Гилманом и В. Джонстоном.

Сущность метода заключается в следующем. Поверхность кристалла, содержащего свежие дислокации, подвергают химическому травлению, после которого на поверхности наблюдаются остrokонечные ямки травления, соответствующие положению дислокаций.

Затем кристалл нагружают и проводят повторное травление поверхности. Дислокации при нагружении кристалла начинают перемещаться и уходить со своих старых мест, отмеченных ямками травления. Новые положения дислокаций при повторном травлении будут отмечены вновь остrokонечными ямками. Старые ямки травления также будут растравливаться, но только в ширину и станут плоскодонными (рис. 4.1).

Зная плоскости скольжения кристалла и направления сдвига в них, можно найти две ямки травления – остrokонечную и плоскодонную, соответствующие положению одной дислокации до и после нагружения кристалла. (Для кристаллов LiF плоскости скольжения  $\{110\}$ , направления сдвига  $\langle 110 \rangle$ ).

Для исследования динамических свойств дислокаций необходимы вновь образованные (свежие) дислокации, на которых не успели осесть примесные атомы. Обычно свежие дислокации получают локальным деформированием поверхности кристалла (уколоть поверхность индентором ПМТ-3 или легко царапнуть кристалл иглой). Движение дислокаций можно вызвать, сбросив кристалл с полусферическим наконечником на стальную наковальню с высоты 0,4 – 0,5 м. Время удара – время действия импульса напряжения определяется из соотношения



**Рис. 4.1** Ямки травления, соответствующие старому (1) и новому (2) положению дислокации

$$\tau = 2l\sqrt{\gamma/E}, \quad (4.1)$$

где  $l$  – длина кристалла с наконечником;  $\gamma = 2,295 \cdot 10^{-3}$  кг/см<sup>3</sup> – плотность кристаллов фтористого лития,  $E = 2,41 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup> – модуль упругости. Так как размер наконечника мал по сравнению с общим размером, то можно считать его выполненным из LiF. Это допущение вносит некоторую погрешность в определение скорости движения дислокаций.

#### Порядок выполнения работы

- 1 Из крупных монокристаллов выколоть по плоскостям спайности  $\{100\}$  рабочие образцы. На одной из боковых поверхностей образца ввести свежие дислокации несколькими легкими уколами кристалла стальной иглой.
- 2 Провести первое травление поверхности в 5%-ом водном растворе хлорного железа FeCl<sub>3</sub>, окуная кристалл в бюкс с раствором на 25 – 30 с. После этого кристалл исследовать под микроскопом и удостовериться, что дислокационная структура выявлена достаточно качественно.
- 3 Нагрузить кристалл ударным импульсом. Для этого к одному из торцов кристалла аккуратно приклеить металлическую полусферу и сбросить кристалл наконечником вниз с высоты 0,4 – 0,5 м на стальную наковальню.
- 4 После нагружения провести повторное травление кристалла, исследовать поверхность под микроскопом и зарисовать отмеченные участки.
- 5 Найти на поверхности кристалла несколько сместившихся дислокаций и определить пути их пробега  $l$ . По формуле (4.1) определить время действия нагружающего импульса и рассчитать скорость.

#### Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Тип микроскопа, его характеристика, использованные кристаллы, состав травителя.
- 3 Методика определения скорости движения дислокаций.
- 4 Рисунок дислокационных скоплений со старыми и новыми положениями дислокаций.

5 Результат измерений, средняя скорость движения дислокаций в кристалле при комнатной температуре.

### Контрольные вопросы

- 1 Какие процессы происходят в материале при пластической деформации?
- 2 Эстафетный механизм движения краевой дислокации.
- 3 Геометрия движения краевой и винтовой дислокации.
- 4 В чем сущность метода Гилмана определения скоростей движения дислокаций?
- 5 Механизм неконсервативного движения (восхождения) краевой дислокации. [4, с. 60 – 93]; [3, с. 297 – 336]

## Лабораторная работа № 5

### ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ КРИСТАЛЛОВ

*Цель работы:* освоить методику измерения микротвердости монокристаллов. Изучить влияние облучения на микротвердость кристаллов-диэлектриков.

*Приборы и принадлежности:* микротвердомер ПМТ-3, окуляр-микрометр, образцы монокристаллов с участками, облученными различными дозами.

### Методические указания

Точечные дефекты в кристалле образуются в процессе роста, пластической деформации или термообработки. Равновесная концентрация вакансий в кристалле растет с повышением температуры по экспоненциальному закону. Подвергая кристалл закалке, можно создать избыточную концентрацию вакансий в кристалле, из-за чего резко изменить свойства материала.

Особое место в физике твердого тела занимают дефекты, возникающие в кристалле под действием ионизирующего облучения или частиц высоких энергий – радиационные дефекты. Действие радиации на кристалл создает повышенную неравновесную концентрацию точечных дефектов, а также многие другие явления, из которых можно перечислить основные:

- смещение электронов и ионизация атомов, а также частиц из их положения равновесия;
- образование продуктов ядерных реакций, а также тепловых клиньев и клиньев смещения.

Все эти нарушения структуры, возникающие в результате облучения, вызывают увеличение твердости, скалывающего напряжения, упругих коэффициентов, прочности (радиационное упрочнение), окрашивание кристалла, изменение коэффициента диффузии и другие свойства.

Электропроводность в полупроводниковых кристаллах под влиянием облучения может измениться на несколько порядков из-за изменения концентрации и подвижности носителей тока. Первоначальные свойства кристалла из-за радиационных изменений можно восстановить в результате отжига при повышенной температуре, который приводит к рекомбинации вакансий и внедренных атомов.

### Порядок выполнения работы

- 1 Освоить методику работы на микротвердомере ПМТ-3, воспользовавшись инструкцией.

Твердость – это способность материала сопротивляться внедрению в него постороннего тела. При вдавливании алмазной пирамидки в кристалле происходит сдвиг (пластическая деформация) и образуется отпечаток. Мерой твердости в этом методе является площадь поверхности отпечатка. Чем легче в материале движутся дислокации, тем выше его пластичность, тем меньше твердость.

Микротвердость вычисляют по формуле

$$H_{\mu} = \frac{P}{F_{\text{отп}}} = 2 \frac{P}{a^2} \sin \frac{\alpha}{2} = 18,54 \frac{P}{a^2} \quad [\text{МН/м}^2], \quad (5.1)$$

где  $P$  – нагрузка на индентор, Н;  $\alpha = 136^{\circ}$  – угол при вершине алмазной пирамидки;  $a$  – размер диагонали отпечатка, усредненный по горизонтальной и вертикальной диагоналям (значение  $H_{\mu}$  можно определить и по таблице из инструкции к ПМТ-3).

- 2 Получить у преподавателя и измерить микротвердость кристаллов LiF, облученных потоком электронов или рентгеновскими лучами с различным временем воздействия  $\tau$  (интенсивность излучения считать постоянной).

На каждом облученном кристалле следует произвести три замера и вычислить среднее значение микротвердости и дисперсию  $S_x$  ( $p = 95\%$ ).

- 3 Полученные результаты записать в табл. 5.1 и построить график  $H_{\mu} = f(\tau)$ .

### 5.1 Результаты измерения твердости

$\tau$ , ч	Диагональ отпечатка, мкм			$H_{\mu}$ , МН/м <sup>2</sup>				
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X$	$S_x$

## Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Краткое описание микротвердомера и приемов работы с ним.
- 3 Тип кристаллов, характер их окраски после облучения.
- 4 График зависимости микротвердости от времени облучения.
- 5 Выводы о влиянии облучения на микротвердость.

### Контрольные вопросы

- 1 Геометрия и классификация точечных дефектов.
  - 2 Причины возникновения точечных дефектов.
  - 3 Влияние точечных дефектов на свойства кристаллов.
  - 4 Определение твердости кристаллов.
- [ 3, с. 288 – 297].

## Лабораторная работа № 6

### СВЯЗЬ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СО СВОЙСТВАМИ СПЛАВА

*Цель работы:* изучить зависимость электросопротивления от состава сплава.

*Приборы и принадлежности:* двойной мост постоянного тока, источник постоянного тока, образцовое сопротивление, сплавы различного состава.

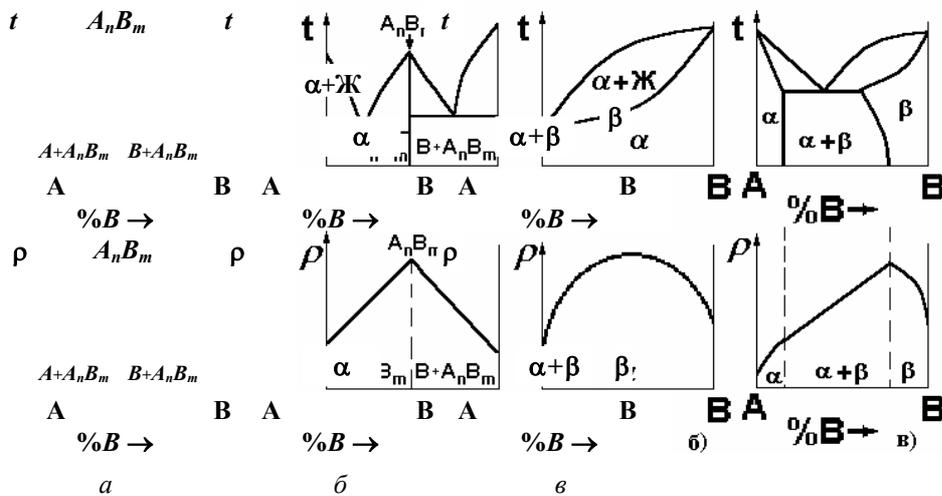
### Методические указания

Тип фазовой диаграммы и твердого сплава определяет его свойства в равновесном состоянии (рис. 6.1). Существует три основных типа твердых сплавов – твердый раствор, химическое соединение и механическая смесь.

Для твердых растворов характерна нелинейная зависимость удельного электросопротивления от химического состава.

Для физико-механической смеси оно прямо пропорционально количеству каждой фазы, а значит (по правилу отрезков) – и химсоставу.

Наличие на диаграмме химического соединения приводит к появлению перелома на линии свойства – содержание компонентов.



**Рис. 6.1** Влияние типа диаграммы состояния на удельное электросопротивление сплавов **с:** *a* – химическим соединением; *б* – неограниченной; *в* – ограниченной растворимостью

В работе предлагается исследовать зависимость удельного электросопротивления от состава сплава и сделать вывод о типе сплава. Для измерения электросопротивления используется метод двойного моста, позволяющий проводить измерения с высокой точностью.

### Порядок выполнения работы

1 Ознакомиться со схемой измерения электросопротивления методом двойного моста (рис. 6.2).

Перед началом измерения необходимо удостовериться, что ключ питания схемы разомкнут, гальванометр отключен (нажата кнопка "Шунт"), переключатель его чувствительности в положении "1", измерительные декады в нулевом положении. При этом стрелка гальванометра должна стоять на нуле.

**Внимание! Любые манипуляции со схемой, кроме процесса измерения, следует проводить при выключенном гальванометре.**

2 Закрепить образец в держателе, включить блок питания схемы, установить ток 0,5 А. Отжать кнопку "Шунт", нажать "Измерение" и, увеличивая чувствительность прибора, компенсировать разбаланс поворотом рукояток декад моста.

Чувствительность не следует повышать выше позиции "6" переключателя чувствительности. Устранив разбаланс, определить значения  $R$  и  $M_1$  по декадам прибора.

3 Перевести переключатель чувствительности в положение "1", отжать кнопку "Измерение", включить кнопку "Шунт" и разомкнуть ключ питания. Измерить штангенциркулем расстояние между потенциальными контактами. Изменить положение потенциальных контактов. Повторить измерение согласно пункту 2. После трех измерений на одном образце с разной базой между потенциальными контактами, сменить образец и повторить измерение.

Размеры поперечного сечения каждого образца измерить штангенциркулем после его демонтажа из установки.

4 Сопротивление образца рассчитать по формуле

$$R_x = 10^{-3} R_N M_1 R, [\text{Ом}], \quad (6.1)$$

где  $R_N = 10^{-3}$  Ом – образцовое сопротивление;  $R$  – показания декад;  $M_1$  – постоянная величина плеча моста.

5 Рассчитать удельное сопротивление образцов для трех расстояний между контактами

$$\rho = \frac{R_x F}{l}, \quad (6.2)$$

где  $F$  – средняя площадь поперечного сечения образца по трем измерениям;  $l$  – расстояние между потенциальными зажимами. Данные занести в табл. 6.1.

### 6.1 Результаты измерений электросопротивления сплавов

Состав, % вес.	$l_1, \text{м}$		$l_2, \text{м}$		$l_3, \text{м}$		$\rho,$ Ом·м	$S_x,$ Ом·м
	$R_1$	$\rho_1$	$R_2$	$\rho_2$	$R_3$	$\rho_3$		

6 Рассчитать средние арифметические значения удельного сопротивления и их отклонения при 95 % уровне значимости.

7 Построить график зависимости удельного сопротивления от состава. По полученной зависимости сделать вывод о типе изученных сплавов.

#### Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Описание приборов и образцов.
- 3 Методика измерения сопротивления, схема установки.
- 4 Таблица результатов измерений, график  $\rho = f(C \%)$ .
- 5 Заключение о типе исследованного сплава.

#### Контрольные вопросы

- 1 Основные закономерности формирования свойств сплавов.
- 2 Основные типы твердых сплавов.
- 3 Правила заполнения диаграмм состояния фазами и структурными составляющими.
- 4 Фазовый состав сплава. Правило отрезков.  
[6, с. 71 – 73]; [5, с. 155 – 157; 177 – 179]

Лабораторная работа № 7

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА

**Цель работы:** экспериментальное определение ширины запрещенной зоны полупроводника на основании измерений температурной зависимости электропроводности.

**Приборы и принадлежности:** электрическая печь с масляным термостатом, омметр, милливольтметр, термомпара, образец полупроводника.

#### Методические указания

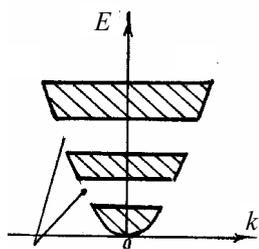
Физические свойства твердых тел можно объяснить только с помощью зонной теории, основные положения которой гласят:

- Электроны движутся в периодическом потенциальном поле кристалла.
- Энергия электрона квантуется. Распределение электронов по уровням диктуется принципом Паули;
- В периодическом потенциальном поле на электрон действуют силы.

В зонной теории твердое тело рассматривается как строго периодическая структура, в которой ионы создают электрическое поле. Задача состоит в описании поведения электронов в этом поле. Решить точно уравнение Шредингера для такой системы невозможно. В методе решения принимается, что имеется совокупность большого числа изолированных атомов, у каждого из которых электроны имеют свою систему дискретных энергетических уровней. Считается, что энергия связи электронов со "своими" атомами значительно больше, чем их кинетическая энергия перемещения в кристаллической решетке. Рассматривается, что происходит с энергетическими уровнями по мере сближения изолированных атомов и образования из них кристаллов. Связь электронов со своими атомами так сильна, что лишь валентные электроны при сближении атомов на расстояния, сравнимые с размерами атомов, переходят от одного атома к другому.

В изолированном атоме имеются дискретные уровни энергий. Считается, что они зависят от главного  $n$  и орбитального  $l$  квантовых чисел. Считается также, что энергетические уровни, соответствующие различным значениям магнитного  $m$  и спинового  $m^s$ , совпадают.

Узкий энергетический уровень валентного электрона в изолированном атоме расширяется в кристалле в широкую полосу – зону разрешенных значений энергии электронов (порядка единиц электрон-вольт). Разрешенные энергетические зоны отделены друг от друга запрещенными зонами значений энергии электронов (рис. 7.1). Разрешенная зона тем шире, чем больше энергия электрона на соответствующем уровне в изолированном атоме. Возможные значения электронов квантованы, т.е. дискретны, а общее их число конечно. В кристалле, состоящем из  $N$  атомов, уровню энергии изолированного атома соответствует зона, состоящая из  $(2l + 1)N$  дискретных уровней, на каждом из которых может находиться не более двух электронов с антипараллельными спинами. Для электронов внутренних оболочек атомов вероятность туннельного перехода электрона от одного атома к другому оказывается очень малой. Это связано с уменьшением прозрачности потенциального барьера, в результате чего частота просачивания электрона сквозь потенциальный барьер оказывается ничтожно малой.



Запрещенные зоны

Рис. 7.1 Образование энергетических

характером расположения разрешенных и запрещенных зон энергий, а также различным

заполнением зон электронами.

Заметим, что ширина разрешенных зон энергий возрастает с ростом энергии электрона в изолированном атоме, а ширина запрещенных зон при этом уменьшается. Для достаточно высоких уровней энергии электронов изолированных атомов образовавшиеся из них энергетические зоны иногда перекрывают друг друга.

В зонной теории твердого тела различия в электрических свойствах разных типов твердых тел объясняется шириной запрещенной зоны и различным заполнением разрешенных энергетических зон. Запрещенные зоны могут как разделять разрешенные, так и отсутствовать вообще.

Если разрешенные зоны перекрываются, то образуется гибридная зона. Подобно тому как в отдельном атоме электроны могут переходить с одного энергетического уровня на другой, так электроны в кристаллах могут переходить из одной разрешенной зоны в другую, а также совершать переходы внутри одной и той же зоны. Для перехода электрона из нижней разрешенной энергетической зоны в верхнюю необходима энергия, равная ширине запрещенной зоны  $E_g$ , лежащей между ними (рис. 7.2):

$$E_g = E_C - E_v,$$

где  $E_C$  – дно зоны проводимости;  $E_v$  – потолок валентной зоны.

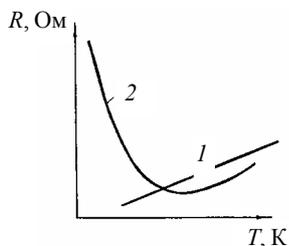
Можно показать, что под действием даже очень сильного внешнего электрического поля электроны совершают только внутризонные перемещения. Повышение температуры приводит к передаче электрону энергии достаточной для перехода в расположенную выше разрешенную зону.

По характеру заполнения энергетических зон твердые тела делятся на две группы:

1 Металлы – твердые тела, с частично заполненной валентной зоной, являющейся одновременно зоной проводимости. Металлы – проводники. Проводниками также являются вещества с гибридной зоной.

2 Полупроводники и диэлектрики – материалы с целиком заполненной валентной зоной. Выше располагаются полностью свободные от электронов зоны (рис. 7.2). Запрещенная зона отделяет зону проводимости от валентной зоны, т.е. они не перекрываются, а следовательно образование гибридной зоны у этого класса веществ невозможно. При  $T = 0$  полупроводники и диэлектрики отличаются друг от друга только шириной запрещенной зоны.

Такая энергетическая схема относится только к собственным полупроводникам, получаемым в результате высокой степени очистки.



**Рис. 7.3 Зависимость сопротивления твердых тел от температуры:** 1 – металлы; 2 – полупроводники и диэлектрики

Учитывая зависимость концентрации носителей заряда от температуры, получим

$$\sigma_i = e(n_i \mu_n + p_i \mu_p), \quad (7.1)$$

где  $n_i$  и  $p_i$  – концентрации электронов и дырок в собственном полупроводнике,  $\mu_n, \mu_p$  – их подвижности.

$$\sigma_i = \sigma_0 \exp(-E_g / 2kT), \quad (7.2)$$

где  $\sigma_0$  – константа,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны,  $k$  – постоянная Больцмана.

Логарифмируя (7.2), находим

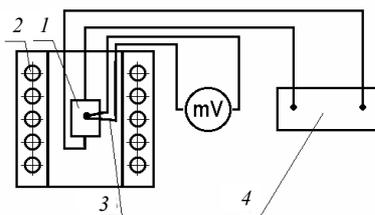
$$\ln \sigma_i = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2k} \frac{1}{T}. \quad (7.3)$$

В координатах  $\ln \sigma = f(1/T)$  – это линейная зависимость, по углу наклона которой можно определить ширину запрещенной зоны. В случае примесного полупроводника график будет иметь точку перелома, разделяющую его на области примесной и собственной проводимости, которые отличаются энергией активации (а значит и углом наклона).

#### Порядок выполнения работы

1 Установить образец полупроводника в измерительную кассету и поместить в ванну термостата (рис. 7.4).

**Рис. 7.4 Схема установки для изучения зависимости электросопротивления полупроводников от температуры:** 1 – образец полупроводника, 2 – электропечь, 3 – термопара, 4 – омметр



2 Включить омметр и милливольтметр, дать им прогреться в течение 10 – 15 мин. Провести несколько измерений электросопротивления при комнатной температуре, проверить стабильность показаний омметра.

3 Включить нагрев печи и провести измерения электросопротивления при температуре от 20 °С до 120 °С через 5 °С. Данные занести в табл. 7.1.

#### 7.1 Влияние температуры на электропроводность полупроводника

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$T, \text{К}$	$1/T, \text{К}^{-1}$	$\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$\sigma, (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	$\ln \sigma$

4 Пересчитать сопротивление в удельную электропроводность и построить график зависимости  $\ln \sigma = f(1/T)$ .

5 Методом наименьших квадратов определить ширину запрещенной зоны полупроводника. Сравнить со справочными данными. Если на экспериментальном графике выявляется перелом, произвести отдельно расчеты для температурного интервала собственной и примесной проводимости.

#### Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Тип приборов и характеристика полупроводника.
- 3 Метод измерения сопротивления, схема установки.
- 4 Таблица экспериментальных данных и график зависимости  $\ln \sigma = f(1/T)$ .
- 5 Расчет ширины запрещенной зоны.
- 6 Сравнение полученных данных со справочными.

#### Контрольные вопросы

- 1 Образование энергетических зон. Валентная, запрещенная и зона проводимости.
  - 2 Зонная структура металлов, диэлектриков и полупроводников.
  - 3 Примесные уровни в полупроводниках Доноры, акцепторы, собственные полупроводники.
  - 4 Концентрация носителей зарядов в собственном полупроводнике. Уровень Ферми.
  - 5 Концентрация носителей заряда и значение уровня Ферми в примесном полупроводнике. Три температурные области проводимости.
  - 6 Основные и неосновные, равновесные и неравновесные носители.
  - 7 Закон действующих масс.
  - 8 Сильнолегированные полупроводники.
- [8, с. 142 – 171, 190 – 193]; [19, с. 5 – 19]

## Лабораторная работа № 8

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ХОЛЛОВСКОЙ ПОДВИЖНОСТИ ОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

*Цель работы:* определение концентрации и холловской подвижности основных носителей заряда в полупроводниках на основании измерений эффекта Холла.

*Приборы и принадлежности:* электромагнит, источник тока, амперметр, потенциометр, нуль-прибор, образец полупроводника.

#### Методические указания

Явление образования электрического поля  $E_H$  в направлении, перпендикулярном действию внешнего поля при помещении проводника в магнитное поле  $B$  называется эффектом Холла. Связь между  $E_H$  и  $B$  можно представить в виде

$$E_H = R_H j B, \quad (8.1)$$

где  $j$  – плотность тока;  $R_H$  – постоянная Холла;  $B$  – напряженность магнитного поля.

Поскольку в эксперименте измеряется разность потенциалов и ток, а не напряженность электрического поля и плотность тока, то выражение (8.1) удобнее представить в виде

$$U_H = R_H IB/d, \quad (8.2)$$

где  $U_H$  – холловская разность потенциалов (ЭДС Холла),  $I$  – ток,  $d$  – толщина образца.

Постоянная Холла связана с параметрами полупроводника

$$R_H = \frac{r}{e} \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p + n\mu_n)^2}, \quad (8.3)$$

где  $r$  – константа (в нашем случае  $r = 1,18$ );  $e$  – заряд электрона,  $p$  и  $n$  – концентрация дырок и электронов,  $\mu_p$  и  $\mu_n$  – подвижность дырок и электронов.

В случае носителей заряда одного знака (примесный полупроводник в ионизированном состоянии) выражение можно упростить: для

электронов 
$$R_H = -r \frac{1}{ne}; \quad (8.4)$$

дырок 
$$R_H = r \frac{1}{pe}. \quad (8.5)$$

Из этих выражений можно определить концентрацию носителей заряда, а зная электропроводность полупроводника, и их подвижность

$$\mu = |R_H| \sigma. \quad (8.6)$$

Тип носителей можно определить с помощью рис. 8.1.

Если размещение зарядов на боковых поверхностях полупроводника соответствует рисунку, значит носители – электроны, если не соответствует, значит – дырки.

#### Порядок выполнения работы

1 Изучить схему установки (рис. 8.2). Измерение эффекта Холла производится компенсационным методом. Эффект Холла исследуется в постоянном магнитном поле при постоянном токе, текущем через образец. К образцу присоединены две пары электродов, одна из которых служит для подведения к нему тока, а другая является зондами измерения ЭДС Холла  $U_H$ .

2 Включить питание установки. Поскольку боковые зонды на образце расположены не строго на одной эквипотенциальной поверхности, необходимо провести измерения поправки, т.е. зависимости напряжения на зондах от тока без магнитного поля  $U_n$ . Данные занести в табл. 8.1. Измерения повторить трижды.

3 Включить питание электромагнита и повторить измерения в магнитном поле. При этом будет измерена суммарная разность потенциалов, представляющая сумму напряжения Холла и поправки  $U_0$ . Найти напряжение Холла с учетом знака поправки. Измерения повторить трижды. Результаты занести в табл. 8.1.

## 8.1 Измерения ЭДС Холла

№ п/п	$I, \text{мА}$	$U_{n1}$	$U_{n2}$	$U_{n3}$	$U_{n2}, \text{мВ}$	$U_{01}$	$U_{02}$	$U_{03}$	$U_0, \text{мВ}$	$U_H, \text{мВ}$

- 4 Изменить полярность тока и сменить полярность гальванометра, повторить измерения (пункты 2 и 3).
- 5 Для каждого значения тока  $I$  рассчитать среднее значение ЭДС Холла и его рассеяние. Построить графики зависимости  $U_H = f(I)$ .
- 6 Методом наименьших квадратов определить постоянную Холла, рассчитать концентрацию носителей заряда, подвижность носителей и определить тип полупроводника.

### Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Типы приборов и характеристики образцов материала.
- 3 Методика измерений постоянной Холла, схема установки.
- 4 Таблица экспериментальных данных и графики зависимости  $U_H = f(I)$ .
- 5 Расчет постоянной Холла, подвижности и концентрации носителей.
- 6 Краткое представление результатов работы.

### Контрольные вопросы

- 1 Эффект Холла.
  - 2 Применение эффекта Холла
  - 3 Подвижность носителей заряда.
  - 4 Влияние температуры и дефектов кристаллов на подвижность носителей заряда.
  - 5 Постоянная Холла и ее связь с параметрами носителей заряда.
  - 6 Эффективная масса носителей заряда. Понятие дырки.
- [8, с. 265 – 270]; [9, с. 19 – 28]

## Лабораторная работа № 9

### ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

*Цель работы:* знакомство с методикой определения работы выхода электрона методом прямых Ричардсона.

*Приборы и принадлежности:* стабилизированный источник питания, трансформатор, амперметр, вольтметр, осциллограф, электронная схема.

### Методические указания

Электроны в кристалле находятся в потенциальной яме, выход из которой требует затраты энергии (работы выхода) по преодолению силы, действующей на них со стороны кристалла.

Электрон, выходящий из металла и находящийся у его поверхности на расстоянии  $x$ , индуцирует в металле заряд  $+e$ , называемый электрическим изображением заряда  $-e$ . Он действует на вышедший электрон так, как если бы был сосредоточен под поверхностью металла на глубине в точке, симметричной той, в которой находится электрон. Он притягивает электрон с силой, называемой силой электрического изображения

$$F = e^2 / 16 x^2, \quad (9.1)$$

где  $e$  – заряд,  $x$  – расстояние электрона от поверхности.

При повышении температуры средняя энергия электронов возрастает и часть из них выходит из металла. Это явление получило название термоэлектронной эмиссии. Поместив вблизи нагретого металла проводник и создав между ним и металлом электрическое поле, отсасывающее электроны, можно получить термоэлектронный ток

$$I = AT^2 \exp(-\chi_0 / kT), \quad (9.2)$$

где  $A$  – постоянная Ричардсона;  $\chi_0$  – работа выхода электрона;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура.

Постоянная Ричардсона связана с характеристиками электрона следующим образом

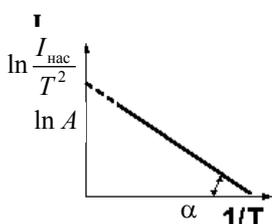
$$A = 4m_n k^2 e / h^3, \quad (9.3)$$

где  $m_n$  – эффективная масса электрона;  $k$  – постоянная Больцмана;  $e$  – заряд электрона;  $h$  – постоянная Планка.

Логарифмируя выражение (9.2), получаем уравнение прямой линии, по наклону которой можно определить работу выхода электронов. Эта прямая на оси  $\ln I$  отсекает отрезок, численно равный логарифму постоянной Ричардсона.

На практике обычно производят измерения температурной зависимости тока насыщения диода

$$\ln \frac{I_{\text{нас}}}{T^2} = \ln A - \frac{\chi_0}{k} \frac{1}{T}. \quad (9.4)$$



**Рис. 9.1** Зависимость  $1/T$  тока термоэмиссии от температуры

Как видно из рис. 9.1, эта зависимость представляет собой прямую линию с углом

наклона  $\alpha$  ( $\operatorname{tg}\alpha = \chi_0/k$ ), отсекающую на оси координат величину равную  $\ln A$ .

В данной работе определение работы выхода электрона основано на использовании вольтамперных характеристик (ВАХ) диода (рис. 9.2).

Диодом служит манометрическая лампа 1 типа ПМИ-2 с вольфрамовым катодом прямого накала, подключенным к источнику постоянного тока 2. Сила тока накала регулируется реостатом  $R_1$ . Для измерения мощности накала в цепь катода включены амперметр и вольтметр. Анодное напряжение подается через трансформатор 4, питаемый от переменного тока.

При включении трансформатора 4 на электроды лампы 1 подается напряжение, возникающее на его вторичной обмотке. Пропорциональный напряжению сигнал, возникающий на делителе,

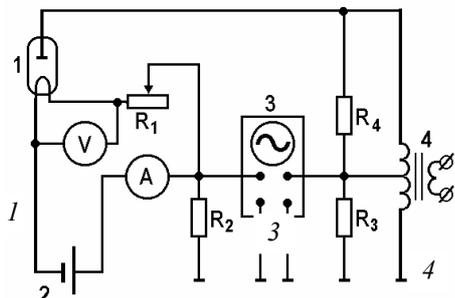


Рис. 9.2 Электронная схема установки

подается на пластины горизонтального отклонения луча осциллографа 3.

Через резистор  $R_2$ , включенный в сеть катода, пойдет термоэлектронный ток. Падение напряжения на этом сопротивлении  $R_2$ , пропорциональное току термоэлектронной эмиссии, поступает на пластины  $Y$  вертикального положения луча. Таким образом на экране осциллографа возникает ВАХ, по которой легко определить ток насыщения  $I_{\text{нас}}$ .

Число значений  $I_{\text{нас}}$  определяется числом степеней регулировки реостата, включенного в цепь накала.

Температура катода находится путем интерполяции из табл. 9.1 по значению удельной мощности  $P/l d$ , где  $l$  – длина катода;  $d$  – его диаметр.

Для применяемой лампы ПМИ-2 значение  $l d = 6 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ .

### 9.1 Влияние удельной мощности накала на температуру вольфрамовой нити

$T, \text{ K}$	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800
$P/l d$	75,4	95,7	119,8	148,2	181,2	219,3	263,0	312,7	388,9

### Порядок выполнения работы

1 Собрать схему, пользуясь ее изображением на лицевой стороне установки и набором монтажных проводов с клеммами.

**Внимание!** Напряжение в применяемой установке опасно для жизни, необходимо после сборки схемы дать проверить ее преподавателю. Самостоятельное включение установки запрещается.

2 Включить осциллограф, пользуясь инструкцией, прилагаемой к нему. Проградуировать ось  $Y$  в единицах тока.

3 Включить источник накала, предварительно убедившись, что регулятор напряжения на нуле:

- включить трансформатор 300 В, проверив правильность подключения средней точки;
- наблюдать на экране ВАХ ПМИ-2;
- увеличив накал катода реостатом, добиться вида ВАХ с явно выраженным участком насыщения, как показано на рис. 9.3;
- зарисовать на кальку с сохранением линейных масштабов экрана вид серий ВАХ, полученных с разным током накала;

– для каждой ступени тока накала записать значения  $I_{\text{нас}}$  и  $U_{\text{нас}}$  на катоде, рассчитать мощность по формуле  $P = I_{\text{нас}} U_{\text{нас}}$  и величину  $P/l d$ ;

– по табл. 9.1 определить температуру катода  $T$ ;

– измерить ток насыщения;

– все данные занести в табл. 9.2.

### 9.2 Результаты измерения термоэмиссии

$I_{\text{нас}}, \text{ A}$	$U_{\text{нас}}, \text{ В}$	$P, \text{ Вт}$	$P/l d, \text{ Вт/см}^2$	$I_{\text{нас}}, \text{ mA}$	$T, \text{ K}$	$1/T, \text{ K}^{-1}$	$\ln(I_{\text{нас}}/T^2)$

4 Построить зависимость  $\ln(I_{\text{нас}}/T^2) = f(1/T)$ .

5 Используя метод наименьших квадратов и зависимости (9.3) и (9.4), определить работу выхода, постоянную Ричардсона и эффективную массу электрона; сравнить ее с табличным значением.

### Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Типы приборов.
- 3 Методика измерения работы выхода и постоянной Ричардсона.
- 4 Таблица экспериментальных данных и график зависимости  $\ln(I_{\text{нас}}/T^2) = f(1/T)$ .
- 5 Расчет работы выхода и эффективной массы электрона.
- 6 Результаты эксперимента и сравнение их с справочными данными.

### Контрольные вопросы

- 1 Работа выхода, термоэлектронная эмиссия.

- 2 Уравнение Ричардсона -Дэшмена.
  - 3 Влияние покрытий на работу выхода.
  - 4 Эффект Шоттки.
  - 5 Холодная эмиссия электронов, туннельный эффект.
  - 6 Эффективная масса электрона.
- [8, с. 211 – 215]

## ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ФОТОЭФФЕКТА

*Цель работы:* общее знакомство с методикой исследования фотоэлектрических свойств полупроводников. Измерение вольтамперной характеристики фоторезисторов. Определение времени жизни неравновесных носителей.

*Приборы и принадлежности:* прибор для определения параметров фоторезисторов ИФС-1, шлейфовый осциллограф, фоторезисторы.

### Методические указания

Внутренний фотоэффект – это процесс внутренней ионизации полупроводника под действием света, приводящий к образованию избыточных, неравновесных носителей заряда. Добавочную проводимость, обусловленную внутренним фотоэффектом, называют фотопроводимостью.

Основная проводимость, обусловленная тепловым возбуждением свободных носителей заряда, называется тепловой проводимостью.

Приборы, предназначенные для регистрации светового излучения по величине фотопроводимости, называются фоторезисторами (ФР). Схематическое устройство фотоспротивления показано на рис. 10.1.

На стеклянную подложку 1 наносят путем катодного распыления слой металла 2 – электроды, а между ними – путем испарения в вакууме – тонкий слой 3 соответствующего полупроводника. Иногда этот слой наносят и путем осаждения из раствора, методом порошковой металлургии или же просто механически: намазывают пасту из полупроводника, замешанную на растворителе, которую затем высушивают и вжигают.

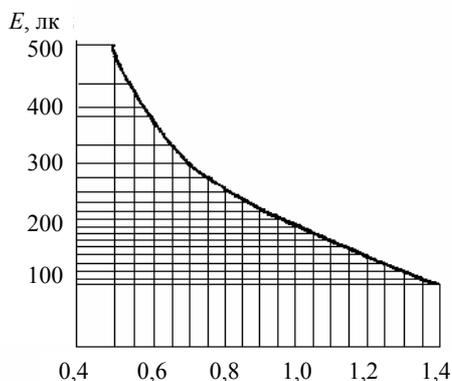
Перевод электронов в зону проводимости требует меньшей работы, чем при внешнем фотоэффекте. Поэтому фотоэлементы с внутренним фотоэффектом имеют более длинноволновую границу фотоэффекта и в инфракрасной области они наиболее пригодны.

К наиболее распространенным типам ФР относятся ФС-А1, ФС-А4 из сернистого свинца, ФС-Б2 из сернистого висмута, ФС-К1, ФС-К2, ФСК-М1, ФСК-М2 из сернистого кадмия. Буква М добавляется в том случае, если ФС выполнен из монокристалла.

### Порядок выполнения работы

- 1 Перед включением приборов в сеть следует убедиться в том, что:
  - на приборе ИФС переключатель В3 находится в положении "2ма";
  - переключатель пределов на "Фотоне" – в положении "1";
  - ручки R13, R7 и В2 – в крайнем левом положении.
- 2 Снять вольтамперные характеристики ФР для трех значений освещенности  $E$ . При этом соблюдать следующую последовательность:
  - включить прибор в сеть, включить питание тумблером  $B_1$ ;
  - открыть шторку на панели и внутрь камеры поместить датчик "Фотона" для установки освещенности. Включить "Фотон" в сеть;
  - включить осветительную лампу накаливания тумблером  $B_4$ ;
  - на приборе "Фотон" нажать кнопку "ВКЛ" и, регулируя ток накала резистором R13 на ИФС-1, установить на верхней шкале "Фотона" произвольное число делений в диапазоне от 1,4 до 0,5 дел. Полученное число делений перевести в единицы освещенности, пользуясь графиком (рис. 10.2). Закрыть шторку камеры ИФС-1;
  - для первого значения освещенности, не меняя накала лампы 13, снять вольтамперные характеристики

$$I_{\phi} = f(U),$$



**Рис. 10.2** Градуировочный график для определения освещенности на приборе "Фотон" (предел "10")

где  $U$  – напряжение на ФР изменяется ручками  $B_2$  и  $R_7$  ("грубо", "плавно") и отсчитывается по прибору "К<sub>2</sub>" на выносной панели.

Значение фототока  $I_\phi$  отсчитывается по прибору "К" при положении переключателя  $B_3$  – "2ма".

Для построения графика необходимо снять – 10 значений.

Резистором  $R_{13}$  изменить значение освещенности  $E$  и вновь снять вольтамперную характеристику. Все данные свести в табл. 10.1.

По данным табл. 10.1 построить графики  $I_\phi = f(U)$  для трех значений освещенности в одних координатах.

### 10.1 Измерение вольтамперных характеристик фоторезистора

$U, \text{В}$	$E_1 = \text{ , лк}$	$E_2 = \text{ , лк}$	$E_3 = \text{ , лк}$
		$I_\phi, \text{мА}$	$I_\phi, \text{мА}$

3 Под руководством преподавателя снять на шлейфовом осциллографе кривые нарастания и спада фототока (см. инструкцию к шлейфовому осциллографу) на ультрафиолетовую фотобумагу УФС-1.

4 Рассчитать время жизни избыточных носителей, пользуясь следующей методикой.

Кривая спада фототока фоторезистора после выключения источника света описывается зависимостью

$$I_\phi = I_0 \exp(-t / \tau), \quad (10.1)$$

где  $I_0$  – установившийся фототок в условиях постоянной освещенности фоторезистора;  $t$  – время, с;  $\tau$  – время жизни носителей, с. Логарифмируя зависимость (10.1) получим

$$\ln I_\phi = \ln I_0 - t / \tau, \quad (10.2)$$

т.е. линейную зависимость  $\ln I_\phi$  от времени с угловым коэффициентом, равным  $(-1 / \tau)$ . Отсюда легко определить время жизни  $\tau$ .

5 Наложить на кривую фототока координатные точки таким образом, чтобы горизонтальная ось  $t$  совместилась с концом кривой  $I_\phi = f(t)$ , начало оси совпало с началом спада фототока.

Проградуировать ось  $t$  в секундах, учитывая, что скорость развертки фотобумаги в осциллографе 125 мм/с.

6 Определить значение фототока по кривой спада через равные промежутки времени, взять их логарифмы и полученные данные записать в виде табл. 10.2.

7 Построить зависимость  $\ln I_\phi = f(t)$  и методом наименьших квадратов определить время жизни неравновесных носителей.

### 10.2 Измерение затухания фототока

$t, \text{с}$	$I_\phi, \text{мА}$	$\ln I_\phi$

#### Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Тип приборов.
- 3 Методика измерения вольтамперных характеристик и времени жизни неравновесных носителей.
- 4 Таблицы экспериментальных данных, графики вольтамперных характеристик и кривая спада фототока.
- 5 Расчет времени жизни неравновесных носителей.
- 6 Результаты эксперимента и сравнения их с литературными данными.

#### Контрольные вопросы

- 1 Поглощение света полупроводниками.
  - 2 Внутренний фотоэффект. Время жизни носителей заряда.
  - 3 Применение фотоэффекта.
  - 4 Излучательная рекомбинация, светодиоды.
  - 5 Стимулирующее излучение. Квантовый генератор.
- [8, с. 318 – 344]; [9, с. 87 – 97]; [10, с. 111 – 118]

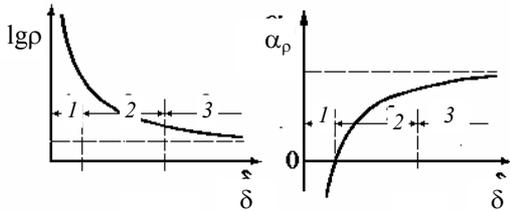
## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТОНКИХ ПЛЕНОК

*Цель работы:* изучение зависимости удельного электросопротивления тонких металлических пленок от их толщины.

### Методические указания

Тонкие металлические пленки широко применяются в радио и в радиотехнике в качестве проводников, контактных площадок, резистивных, магнитных и других элементов микроэлектронных приборов. Их свойства могут заметно отличаться от физико-химических параметров сплавов, из которых они сделаны.

Электропроводность металлов определяется сопротивлением, которое оказывается направленному движению электронов. Электроны могут рассеиваться на тепловых колебаниях кристаллической решетки, поэтому температурный коэффициент сопротивления  $\alpha_p$  (ТКС) у металлов положительный. Дефекты кристаллического строения (в том числе и поверхность кристалла) также увеличивают электросопротивление проводников.



**Рис. 11.1** Зависимость удельного сопротивления (а) и ТКС (б) тонкой металлической пленки от ее толщины

Дальнейшее увеличение островков приводит к образованию мостиков – перешейков и полному зарастанию подложки поли – и монокристаллической металлической пленки. Такой материал ведет себя уже как проводник (участок 2) ( $\alpha_p > 0$ ), но его удельное электросопротивление  $\rho$  заметно больше, чем у массивного металла (пунктир). Причиной этого является высокая концентрация дефектов роста в пленке и влияние ее поверхностей.

Подвижность электронов, а значит и электропроводность металла определяется величиной длины свободного пробега  $l_e$  путем, который электрон проходит между двумя рассеяниями.

Размерный эффект – это сокращение длины свободного пробега электронов вследствие отражения их от поверхности образца.

В случае, если толщина пленки  $\delta < l_e$ , поверхностное рассеяние электронов велико и ее удельное электросопротивление значительно больше, чем у массивного металла – такие пленки называют тонкими (физически).

Увеличение толщины  $\delta \gg l_e$  приближает материал к свойствам массивного – толстые пленки (участок 3).

### Порядок выполнения работы

- 1 Включить омметр в сеть и дать прогреться 5 – 10 минут.
- 2 Измерить сопротивление  $R$  тонкопленочных образцов (рис. 11.2), подсоединив щупы омметра к их контактам 3.
- 3 Измерить длину  $l$  и ширину  $b$  тонкопленочных резисторов 2 с помощью линейки.
- 4 Измерить толщину пленки в каждом образце с помощью микроинтерферометра МИИ-4.

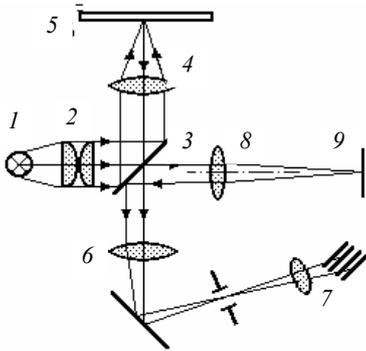
Этот прибор широко применяется в приборостроении для изучения и контроля тонкопленочных деталей микроэлектроники. Принцип действия прибора основан на явлении интерференции света. На практике для получения двух систем волн, способных интерферировать, пользуются разделением пучка лучей, исходящих из одной точки источника света, на два пучка.

В МИИ-4 в качестве разделяющей системы используется наклонная плоскопараллельная пластинка, имеющая полупрозрачное светоделительное покрытие. Половину падающего на нее света пластинка отражает, половину пропускает, вследствие чего образуются две системы волн, способных интерферировать.

В результате интерференции двух систем волн в фокальной плоскости окуляра наблюдается интерференционные полосы. Разность хода интерферирующих лучей от центра поля к краям увеличивается и проходит все значения  $0; \frac{\lambda}{2}; \lambda;$

$\frac{3}{2}\lambda; 2\lambda$  и т. д., где  $\lambda$  – длина волны света. В точках поля, где разность хода равна  $\lambda; 2\lambda; 3\lambda$  и т.д., в результате

интерференции пучков получаются светлые полосы, а в точках, где разность хода равна  $\frac{\lambda}{2}; \lambda; \frac{3}{2}\lambda; \frac{5}{2}\lambda$  и т.д. – темные полосы.



**Рис. 11.3** Схема оптической системы микроинтерферометра

На рис. 11.3 показана схема оптической системы МИИ-4. Свет от лампы 1 через конденсор 2 попадает на полупрозрачную пластину 3, где разделяется на два пучка лучей. Один, отражаясь, попадает в объектив 4 и фокусируется на поверхности объекта 5. Отразившись от нее он через объектив 4 и промежуточную линзу 6 приходит в окуляр 7. Второй пучок от конденсора 2 проходит через полупрозрачную пластину 3 и через компенсатор 8 падает на эталонное зеркало 9 интерференционной головки. Отразившись от него и вернувшись к полупрозрачной пластине, второй пучок лучей также приходит в окуляр 7.

Для измерения толщины пленки образец надо положить на объектный столик прибора слоем вниз.

Для фокусировки изображения пленки надо использовать микровинт на станине прибора. При этом второй пучок (от эталонного зеркала) выключается поворотом ручки шторки по часовой стрелке.

При достижении резкого изображения края пленки шторку открывают (ручка против часовой стрелки) и в центре окуляра одновременно наблюдают картину

интерференции (рис. 11.4).

На краю пленки интерференционная картина сдвигается, что связано с изменением длины хода лучей, отраженных от поверхностей подложки и пленки на величину толщины  $\delta$ . Величину сдвига интерференционной картины следует определить в долях от интервала между полосами.

При использовании белого света минимумы картины (темные полосы) окрашены в цвета радуги. Для измерений обычно используют два первых минимума черного цвета.

Для этого надо повернуть окуляр МОВ-1 так, чтобы одна из его визирных линий стала параллельна интерференционным полосам и, вращая барабанчик, совместить визир сначала с одним, а потом с другим минимумом, последовательно снимая отчеты  $N_1, N_2, N_3, N_4$  (рис. 11.4).

Рассчитать толщину пленки по формуле

$$\delta = 0,27 \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2}, \text{ мкм.}$$

5 Все результаты измерений занести в табл. 11.1.

### 11.1 Измерение электропроводности тонких пленок

№	$l, 10^{-3} \text{ м}$	$B, 10^{-3} \text{ м}$	$\delta, 10^{-6} \text{ м}$	$R, \text{ Ом}$	$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$	$\lg \rho$

6 Рассчитать удельное сопротивление металла тонкой пленки

$$7 \quad \rho = R \frac{b\delta}{l} \text{ и } \lg \rho.$$

#### Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Схема тонкопленочного резистора.
- 3 Оптическая схема МИИ-4 и описание методики измерения толщины тонких пленок.
- 4 Таблица экспериментальных данных и кривая зависимости

$$\lg \rho = f(\delta).$$

#### Контрольные вопросы

- 1 Стадии роста тонких пленок.
- 2 Методы получения тонких пленок.
- 3 Электропроводность тонких пленок.
- 4 Методика измерения толщины пленок методом интерференции.
- 5 Сопротивление квадрата пленки.

[10, с. 480 – 521]

Лаборатории работа № 12

### ЭФФЕКТ ПОЛЯ. МДП-СТРУКТУРЫ

*Цель работы:* экспериментальное изучение "эффекта поля" на примере МДП-структуры.

*Приборы и принадлежности:* источник высокого напряжения РЕ-1, микроамперметр, источник тока ЛИПС 1-30, полупроводниковая пластина.

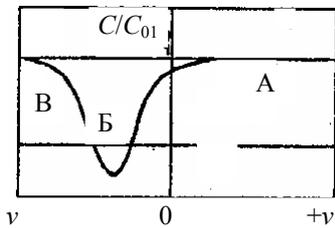


Рис. 12.3 Вольт-фарадная характеристика МДП-структуры

Изменение межэлектродного потенциала вблизи поверхности твердого тела приводит к появлению в запрещенной зоне полупроводника разрешенных дискретных уровней энергии для электронов, расположенных в непосредственной близости от поверхности кристалла. Такие уровни получили название поверхностных уровней или поверхностных состояний. Заполнение этих уровней приводит к образованию вблизи поверхности объемного заряда, существенно влияющего на многие свойства полупроводника: электропроводность, работу выхода, фото-ЭДС и др., а также на параметры приборов.

Заряжение поверхности полупроводника вызывает возникновение разности потенциалов между поверхностью и объемом полупроводника и, следовательно, искривление энергетических зон.

Если на поверхности располагается отрицательный заряд, энергетические зоны изгибаются вверх, т.к. при перемещении электрона из объема на поверхность его потенциальная энергия увеличивается. При положительном заряде поверхности зоны изгибаются вниз.

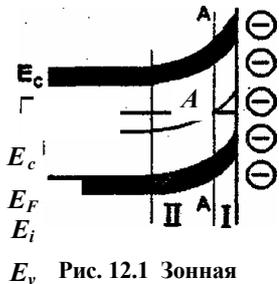


Рис. 12.1 Зонная структура полупроводника, поверхность которого заряжена отрицательно

На рис. 12.1 показана зонная структура  $n$ -полупроводника, у которого поверхность заряжена отрицательно ( $E_i$  – середина запрещенной зоны полупроводника). В  $n$ -полупроводнике расстояние (по оси энергии) от дна зоны проводимости  $E_c$  до уровня Ферми  $E_F$  меньше, чем от уровня Ферми до потолка валентной зоны  $E_v$ . Поэтому равновесная концентрация электронов  $n$  больше концентрации дырок  $p$ .

В поверхностном слое объемного заряда происходит искривление зон и расстояние от дна зоны проводимости до уровня Ферми увеличивается.

В области обеднения  $I$  (Рис. 12.1) концентрация основных носителей заряда (электронов) уменьшается и в сечении  $A - A$  полупроводник становится собственным. При высокой плотности поверхностного заряда по знаку, совпадающего со знаком основных носителей, концентрация неосновных носителей заряда у поверхности становится выше концентрации основных носителей и тип проводимости изменяется. Это явление получило название инверсии (область  $II$  на рис.

12.1). Если знак поверхностного заряда противоположен знаку заряда основных носителей тока в полупроводнике, то происходит обогащение приповерхностного слоя основными носителями.

Явление изменения поверхностной проводимости полупроводника под действием поперечного электрического поля называют эффектом поля.

Этот эффект применяют в МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) структуре (рис. 12.2).

На одну сторону полупроводниковой пластины 3 напыляется омический контакт 4, второй электрод 1 прижимается к противоположной стороне пластины через тонкий слой диэлектрика 2. Меняя величину и знак потенциалов на электродах 4 и 1 можно в широких пределах изменять величину и знак заряда, индуцируемого на поверхности полупроводника, прижатой к электроду. Если вместо диэлектрика использован окисел, то получается МОП-структура.

В состоянии обогащения (для  $n - \oplus$ , для  $p - \ominus$ ) с увеличением напряжения толщина заряженного слоя сохраняется практически неизменной и рост заряда  $Q_s$  происходит за счет повышения объемной плотности, которая может меняться неограниченно. Поэтому емкость МДП-структуры почти не зависит от приложенного напряжения.

В состоянии обеднения при увеличении напряжения изменяется толщина обедненного слоя (так как положительный заряд обусловлен неподвижными ионизированными атомами). Это равносильно изменению расстояния между обкладками конденсатора, т. е. уменьшению емкости с ростом приложенного напряжения. Такая картина должна наблюдаться вплоть до наступления инверсии.

В состоянии инверсии в приповерхностном слое полупроводника возникает положительный заряд притянутых дырок  $Q_p$ , за которым располагается неподвижный положительный заряд ионизированных доноров  $Q_d$ . Суммарный заряд  $Q = Q_p + Q_d$  увеличивается, а толщина заряженного слоя, образованного зарядом  $Q_p$ , почти не зависит от приложенного напряжения. Поэтому в состоянии инверсии емкость структуры перестает зависеть от внешнего напряжения.

График изменения емкости МДП – структуры от внешнего напряжения приведен на рис. 12.3. Область А соответствует обогащению, Б – обеднению, В – инверсии. Такие кривые называют вольт-фарадными характеристиками.

### Порядок выполнения работы

1 По инструкции прибора РЕ-1 ознакомиться со схемой измерения тока зарядки МДП-структуры. Кристалл полупроводника расположен между медными электродами, изолированными от них слюдяными прокладками, и включен в плечо моста прибора РЕ-1. В исходном состоянии мост сбалансирован и микроамперметр показывает отсутствие тока. При подаче высокого напряжения на медные электроды происходит образование поверхностного заряда и микроамперметр регистрирует ток зарядки  $I$ .

Величину поверхностного заряда можно определить по формуле  $Q = \int_0^{\infty} Idt$ . Аппроксимируя импульс тока зарядки прямоугольной формой, можно записать  $Q = I_m t_3$ , где  $I_m$  – ток зарядки,  $t_3$  – 0,5 с – время зарядки.

2 Включить прибор РЕ-1 тумблером "Сеть" на передней панели прибора.

3 Включить источник ЛИПС1-30 и установить напряжение питания моста 10 вольт.

4 Вращая ручку "Баланс" на верхней панели прибора РЕ-1 сбалансировать мост (добиться нулевого тока на

микроамперметре).

5 Вращая шлиц "Рег. высокого напряжения", установить начальное значение высокого напряжения на вольтметре прибора.

6 Подать высокое напряжение на МДП-структуру нажатием кнопки "Зарядка" на верхней панели прибора (на коробке из оргстекла). Одновременно зарегистрировать максимальное отклонение на микроамперметре. Результаты измерения занести в табл. 12.1.

### 12.1 Результаты измерений поверхностного заряда

U, В	Ток зарядки, мкА							Q, Кл	C, ф
	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I	S <sub>X</sub>		

7 Подождать, когда напряжение на вольтметре восстановится, и повторить измерения. Произвести не менее 5 измерений при одном значении высокого напряжения. Результаты занести в табл. 12.1.

8 Изменить значение высокого напряжения и повторить измерения тока заряда для 6 – 7 значений высокого напряжения U.

9 Рассчитать среднее значение тока и заряд Q по формуле (12.1).

10 Рассчитать значение емкости МДП-структуры по формуле  $C = Q / U$ .

11 Построить график вольт-фарадной зависимости  $C = f(U)$ .

12 Зная, что на электрод подавался положительный потенциал, определить тип полупроводника.

### Содержание отчета

- 1 Схема МДП-структуры.
- 2 Таблица с измерениями.
- 3 Вольт – фарадная характеристика МДП-структуры.
- 4 Тип полупроводника.

### Контрольные вопросы

- 1 В чем заключается эффект поля.
- 2 Что такое поверхностные состояния?
- 3 Объяснить принцип работы МДП-структуры.
- 4 Нарисовать зонную структуру n- или p-полупроводника, на поверхности которого имеется электрический заряд. [8, с. 250 – 254]

## Лабораторная работа № 13

### ИЗУЧЕНИЕ p-n-ПЕРЕХОДА

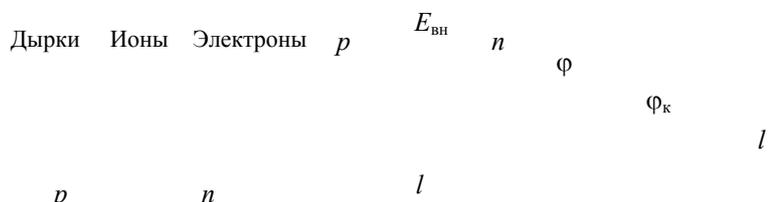
*Цель работы:* изучение p-n-перехода, ознакомление с работой полупроводникового диода, получение вольт-амперной характеристики диода.

*Приборы и оборудование:* источник постоянного тока, полупроводниковый диод, осциллограф, соединительные провода.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Прогресс в развитии полупроводниковой электроники связан в основном с использованием контакта двухпримесных полупроводников с различным типом проводимости. Такой контакт называют *электронно-дырочным переходом или p-n переходом*. На практике p-n переход получают введением в примесный полупроводник дополнительной легирующей примеси.

Рассмотрим схематически образование p-n перехода при соприкосновении двух полупроводников с различным типом электропроводности (рис. 13.1). До соприкосновения в обоих полупроводниках электроны, дырки и неподвижные ионы были распределены равномерно (рис. 13.1, а). При соприкосновении полупроводников в пограничном слое происходит рекомбинация (воссоединение) электронов и дырок. Свободные электроны из зоны полупроводника n-типа занимают свободные уровни в валентной зоне полупроводника p-типа. В результате вблизи границы двух полупроводников образуется слой, лишенный подвижных носителей заряда и поэтому обладающий высоким электрическим сопротивлением, так называемый запирающий слой (рис. 13.1, б). Толщина запирающего слоя обычно не превышает нескольких микрометров.



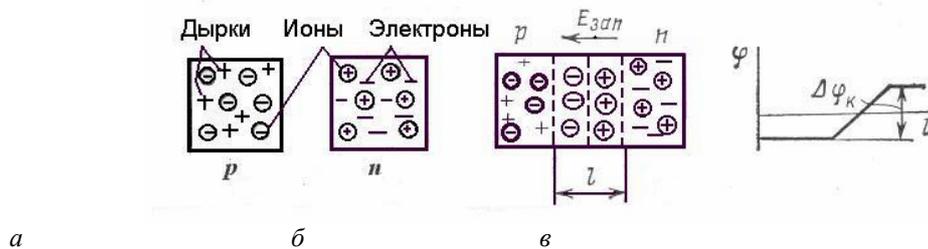


Рис. 13.1 Образование p-n перехода

Расширению запирающего слоя препятствуют неподвижные ионы донорных и акцепторных примесей, которые образуют на границе полупроводников двойной электрический слой. Этот слой определяет контактную разность потенциалов (потенциальный барьер)  $\phi_k$  на границе полупроводников (рис. 13.1, в). Возникшая разность потенциалов создает в запирающем слое электрическое поле, препятствующее как переходу электронов из полупроводника n-типа в полупроводник p-типа, так и переходу дырок в полупроводник n-типа. В тоже время электроны могут свободно двигаться из полупроводника p-типа в полупроводник n-типа, точно так же, как дырки из полупроводника n-типа в полупроводник p-типа.

Таким образом, контактная разность потенциалов препятствует движению *основных носителей заряда* и не препятствует движению *неосновных носителей заряда*. Однако при движении через p-n переход неосновных носителей заряда (так называемый дрейфовый ток  $I_{др}$ ) происходит снижение контактной разности потенциалов  $\phi_k$ . Это позволяет некоторой части основных носителей, обладающих достаточной энергией, преодолеть потенциальный барьер, вызванный контактной разностью потенциалов  $\phi_k$ . Появляется диффузионный ток  $I_{диф}$ , который направлен навстречу дрейфовому току  $I_{др}$ , т.е. возникает динамическое равновесие, при котором  $I_{др} = I_{диф}$ .

Если к p-n-переходу приложить внешнее напряжение, которое создает в запирающем слое электрическое поле напряженностью  $E_{вн}$ , совпадающее по направлению с полем неподвижных ионов напряженностью  $E_{зап}$  (рис. 13.2), то это приведет лишь к расширению запирающего слоя, т.к. отведет от контактной зоны и положительные и отрицательные носители заряда (дырки и электроны). При этом сопротивление p-n-перехода велико, ток через него мал – он обусловлен движением неосновных носителей заряда. В этом случае ток называют *обратным*, а p-n-переход – *закрытым*.

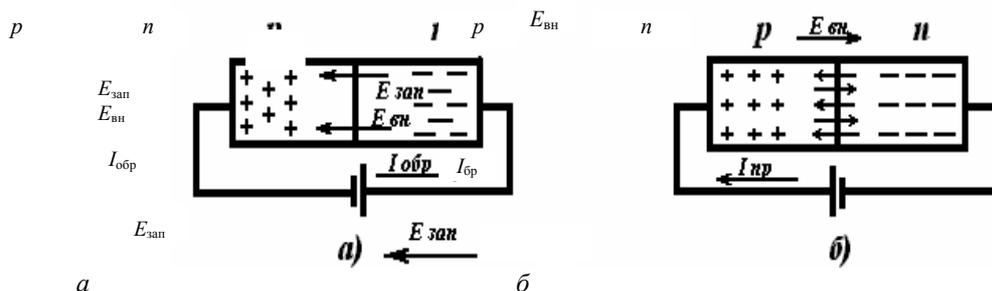


Рис. 13.2 Электронно-дырочный переход во внешнем электрическом поле:  
а – приложено обратное напряжение; б – прямое напряжение

Таким образом, p-n-переход обладает несимметричной вольт-амперной характеристикой (рис. 13.3). При прямом включении через него проходит большой прямой ток, при обратном включении – незначительный обратный ток. Важно отметить, что так как прямой ток p-n-перехода практически определяется собственной электропроводностью проводника, то он сильно зависит от температуры. Поэтому и величина прямого тока p-n-перехода резко изменяется при изменении температуры среды, окружающей полупроводниковый кристалл (например, в германиевых полупроводниках примерно в два раза при повышении температуры на каждые 10 °С).

*Порядок выполнения работы*

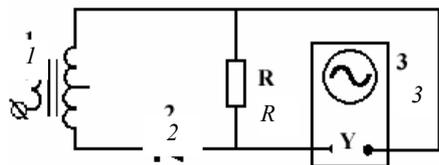


Рис. 13.4 Схема экспериментальной установки: 1 – трансформатор; 2 – диод; 3 – осциллограф

- 1 Собрать установку (рис. 13.4).
- 2 Включить источник питания.
- 3 Включить осциллограф. Используя инструкцию по эксплуатации, получить устойчивое изображение вольтамперной характеристики; скопировать ее на кальку (рис. 13.3).
- 4 Измерить  $U$  и привести напряжение на входе  $Y$  к величине тока  $I$ , протекающего через диод. Результаты занести в табл. 13.1.

**13.1 Зависимость напряжения от тока для полупроводникового диода**

$I$ , mA				
$U$ , V				

- 5 Построить вольтамперную характеристику диода.

### Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Принципиальная схема установки.
- 3 Калька сигнала.
- 4 Вольтамперная характеристика на миллиметровой бумаге.
- 5 Таблица.

### Контрольные вопросы

- 1 Что такое *p-n*-переход?
  - 2 Что такое контактная разность потенциалов?
  - 3 Методы получения *p-n*-переходов.
  - 4 Что такое барьер Шоттки?
  - 5 Выпрямляющие свойства *p-n*-перехода.
  - 6 Что такое инжекция неосновных носителей зарядов?
  - 7 Что такое пробой *p-n*-перехода?
- [8, стр. 214 – 240]

Лабораторная работа № 14

### ГЕТЕРОЭПИТАКСИЯ

*Цель работы:* изучить закономерности эпитаксиального роста тонких пленок из раствора.

*Приборы и принадлежности:* световой микроскоп, подложки из стекла и слюды, 5%-й спиртовой раствор йодистого калия.

### Методические указания

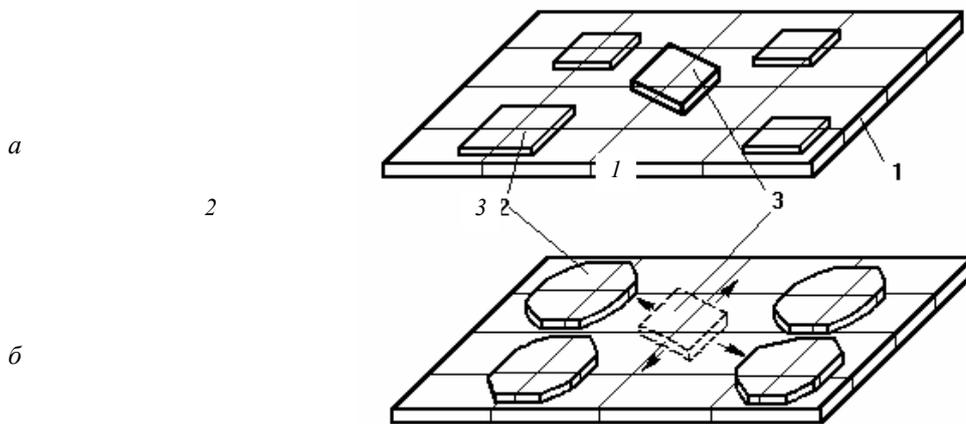
Эпитаксия – это ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого. При этом решетка нарастающего вещества строго определенно ориентируется относительно плоской сетки атомов на поверхности подложки. Эпитаксиальные пленки имеют монокристаллическую структуру и низкую концентрацию дефектов. Это позволяет получить высокую стабильность параметров микросхем и других элементов микроэлектроники, получаемых пленочной технологией.

Различают гетероэпитаксию, когда материалы нарастающей пленки и подложки различны ( $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ), и гомо- или автоэпитаксию, когда они одинаковы ( $\text{Si}/\text{Si}$ ). Разновидностью гетероэпитаксии можно назвать хемоэпитаксию, при которой материал пленки образуется в результате химической реакции подложки с окружающей средой ( $\text{SiO}/\text{Si}$ ).

Для гетероэпитаксии важнейшим условием является структурно-геометрическое соответствие кристаллов наращиваемого слоя и подложки в плоскости роста  $[112] (111)\text{Si}/[1100](0001)\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Эта структурная формула означает, что грань (111) кристалла кремния (решетка типа алмаза) нарастает на плоскость (0001)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (типа корунд), являющуюся поверхностью подложки. Параллельны и направления в двух кристаллах –  $[112] \text{Si}$  и  $[1100]$  корунда. Если наращиваемые вещества имеют близкие структурные типы и параметры решетки  $\overset{\circ}{\text{A}}$  (разница не больше 10 %), наблюдается явление *псевдоизоморфизма* – пленка имеет точно такую же структуру как и подложка:  $[100] (100) \text{Au} // [100] (100) \text{Ag}$ . Однако с ростом толщины пленки упругие искажения, связанные с разницей параметров (для золота  $a = 2,88 \overset{\circ}{\text{A}}$ , серебра  $a = 2,89 \overset{\circ}{\text{A}}$ ), увеличиваются. Поэтому при толщинах больше критической (для  $\text{Au}/\text{Ag}$  –  $600 \overset{\circ}{\text{A}}$ ) после псевдоизоморфного переходного слоя будет собственная решетка золота.

Если разница параметров больше 10 %, сопрягаются наиболее плотно упакованные плоскости и направления кристалла и подложки. При этом часть плоскостей в одной решетке не имеет продолжения в другой. Края таких оборванных плоскостей образуют в переходном слое *дислокации несоответствия*.



**Рис. 14.1 Образование эпитаксиальной пленки:**  
*a* – появление зародышей, *б* – первичная коалесценция

Управляя процессом эпитаксии можно менять концентрацию дислокаций, уменьшая напряжения на границе контакта. Это улучшает стабильность механических и электрических свойств тонких пленок, снижает их склонность к старению при эксплуатации.

Эпитаксиальная структура тонкой пленки закладывается на ранних стадиях её роста (рис. 14.1, *a*). После адсорбции атомов или молекул вещества на подложку *1* в результате поверхностной диффузии появляются плоские зародыши *2*, кристаллическая решетка которых ориентирована по структурному "мотиву" подложки. Для них суммарная поверхностная энергия границ кристалл – окружающая среда, среда – подложка, кристалл – подложка минимальна. При реальных скоростях конденсации вещества всегда образуются и случайно ориентированные кристаллики *3*.

Их суммарная поверхностная энергия заметно больше. Поэтому на следующей стадии роста тонкой пленки – первичной коалесценции (рис. 14.1, *б*) – эти "дефектные" зерна распадаются на атомы.

Эпитаксиальные зародыши продолжают расти. Увеличение упругих искажений приводит к тому, что при коалесценции они утрачивают правильную огранку боковых поверхностей, стремясь к минимуму энергии.

В дальнейшем эти кристаллы на следующих этапах роста снова самоограниваются. При вторичной коалесценции из плоских они становятся трехмерными. На стадии образования "мостиков" они срстаются своими гранями и постепенно заполняют всю поверхность подложки, сливаясь в одну монокристаллическую пленку.

Распад случайно ориентированных зародышей возможен лишь при достаточно высокой диффузионной подвижности атомов на подложке, а значит зависит от ее температуры.

Эпитаксиальной температурой называется температура подложки, ниже которой растет только неориентированная, т.е. поликристаллическая пленка.

Другими параметрами, влияющими на эпитаксию, является степень пересыщения (переохлаждения) кристаллизующегося вещества в окружающей среде, дефектность структуры подложки, степень чистоты её поверхности и др.

В работе изучается первая стадия роста пленки йодистого калия из его спиртового раствора на различных подложках

При нанесении капли раствора на подложку и выдержке в течение 5 – 10 мин происходит испарение растворителя – этилового спирта. За счет этого концентрация соли в растворе увеличивается и достигает ее предельной растворимости при данной температуре. При малых пересыщениях на активных центрах подложки образуются плоские микрокристаллы.

Их форма близка к равновесной и подчиняется закону Гиббса-Кюри-Вульфа. В соответствии с этим законом и анизотропией роста кристаллы самоограниваются плоскостями с малыми индексами Миллера, имеющими минимальную поверхностную энергию. На это также влияет и тип подложки – активная (эпитаксиальная) или пассивная (аморфная), состав раствора и другие факторы.

Кристаллы йодистого калия имеют ГЦК решетку типа каменной соли. При кристаллизации из растворов наблюдаются следующие плоскости роста (границ кристаллов): (100), (111) и (110). При этом плоские зародыши будут иметь форму: квадрат, треугольник и прямоугольник, соответственно.

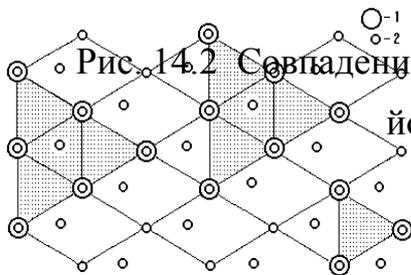


Рис. 14.2 Совпадение плоских атомных сеток слюды (2) и йодистого калия (1)

На практике, как уже обсуждалось выше, форма и размеры – величина случайная, зависящая от множества параметров. Однако вероятность появления той или иной морфологии кристаллов определяется действием закона – большая часть кристаллов будет

иметь форму, соответствующую минимуму энергии.

В качестве подложек используется оптическое стекло (аморфный материал) и монокристаллические пластинки слюды.

Слюда – мусковит  $\text{KA}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$  имеет сложную слоистую кристаллическую решетку моноклинной сингонии. Однако в ее плоскости спайности (001) наблюдается гексагональная симметрия в расположении атомов, близкая к плоской сетке (111) в йодистом калии.

Параметры решетки вдоль [100] у слюды ( $a = 5,18\text{Å}$ ) и по [100] для KI ( $a = 4,99\text{Å}$ ) близки. Поэтому при наложении плоских сеток (111) KI и (001) слюды (рис. 14.2) отдельные узлы совпадают (показаны двойными кружками и штриховкой) и наблюдается эпитаксиальный рост кристаллов йодистого калия на мусковите.

### Порядок выполнения работы

1 Взять подготовленные обезжиренные подложки из стекла и слюды и нанести пипеткой на каждую каплю 5%-го спиртового раствора йодистого калия. Легкими покачиваниями подложки увеличить растекание капли до диаметра 10 – 15 мм.

2 Поместить подложки под объектив микроскопа и дождаться полного испарения растворителя (10 – 15 мин).

**Внимание: Не допускается нагревать или дуть на подложку при испарении растворителя.**

3 Изучить под микроскопом формы кристаллов, встречающиеся на каждой подложке.

4 Провести вероятностную оценку частоты встречи различных форм зародышей на каждой подложке. Для этого по пятидесяти случайным кристаллам определить число кристаллов, форма которых соответствует плоскостям роста (111), (110) и (100).

### Содержание отчета

- 1 Название и цель работы.
- 2 Методика изучения роста кристаллов из раствора.
- 3 Рисунки форм зародышей кристаллов с указанием соответствующей им плоскости роста.
- 4 Столбчатая гистограмма частоты встречи различных форм кристаллов для аморфной и монокристаллической подложки и вывод о наличии эпитаксиального роста.
- 5 Структурная формула эпитаксиального роста для кристаллов, предложенных преподавателем.

### Контрольные вопросы

- 1 Адсорбция. Виды и изотермы адсорбции.
- 2 Термодинамика образования зародышей.
- 3 Рост кристаллов.
- 4 Стадии роста тонких пленок.
- 5 Эпитаксия. Виды эпитаксии.
- 6 Структурные условия эпитаксии.
- 7 Влияние температуры подложки на структуру пленки. Температура эпитаксии.

[3, с. 374 – 376]; [8, с. 70 – 71; 84 – 85]



