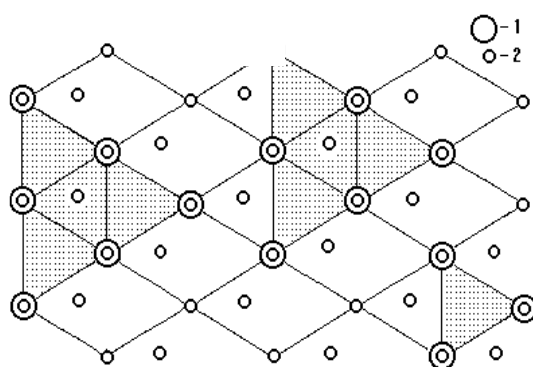


ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЭС



УДК 621.396 (076)
ББК 3843.3я 73-5
Ф503

Рецензенты:

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

Доктор физико-математических наук,
профессор Тамбовского государственного университета
им. Г.Р. Державина
В.А. Фёдоров

Ф503 Физико-химические основы РЭС : методическое пособие / авт.-сост. : В.П. Иванов, В.А. Пручкин, В.В. Зубец, В.Ф. Попов. – 3-е изд., стер. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 48 с. – 50 экз.

Даны методические указания и описание лабораторных работ, посвящённых исследованию различных физических характеристик полупроводниковых материалов, используемых в приборостроении.

Предназначены для студентов специальности 2102010 дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.396 (076)

ББК 3843.3я 73-5

© ГОУ ВПО "Тамбовский государственный
технический университет" (ТГТУ), 2009

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО "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*

Издание третье, стереотипное



Тамбов
Издательство ТГТУ
2009

Учебное издание

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЭС

Методическое пособие

Издание третье, стереотипное

Авторы-составители:

ИВАНОВ Владимир Петрович,
ПРУЧКИН Владимир Аркадьевич,
ЗУБЕЦ Виктор Васильевич,
ПОПОВ Владимир Фёдорович

Редактор Т.М. Г л и н к и н а
Инженер по компьютерному макетированию Т.Ю. З о т о в а

Подписано в печать 02.03.2009
Формат 60 × 84 / 16. 2,79 усл. печ. л. Тираж 50 экз. Заказ № 65

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

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы. освоить приёмы и методы работы на оптических микроскопах.

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

Методические указания

Световой микроскоп предназначен для формирования изображения структур, мелкие детали которых нельзя различить невооружённым 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.

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

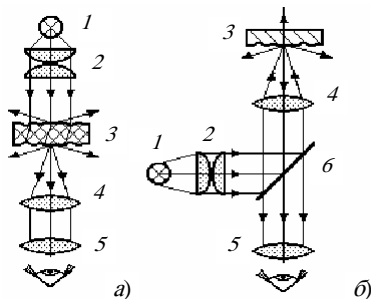


Рис. 1.1. Схема микроскопов на просвет (а) и отражение (б):

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

В микроскопе на просвет исследуемый объект, помещённый на предметный столик микроскопа, освещают 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 счёт 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

$$M = M_{об} M_{ок} = \frac{l_{туб}}{F_{об}} \frac{250}{F_{ок}}, \quad (1.1)$$

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 ещё одна линза (промежуточная), в формуле (1.1) появится новый множитель и т.д.

Следует учитывать, что оптическую длину тубуса часто не удаётся измерить точно, особенно при фотографировании, и это вносит определённые погрешности в расчёт 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 чёткого 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 учёный-оптик Эрнст Аббе, который ввёл понятие разрешающей способности линзы. Его 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); λ – длина волны излучения, используемого для освещения объекта; A – числовая апертура объекта, $A = n \sin \theta$; где n – коэффициент преломления; θ – 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_f , 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, так как 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, укладываемых на выбранном фрагменте.

Применение винтового окуляра-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.

– Микрометрическими винтами координатного перемещения предметного столика подвести перекрестие окуляра к краю детали микроструктуры (рис. 1.2, а).

– 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;

–
–
–
–
–
–
–

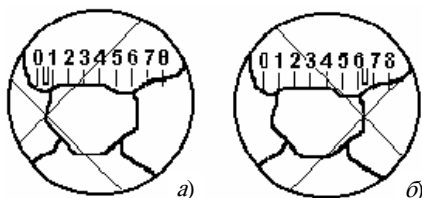


Рис. 1.2. Измерения линейных размеров участка микроструктуры с помощью винтового окуляр-микрометра



Рис. 1.3. Схема определения цены деления окуляра микроскопа

- 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 совмещённых делений ОМ и окуляра; 0,01 – цена деления ОМ, мм.

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

Содержание отчёта

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.

Литература: [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 её деформации к несимметричному смещению зарядов разного знака. Ещё одно требование – высокое удельное электросопротивление материала, затрудняющее внутреннюю компенсацию избыточных зарядов на поверхности пьезокристалла.

Основными природными пьезоматериалами являются кварц и турмалин.

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 её грани образуется заряд

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

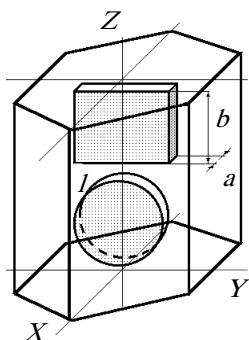


Рис. 2.1. Ориентация выреза кварцевой пластины

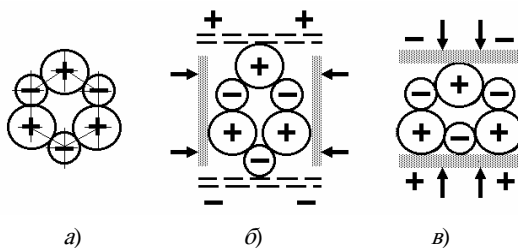


Рис. 2.2. Схема возникновения пьезоэффекта:
 a – структура кварца в направлении оси Z ; b – поперечный и $в$ – продольный пьезоэффект

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 :

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

Это позволяет путём 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 ёмкости C , образуемой обкладками пластины

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

Порядок выполнения работы

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 помещён в изолирующий корпус 3 , в верхнюю крышку которого вставлен нагружающий шток 2 с платформой для размещения гирь.

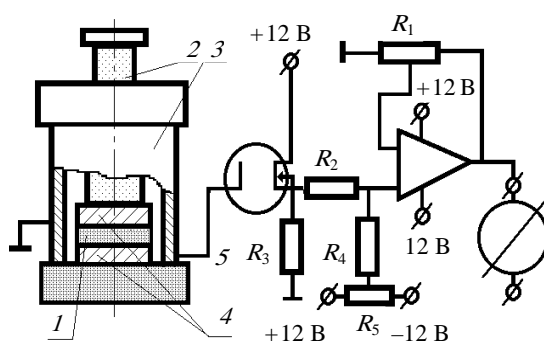


Рис. 2.3. Схема экспериментальной установки

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 подаётся 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.

Ёмкость 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 отчёта

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. Расчёт 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.

Литература: [3, с. 237 – 255].

Лабораторная работа 3

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ТРАВЛЕНИЯ

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

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

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 объёмные.

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

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

Примерами плоских дефектов являются границы зёрен 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 зёрен. На поверхности кристалла (даже самого идеального) нарушается его важнейшее свойство – трансляционная симметрия, рвутся межатомные связи, возникает поверхностное натяжение.

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

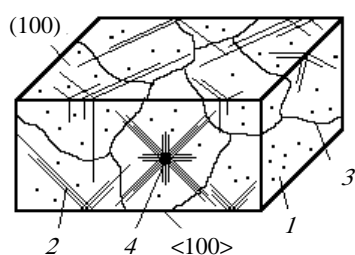


Рис. 3.1. Структура монокристалла после травления

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 решётки 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.

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 субзёрен. 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 лёгких 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^x.

3. Зарисовать форму фигуры травления дислокации и указать на эскизе направления <100> и <110> с учётом того, что рёбра (края) монокристалла имеют ориентировку <100>.

4. Определить плотность дислокации роста ρ_d (см⁻²)

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

где N – число выходов дислокаций на площади поверхности F (см²).

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

6. Найти и зарисовать тройной стык субграниц 3 (рис. 3.1) и определить угол разориентировки соседних зёрен θ .

Для малоугловой границы наклона справедлива формула Риды:

$$\theta = b / D,$$

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 отчёта

1. Название и цель работы.
2. Тип микроскопа, его характеристика, тип кристалла, состав травителя.
3. Методика определения плотности дислокаций и угла разориентировки субзёрен.
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 зёрен.
6. Дислокационная модель границы субзёрен.
7. Механизм неконсервативного движения (восхождения) краевой дислокации.

Литература: [4, с. 60 – 93]; [3, с. 297 – 336].

Лабораторная работа 4

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА МИКРОТВЁРДОСТЬ КРИСТАЛЛОВ

Цель работы: освоить методику измерения микротвёрдости монокристаллов. Изучить влияние облучения на микротвёрдость кристаллов-диэлектриков.

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

Методические указания

Точечные дефекты в кристалле образуются в процессе роста, пластической деформации или термообработки. Равновесная концентрация вакансий в кристалле растёт 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 твёрдого тела занимают дефекты, возникающие в кристалле под действием ионизирующего облучения или частиц высоких энергий – радиационные дефекты. Действие радиации на кристалл создаёт 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 твёрдости, 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 внедрённых атомов.

Порядок выполнения работы

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

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

Микротвёрдость вычисляют по формуле

$$H_{\mu} = \frac{P}{F_{\text{отп}}} = 2 \frac{P}{a^2} \sin \frac{\alpha}{2} = 18,54 \frac{P}{a^2}, \quad [\text{МН/м}^2], \quad (4.1)$$

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

2. Получить у преподавателя и измерить микротвёрдость кристаллов LiF, облучённых потоком электронов или рентгеновскими лучами с различным временем воздействия τ (интенсивность излучения считать постоянной).

На каждом облучённом кристалле следует произвести три замера и вычислить среднее значение микротвёрдости и дисперсию $S_{\bar{x}}$ ($p = 95\%$).

3. Полученные результаты записать в табл. 4.1 и построить график $H_{\mu} = f(\tau)$.

4.1. Результаты измерения твёрдости

τ , ч	Диагональ отпечатка, мкм			H_{μ} , МН/м ²				
	a_1	a_2	a_3	X_1	X_2	X_3	\bar{X}	$S_{\bar{X}}$

Содержание отчёта

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

Контрольные вопросы

1. Геометрия и классификация точечных дефектов.
2. Причины возникновения точечных дефектов.
3. Влияние точечных дефектов на свойства кристаллов.
4. Определение твёрдости кристаллов.

Литература: [3, с. 288 – 297].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЁННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА

Цель работы: экспериментальное определение ширины запрещённой зоны полупроводника на основании измерений температурной зависимости электропроводимости.

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

Методические указания

Физические свойства твёрдых 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 твёрдое 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. 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 решётке. 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.

Если мы рассматриваем изолированный электрон (в вакууме), то он может иметь любые значения энергии (любая точка на оси энергии на рис. 5.1, а). Поэтому, если эмитировать в вакуум электроны, они будут носителями тока.

В отдельном атоме (например, в идеальном газе, где можно пренебречь межатомным взаимодействием) электрон может иметь лишь дискретные уровни энергии E_i (рис. 5.1, б), все остальные значения – запрещены (величина энергетического барьера порядка 1 электрон-вольта). Это объясняется волновыми свойствами движущегося в атоме электрона и условиями устойчивости (стационарности) его орбиты. Считается, что эти уровни зависят от главного n и орбитального l квантовых чисел. Энергетические уровни,

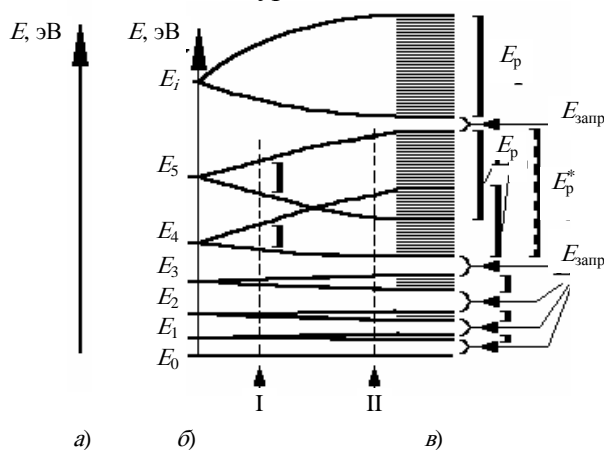


Рис. 5.1. Изменение энергии электронов:

а – свободный электрон; б – электрон в отдельном атоме;
в – расщепление энергетических уровней при сближении атомов
и образовании кристалла

соответствующие различным значениям магнитного m и спинового числа m^S , совпадают. Электрон в отдельном атоме не может менять свою энергию под действием электрического поля, поэтому газы являются хорошими изоляторами (при умеренном напряжении).

При образовании кристалла отдельный энергетический уровень электрона в изолированном атоме расширяется в широкую полосу – зону разрешённых значений энергии электронов (порядка единиц электрон-вольт). Разрешённые энергетические зоны отделены друг от друга запрещёнными зонами значений энергии электронов (рис. 5.1, в). Разрешённая 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 $(2I + 1)N$ дискретных уровней, на каждом из которых может находиться не более двух электронов с антипараллельными спинами. Шаг дискретности для 1 Моля кристаллического вещества ($N = 6,02 \cdot 10^{23}$ атомов) составляет энергию порядка 10^{-23} эВ. 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.

Тип кристаллической решётки и расстояние между атомами определяют характер и величину расширения энергетических зон. Поэтому некоторые полиморфные вещества могут при одном расстоянии между атомами (положение I на рис. 5.1, в) быть изоляторами (алмаз), а если разрешённые зоны перекрываются в процессе расщепления (положение II на рис. 5.1, в), то образуется гибридная зона E_p^* , и вещество ведет себя как проводник.

В зонной теории твёрдого тела различия в электрических свойствах разных типов твердых тел объясняются различным заполнением разрешённых энергетических зон. Поэтому все кристаллы можно разделить на две большие группы – проводники и непроводники.

В проводниках при абсолютном нуле валентная зона заполнена электронами не полностью, поэтому при воздействии даже самого слабого электрического поля электроны могут ускоряться в нём и переходить на более высокие уровни (рис. 5.2, а). Поэтому в проводниках валентная зона V одновременно является зоной проводимости C (расположенные выше следующая разрешённая и запрещённая зоны совершенно не влияют на электропроводность!).

В непроводниках (полупроводниках и изоляторах) при абсолютном нуле все разрешённые уровни валентной зоны V заполнены полностью электронами (рис. 5.2, б, в). Для перехода электрона из нижней разрешённой энергетической зоны в верхнюю необходима энергия, равная ширине запрещённой зоны E_g , лежащей между ними (рис. 5.2, б):

$$E_g = E_c - E_v,$$

где E_g – ширина запрещённой зоны; E_c – дно зоны проводимости; E_v – потолок валентной зоны. Поэтому при 0 К (-273 °С) и полупроводник и изолятор не могут пропускать электрический ток – при этой температуре в них нет электронов, способных ускоряться в электрическом поле.

При нагревании непроводников атомы и электроны будут получать тепловую энергию $Q \approx kT$, где k – постоянная Больцмана, T – температура. Если она окажется больше ширины запрещённой энергии $Q > E_g$, то электрон,

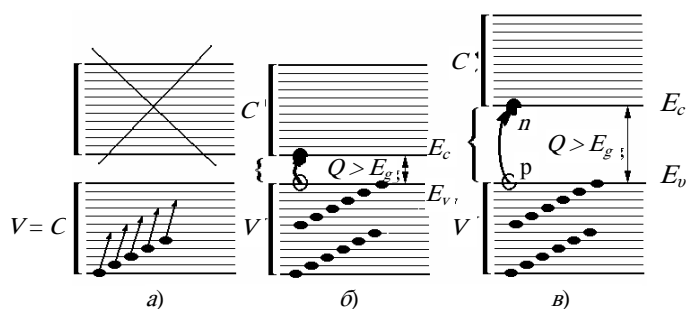


Рис. 5.2. Зонная структура кристаллов:

а – проводники; б – полупроводники; в – изоляторы

находящийся в валентной зоне, может перескочить на свободный энергетический уровень в зоне проводимости. Здесь он уже сможет увеличивать свою энергию, а значит, станет носителем тока (такой электрон называют *электроном проводимости* n). Одновременно с этим под действием термической активации в валентной зоне появляется свободный энергетический уровень, который может занять (ускоряясь электрическим полем) другой электрон. При этом свободный энергетический уровень (его называют *дырка* p), будет двигаться вниз по энергии.

Чем выше температура (или интенсивнее облучающий полупроводник поток излучения или быстрых частиц), тем больше концентрация электронно-дырочных пар, тем меньше электрическое сопротивление непроводника.

Изоляторы отличаются от полупроводников существенно большей шириной запрещённой зоны (для алмаза $E_g \approx 7$ эВ, для кремния $E_g \approx 1,1$ эВ), поэтому с ростом температуры их удельное сопротивление меняется мало.

На рис. 5.3 приведены графики зависимости сопротивления от температуры. Из них видно, что сопротивление металла при $T = 0$ стремится к нулю, в то время как для полупроводников и диэлектриков оно приближается к бесконечности.

Таким образом, различия в электропроводности (величине обратной сопротивлению) между металлами и полупроводниками – качественное, а между полупроводниками и диэлектриками – количественное.

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

В реальных полупроводниках всегда присутствуют атомы другого сорта, которые введены специально или присутствуют случайно. Их влияние на зонную структуру, а значит и на электропроводность материала зависит от размера атомов, валентности и других характеристик. Посторонние атомы, взаимодействуя с кристаллической решёткой полупроводника, могут в его запрещённой зоне (близко к зоне проводимости или глубокие разрешённых зон).

Так, при введении в четырёх-валентный кремний атомов фосфора из V группы системы Менделеева, они образуют примесный уровень около дна зоны проводимости. При ионизации атомов фосфора и существенно меньше: при 293 К электроны в зону проводимости.

Такой полупроводник имеет n -тип проводимости.

При введении в кремний атомов бора образуют примесный уровень в валентной зоне. В результате захвата электронов из валентной зоны атомами бора в ней образуются свободные энергетические уровни. Обычно при комнатной температуре концентрация дырок определяется количеством атомов примеси-акцептора.

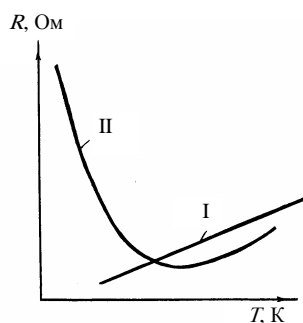


Рис. 5.3. Зависимость сопротивления твёрдых тел от температуры:

1 – металлы; 2 – полупроводники и диэлектрики

Концентрация примесных электронов n атомов фосфора, введённых в кремний.

трёхвалентного бора его атомы около потолка валентной зоны. В результате захвата электронов из валентной зоны атомами бора в ней образуются свободные энергетические уровни. Обычно при комнатной температуре концентрация дырок определяется количеством атомов примеси-акцептора.

Удельная проводимость полупроводника описывается соотношением

$$\sigma_i = e(n\mu_n + p\mu_p), \quad (5.1)$$

где n_i и p_i – концентрации электронов и дырок в собственном полупроводнике; μ_n, μ_p – их подвижности.

Учитывая зависимость концентрации носителей заряда от температуры, получим

$$\sigma_i = \sigma_0 \exp(-E_g / 2kT), \quad (5.2)$$

где σ_0 – константа; E_g – ширина запрещённой зоны; k – постоянная Больцмана.

Логарифмируя (5.2), находим

$$\ln \sigma_i = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2k} \frac{1}{T}. \quad (5.3)$$

В координатах $\ln \sigma = f(1/T)$ – это линейная зависимость, по углу наклона которой можно определить ширину запрещённой 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. 5.4).

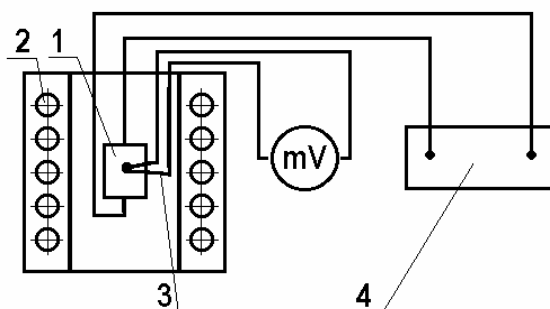


Рис. 5.4. Схема установки для изучения зависимости электросопротивления полупроводников от температуры:

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. 5.1.

5.1. Влияние температуры на электропроводность полупроводника

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

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

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

Содержание отчёта

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. Расчёт ширины запрещённой зоны.
6. Сравнение полученных данных со справочными.

Контрольные вопросы

1. Образование энергетических зон: валентная, запрещённая 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.

Литература: [8, с. 142 – 171, 190 – 193]; [19, с. 5 – 19].

Лабораторная работа 6

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

$$E_H = R_H j B, \quad (6.1)$$

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

Поскольку в эксперименте измеряется разность потенциалов и ток, а не напряжённость электрического поля и плотность тока, то выражение (6.1) удобнее представить в виде

$$U_H = R_H I B / d, \quad (6.2)$$

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

Постоянная Холла связана с параметрами полупроводника выражением:

$$R_H = \frac{r}{e} \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p + n\mu_n)^2}, \quad (6.3)$$

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

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

электронов
$$R_H = -r \frac{1}{pe}; \quad (6.4)$$

дырок
$$R_H = r \frac{1}{pe}. \quad (6.5)$$

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

$$\mu = |R_H| \sigma. \quad (6.6)$$

Тип носителей можно определить с помощью рис. 6.1.

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

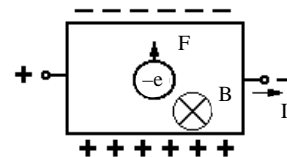


Рис. 6.1. Схема определения типа носителей заряда:
 I – ток; B – напряжённость магнитного поля;
 F – сила Лоренца

Порядок выполнения работы

1. Изучить схему установки (рис. 6.2). 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 .

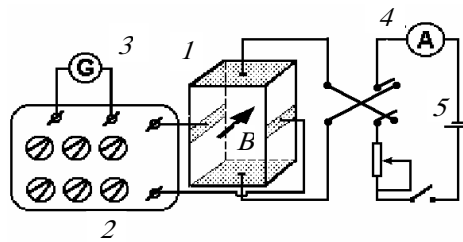


Рис. 6.2. Схема для измерения эффекта Холла:

1 – образец; 2 – потенциометр; 3 – гальванометр; 4 – амперметр; 5 – источник тока

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_p . Данные занести в табл. 6.1. 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 учётом знака поправки. Измерения повторить трижды. Результаты занести в табл. 6.1.

6.1. Измерение ЭДС Холла

№ п/п	I, мА	U _{m1}	U _{m2}	U _{m3}	U _{m2} , мВ	U ₀₁	U ₀₂	U ₀₃	U ₀ , мВ	U _H , 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 отчёта

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. Расчёт 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 её связь с параметрами носителей заряда.
6. Эффективная масса носителей заряда. Понятие дырки.

Литература: [8, с. 265 – 270]; [9, с. 19 – 28].

Лабораторная работа 7

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

$$F = e^2 / 16 x^2, \quad (7.1)$$

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

$$I = AT^2 \exp(-\chi_0 / kT), \quad (7.2)$$

где A – постоянная Ричардсона; χ_0 – работа выхода электрона; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Постоянная Ричардсона связана с характеристиками электрона следующим образом

$$A = 4m_n k^2 e / h^3, \quad (7.3)$$

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

Логарифмируя выражение (7.2), 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

$$\ln \frac{I_{\text{нас}}}{T^2} = \ln A - \frac{\chi_0}{k} \frac{1}{T}. \quad (7.4)$$

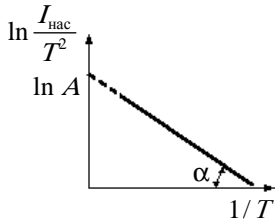


Рис. 7.1. Зависимость тока термоэмиссии от температуры

Как видно из рис. 7.1, эта зависимость представляет собой прямую линию с углом наклона α ($\text{tg}\alpha = \chi_0/k$), отсекающую на оси координат величину, равную $\ln A$.

В данной работе определение работы выхода электрона основано на использовании вольтамперных характеристик (ВАХ) диода (рис. 7.2).

Диодом служит манометрическая лампа 1 типа ПМИ-2 с вольфрамовым катодом прямого накала, подключённым 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 подаётся через трансформатор 4, питаемый от переменного тока.

При включении трансформатора 4 на электроды лампы 1 подаётся напряжение, возникающее на его вторичной обмотке. Пропорциональный напряжению сигнал, возникающий на делителе, подаётся на пластины горизонтального отклонения луча осциллографа 3.

Через резистор R_2 , включённый 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, включённого в цепь накала.

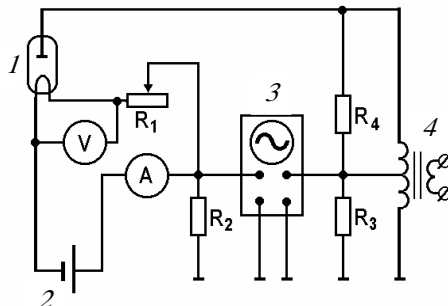


Рис. 7.2. Электронная схема установки

Температура катода находится путём интерполяции из табл. 7.1 по значению удельной мощности $P/l d$, где l – длина катода; d – его диаметр. Для применяемой лампы ПМИ-2 значение $l d = 6 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

7.1. 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 её 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 её преподавателю. Самостоятельное включение установки запрещается.

2. Включить осциллограф, пользуясь инструкцией, прилагаемой к нему. Проградуировать ось U 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 вольт-амперные характеристики (ВАХ) ПМИ-2;

– увеличив накал катода реостатом, добиться вида ВАХ с явно выраженным участком насыщения, как показано на рис. 7.3;

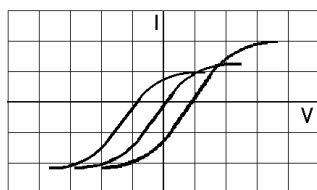


Рис. 7.3. Серия вольт-амперных характеристик

– зарисовать на кальку с сохранением линейных масштабов экрана вид серий ВАХ, полученных с разным током накала;

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

– по табл. 7.1 определить температуру катода T ;

– измерить ток насыщения;

– все данные занести в табл. 7.2.

7.2. Результаты измерения термоэмиссии

$I_{\text{нак}}$, А	$U_{\text{нак}}$, В	P , Вт	P / Id , Вт/см ²	$I_{\text{нас}}$, мА	T , К	$1 / T$, К ⁻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 (7.3) и (7.4), определить работу выхода, постоянную Ричардсона и эффективную массу электрона; сравнить её с табличным значением.

Содержание отчёта

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. Расчёт работы выхода и эффективной массы электрона.
6. Результаты эксперимента и сравнение их со 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.

Литература: [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 фотосопротивления показано на рис. 8.1.

На стеклянную подложку *1* наносят путём катодного распыления слой металла *2* – электроды, а между ними – путём испарения в вакууме – тонкий слой *3* соответствующего полупроводника. Иногда этот слой наносят и путём 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.

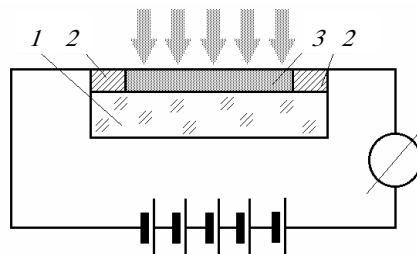


Рис. 8.1. Схема устройства и включения в цепь фоторезистора

К наиболее распространённым 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

- Перед включением приборов в сеть следует убедиться в том, что:
 - на приборе ИФС переключатель В3 находится в положении "2 мА";
 - переключатель пределов на "Фотоне" – в положении "1";
 - ручки R13, R7 и В2 – в крайнем левом положении.
- Снять вольтамперные характеристики ФР для трёх значений освещённости *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 освещённости. 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 освещённости, пользуясь графиком (рис. 8.2). Закрыть шторку камеры ИФС-1;

– для первого значения освещённости, не меняя накала лампы 13, снять вольтамперные характеристики

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

где U – напряжение на ФР изменяется ручками В2 и R7 ("грубо", "плавно") и отсчитывается по прибору "К₂" на выносной панели.

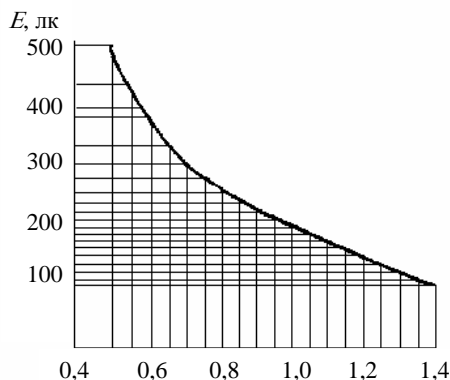


Рис. 8.2. Градуировочный график для определения освещённости на приборе "Фотон" (предел "10")

Значение фототока I_{ϕ} отсчитывается по прибору "К" при положении переключателя В3 – "2 мА".

Для построения графика необходимо снять 10 значений.

Резистором R13 изменить значение освещённости E и вновь снять вольтамперную характеристику.

Все данные свести в табл. 8.1.

По данным табл. 8.1 построить графики $I_{\phi} = f(U)$ для трёх значений освещённости в одних координатах.

8.1. Измерение вольт-амперных характеристик фоторезистора

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

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

$$I_{\phi} = I_0 \exp(-t/\tau), \quad (8.1)$$

где I_0 – установившийся фототок в условиях постоянной освещённости фоторезистора; t – время, с; τ – время жизни носителей, с. Логарифмируя зависимость (8.1), получим

$$\ln I_{\phi} = \ln I_0 - t/\tau, \quad (8.2)$$

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

5. Наложить на кривую фототока (рис. 8.3) 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 развёртки фотобумаги в осциллографе 125 мм/с.

6. Определить значения фототока по кривой спада через равные промежутки времени, взять их логарифмы и полученные данные записать в виде табл. 9.2.

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

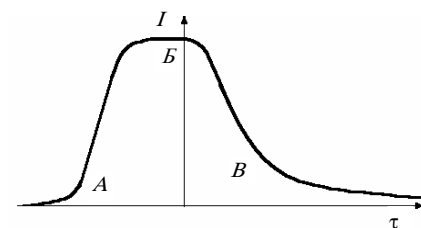


Рис. 8.3. Кривая спада фототока

8.2. Измерение затухания фототока

t, c	I_{ϕ}, mA	$\ln I_{\phi}$

Содержание отчёта

1. Название и цель работы.
2. Тип приборов.
3. Методика измерения вольт-амперных характеристик и времени жизни неравновесных носителей.
4. Таблицы экспериментальных данных, графики вольтамперных характеристик и кривая спада фототока.
5. Расчёт 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.

Литература: [8, с. 318 – 344]; [9, с. 87 – 97]; [10, с. 111 – 118].

Лабораторная работа 9

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТОНКИХ ПЛЁНОК

Цель работы: изучение зависимости удельного электросопротивления тонких металлических плёнок от их толщины. Освоение методики измерения толщины тонких плёнок методом интерференции.

Приборы и принадлежности: микроинтерферометр МИИ-4, омметр Щ 3009, образцы тонкоплёночных резисторов.

Методические указания

Тонкие металлические плёнки 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 при тепловых колебаниях кристаллической решётки, поэтому температурный коэффициент сопротивления α_p (ТКС) у металлов положительный. Дефекты кристаллического строения (в том числе и поверхность кристалла) также увеличивают электро-сопротивление проводников.

Структура и свойства тонкой металлической плёнки зависят от технологии её нанесения на диэлектрическую подложку и от её толщины (рис. 9.1).

На первых стадиях (образование зародышей, первичная и вторичная коалесценция) формируется островковая структура из кристаллов-проводников, разделённых свободными участками диэлектрической подложки. Удельное сопротивление такого материала определяется поверхностной электропроводностью диэлектрика и возможностью термоэмиссии и туннелирования электронов между участками металла. Поэтому при толщинах меньше 10^{-3} мкм плёнка ведёт себя как диэлектрик – высокое сопротивление ρ и отрицательный ТКС α_p (участок 1).

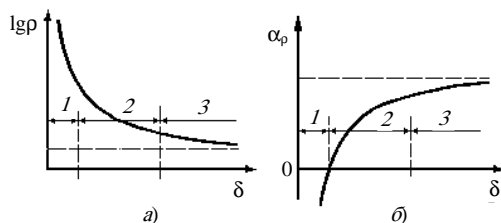


Рис. 9.1. Зависимость удельного сопротивления (а) и ТКС (б) тонкой металлической плёнки от её толщины

Дальнейшее увеличение островков приводит к образованию мостиков – перешейков и полному за-растанию подложки поли- и монокристаллической металлической плёнки. Такой материал ведёт себя уже как проводник (участок 2) ($\alpha_p > 0$), но его удельное электросопротивление ρ заметно больше, чем у массивного металла (пунктир). Причиной этого является высокая концентрация дефектов роста в плёнке и влияние её поверхностей.

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

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

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

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

Порядок выполнения работы

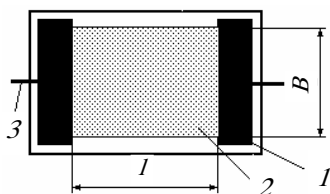


Рис. 9.2. Схема тонкоплёночного резистора:
1 – медные контактные площадки; 2 – плёнка хрома; 3 – электроды

1. Включить омметр в сеть и дать прогреться 5 – 10 минут.
2. Измерить сопротивление R тонкоплёночных образцов (рис. 9.2), подсоединив щупы омметра к их контактам 3.
3. Измерить длину l и ширину b тонкоплёночных резисторов 2 с помощью линейки.
4. Измерить толщину плёнки в каждом образце с помощью микроинтерферометра МИИ-4.

Этот прибор широко применяется в приборостроении для изучения и контроля тонкоплёночных 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 неё света пластинка

отражает, половину пропускает, вследствие чего образуются две системы волн, способных интерферировать.

В результате интерференции двух систем волн в фокальной плоскости окуляра наблюдаются 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 λ – 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. – тёмные полосы.

На рис. 9.3 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 на объектив 4 и фокусируется на поверхности объекта 5. Отразившись от неё, 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 плёнки образец надо положить на объектный столик прибора слоем вниз.

Для фокусировки изображения плёнки 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 плёнки шторку открывают (ручка против часовой стрелки) и в центре окуляра одновременно наблюдают картину интерференции (рис. 9.4).

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

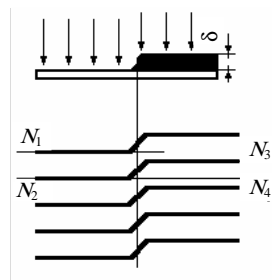
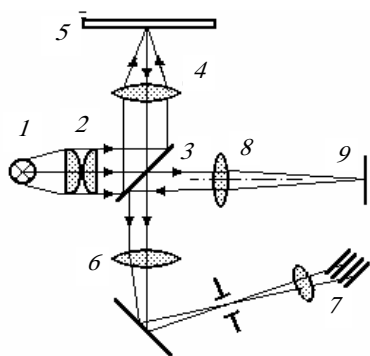


Рис. 9.3. Схема оптической системы микроинтерферометра

Рис. 9.4. Схема образования и обмера интерференционной картины

При использовании белого света минимумы картины (тёмные полосы) окрашены в цвета радуги. Для измерений обычно используют два первых минимума чёрного 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 отчёты N_1, N_2, N_3, N_4 (рис. 9.4).

Рассчитать толщину плёнки по формуле

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

1. Все результаты измерений занести в табл. 9.1.

9.1. Измерение электропроводности тонких плёнок

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

2. Рассчитать удельное сопротивление металла тонкой плёнки

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

Содержание отчёта

1. Название и цель работы.
2. Схема тонкоплёночного резистора.
3. Оптическая схема МИИ-4 и описание методики измерения толщины тонких плёнок.
4. Таблица экспериментальных данных и кривая зависимости $\lg \rho = f(\delta)$.

Контрольные вопросы

1. Стадии роста тонких плёнок.
2. Методы получения тонких плёнок.
3. Электропроводность тонких плёнок.
4. Методика измерения толщины плёнок методом интерференции.
5. Сопротивление квадрата плёнки.

Литература: [10, с. 480 – 521].

Лабораторная работа 10

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.

Методические указания

Изменение межатомного потенциала вблизи поверхности твёрдого тела приводит к появлению в запрещённой зоне полупроводника разрешённых 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 объёмного 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 объёмом полупроводника и, следовательно, искривление энергетических зон.

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

На рис. 10.1 показана зонная структура n -полупроводника, у которого поверхность заряжена отрицательно (E_i – середина запрещённой 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 ды-

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

В области обеднения I (рис. 10.1) концентрация основных носителей заряда (электронов) уменьшается и в сечении $A - A$ полупроводник становится собственным. При высокой плотности поверхностного заряда по знаку, совпадающему 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. 10.1). 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. 10.2).

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 счёт повышения объёмной плотности, которая может меняться неограниченно. Поэтому ёмкость 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 ёмкости 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_B , за которым располагается неподвижный положительный заряд ионизированных доноров Q_C . Суммарный заряд $Q = Q_B + Q_C$ увеличивается, а толщина заряженного слоя, образованного зарядом Q_B , почти не зависит от приложенного напряжения. Поэтому в состоянии инверсии ёмкость структуры перестаёт зависеть от внешнего напряжения.

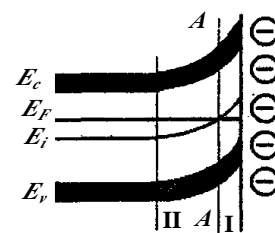


Рис. 10.1. Зонная структура n -полупроводника, поверхность которого заряжена отрицательно

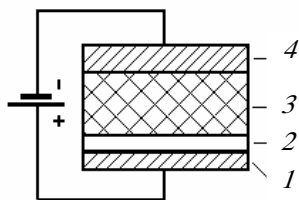


Рис. 10.2. Схема МДП-структуры

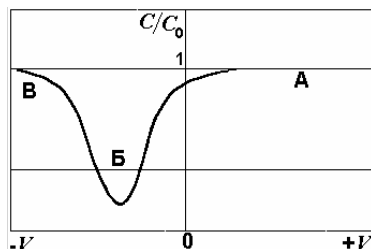


Рис. 10.3. Вольт-фарадная характеристика МДП-структуры

График изменения ёмкости МДП-структуры от внешнего напряжения приведён на рис. 10.3. 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 включён 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

$$Q = I_m t_3, \quad (10.1)$$

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.

10.1. Результаты измерений поверхностного заряда

U, В	Ток зарядки, мкА						Q, Кл	C, Ф
	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I		

7. Подождать, когда напряжение на вольтметре восстановится, и повторить измерения. Произвести не менее 5 измерений при одном значении высокого напряжения. Результаты занести в табл. 10.1.
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 (10.1).
10. Рассчитать значение ёмкости 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 отчёта

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

Контрольные вопросы

1. В чём 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.

Литература: [8, с. 250 – 254].

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 двух примесных 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. 11.1). До соприкосновения в обоих полупроводниках электроны, дырки и неподвижные ионы были распределены равномерно (рис. 11.1, 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, лишённый подвижных носителей заряда и поэтому обладающий высоким электрическим сопротивлением, так называемый запирающий слой (рис. 11.1, б). Толщина запирающего слоя обычно не превышает нескольких микронметров.

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) ϕ_k на границе полупроводников (рис. 11.1, в). Возникшая разность потенциалов создаёт 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 то же 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 ϕ_k . Это позволяет некоторой части основных носителей, обладающих достаточной энергией, преодолеть

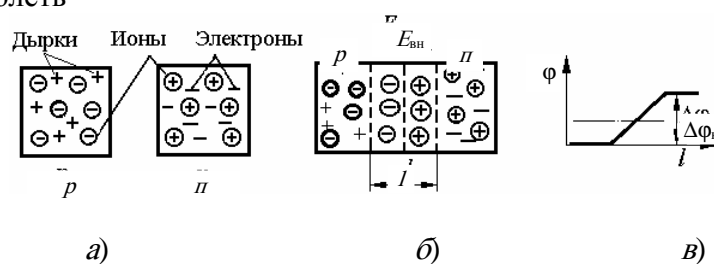
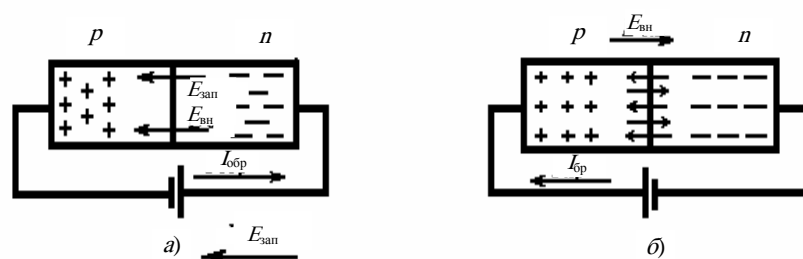
Рис. 11.1. Образование p - n -перехода

Рис. 11.2. Электронно-дырочный переход во внешнем электрическом поле:
a – приложено обратное напряжение; *б* – прямое напряжение

потенциальный барьер, вызванный контактной разностью потенциалов ϕ_k . Появляется диффузионный ток $I_{\text{диф}}$, который направлен навстречу дрейфовому току $I_{\text{др}}$, т.е. возникает динамическое равновесие, при котором $I_{\text{др}} = I_{\text{диф}}$.

Если к *p-n*-переходу приложить внешнее напряжение, которое создаёт в запирающем слое электрическое поле напряжённостью $E_{\text{вн}}$, совпадающее по направлению с полем неподвижных ионов напряжённостью $E_{\text{зап}}$ (рис. 11.2), то это приведёт лишь к расширению запирающего слоя, так как отведёт 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*.

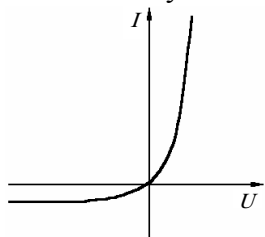


Рис. 11.3. Вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода

Таким образом, *p-n*-переход обладает несимметричной вольт-амперной характеристикой (рис. 11.3). 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

1. Собрать установку (рис. 11.4).
2. Включить источник питания.
3. Включить осциллограф. Используя инструкцию по эксплуатации, получить устойчивое изображение вольт-амперной характеристики (рис. 11.3); скопировать её на кальку.
4. Измерить U и привести напряжение на входе Y к величине тока I , протекающего через диод. Результаты занести в табл. 11.1.

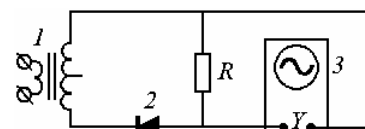


Рис. 11.4. Схема экспериментальной установки:
 1 – трансформатор; 2 – диод;
 3 – осциллограф

Построить вольт-амперную характеристику диода.

11.1. Зависимость напряжения от тока для полупроводникового диода

I , мА				
U , В				

Содержание отчёта

1. Название и цель работы.
2. Принципиальная схема установки.
3. Калька сигнала.
4. Вольт-амперная 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?

Литература: [8, стр. 214 – 240].

Лабораторная работа 12

ГЕТЕРОЭПИТАКСИЯ

Цель работы: изучить закономерности эпитаксиального роста тонких плёнок из раствора.

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

Методические указания

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

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

Для гетероэпитаксии важнейшим условием является структурно-геометрическое соответствие кристаллов нарастаемого 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 (решётка типа алмаза) нарастает на плоскость (0001) Al_2O_3 (типа корунд), являющуюся поверхностью подложки. Параллельны и направления в двух кристаллах – $[112] \text{Si}$ и $[1100]$ корунда. Если сращиваемые вещества имеют близкие структурные типы и параметры решётки (разница не больше 10 %), наблюдается явление *псевдоизоморфизма* – плёнка имеет точно такую же структуру, как и подложка: $[100] (100) \text{Au} // [100] (100) \text{Ag}$. Однако с ростом толщины плёнки упругие искажения, связанные с разницей параметров (для золота $a = 2,88 \text{ \AA}$, серебра $a = 2,89 \text{ \AA}$), увеличиваются. Поэтому при толщинах больше критической (для Au/Ag – 600 \AA) после псевдоизоморфного переходного слоя будет собственная решётка золота.

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

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

Эпитаксиальная структура тонкой плёнки закладывается на ранних стадиях её роста (рис. 12.1, а). После адсорбции атомов или молекул вещества на подложку 1 в результате поверхностной диффузии появляются плоские зародыши 2, кристаллическая решётка 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 плёнки – первичной коалесценции (рис. 12.1, б) – эти "дефектные" зёрна 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 самоограняются. При вторичной коалесценции из плоских они становятся трёхмерными. На стадии образования "мостиков" они сраста-

ются своими гранями и постепенно заполняют всю поверхность подложки, сливаясь в одну монокристаллическую плёнку.

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

Эпитаксиальной температурой называется температура подложки, ниже которой растёт только неориентированная, т.е. поликристаллическая плёнка.

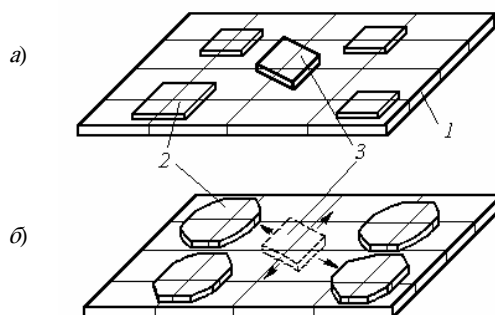


Рис. 12.1. Образование эпитаксиальной плёнки:

а – появление зародышей, *б* – первичная коалесценция

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 плёнки 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 счёт этого концентрация соли в растворе увеличивается и достигает её 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 влияют и тип подложки – активная (эпитаксиальная) или пассивная (аморфная), состав раствора и другие факторы.

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

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.

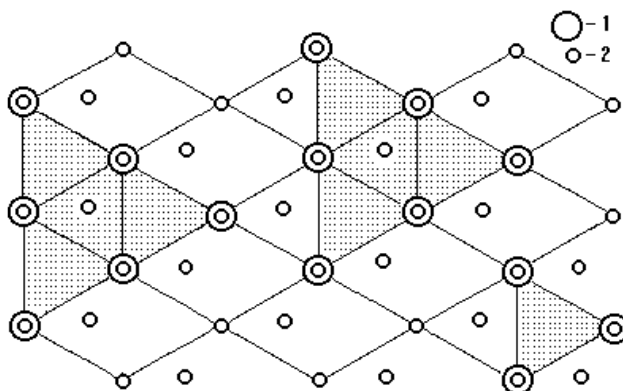


Рис. 12.2. Совпадение плоских атомных сеток слюды (2) и йодистого калия (1)

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

Параметры решётки вдоль [100] у слюды ($a = 5,18 \text{ \AA}$) и по [100] для KI ($a = 4,99 \text{ \AA}$) близки. Поэтому при наложении плоских сеток (111) KI и (001) слюды (рис. 12.2) 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 %-ного 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 отчёта

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 плёнок.
5. Эпитаксия. Виды эпитаксии.
6. Структурные условия эпитаксии.
7. Влияние температуры подложки на структуру плёнки. Температура эпитаксии.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустыльник, Б.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Б.И. Пустыльник. – М. : Наука, 1968. – 288 с.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики. Т. 2. / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1987. – 496 с.
3. Шаскольская, М.П. Кристаллография / М.П. Шаскольская. – М. : Высшая школа, 1984. – 376 с.
4. Пшеничников, Ю.П. Выявление тонкой структуры кристаллов / Ю.П. Пшеничников. – М. : Металлургия, 1974. – 521 с.
5. Лившиц, Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лившиц. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
6. Лахтин, Ю.М. Metalловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1976. – 407 с.
7. Гуляев, А.П. Metalловедение / А.П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1986. 544 с.
8. Епифанов, Г.И. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ЭВА / Г.И. Епифанов, Ю.А. Мома. – М. : Советское радио, 1979. – 352 с.
9. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам / под ред. К.В. Шалимовой. – М. : Высшая школа, 1968. – 277 с.
10. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – М. : Высшая школа, 1986. – 367 с.