

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины**

Н.А. АЛЕШКЕВИЧ, С.Д. БАРСУКОВ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

**Рекомендовано УМО вузов Республики Беларусь
по естественнонаучному образованию в качестве пособия для студентов
учреждения высшего образования, обучающихся по специальности
1-31 04 01 «Физика (по направлениям)».**

**Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2014**

УДК 539.1.08; 621.386.82

ББК 22.3я73

А 518

Рецензенты:

доктор физ.-мат. наук, профессор Г.С. Митюринч;
кандидат физ.-мат. наук, доцент П.В. Астахов;
кафедра оптики учреждения образования «Гомельский
государственный университет имени Ф. Скорины»

Рекомендовано к изданию научно – методическим советом учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

А 518 Алешкевич Н.А.
Физические основы электроники: практическое пособие по дисциплине специализации для студентов физических специальностей / Н.А. Алешкевич, С.Д. Барсуков; М-во обр. РБ, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2014. – 80 с.

Целью практического пособия является оказание помощи студентам специализации «Физическая метрология и автоматизация эксперимента» в овладении физическими основами электроники, теоретическими аспектами физики твердого тела, физическими принципами работы электронных устройств и ознакомление с методами измерения параметров материалов и структур, применяемых в электронной технике.

УДК 539.1.08; 621.386.82

ББК 22.3я73

© Алешкевич Н.А., Барсуков С.Д., 2014

© УО «Гомельский государственный университет им. Ф.Скорины», 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Тема 1 Изучение свойств активных пьезоэлектриков.....	5
Тема 2 Изучение свойств электронно-дырочного перехода (p-n перехода).....	11
Тема 3 Изучение физических принципов эффекта Холла.....	19
Тема 4 Изучение двух- и четырехзондового метода измерения удельного сопротивления полупроводников.....	27
Тема 5 Изучение свойств фазовых переходов в сегнетоэлектриках.....	37
Тема 6 Измерение удельного сопротивления методом Ван-дер-Пау.....	44
Тема 7 Исследование температурной зависимости электропроводности полупроводников.....	51
Литература.....	60
Приложение А Основные понятия теории измерений.....	61
Приложение В Обработка результатов измерений.....	73

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительно расширилась область науки о строении вещества, в частности – физики твердого тела. Существенно преобразовалась полупроводниковая электроника, в которой все более используются сложные структуры из материалов различной природы. Созданы новые типы твердотельных лазеров, фото- и светодиодов. Для специалиста в области современной физической метрологии здесь открываются широкие возможности для деятельности.

Курс "Физические основы электроники" является одной из дисциплин специализации "Физическая метрология и автоматизация эксперимента" и является продолжением курса "Строение и методы исследования вещества". В рамках данного курса рассматриваются основные вопросы, касающиеся особенностей электронного строения кристаллических веществ, рассматривается природа проводимости, физические явления при контактах разнородных материалов. Дается обзор основных эффектов, имеющих место при взаимодействии полупроводниковых и диэлектрических материалов с электромагнитными и световыми полями. Рассмотрены физические принципы работы электронных устройств и вопросы измерения параметров материалов электронной техники.

Предлагаемое практическое пособие содержит описания семи учебных лабораторных работ по спецкурсу.

Целью практического пособия по спецкурсу "Физические основы электроники" является овладение студентами основ физики твердого тела, рассмотрение физических принципов работы элементов твердотельной электроники и ознакомление с методами измерения параметров материалов, структур и устройств.

Практическое пособие включает "Основные понятия по теме", отражающие ее содержание и соответствующие учебной программе спецкурса.

В описаниях лабораторных работ традиционно указаны цели работы, используемые материалы и оборудование, схемы и краткие характеристики приборов и установок, последовательность действий при подготовке и проведении измерений. Наличие фотографий и схем приборов, используемых в лабораторных работах, делает материал пособия иллюстрированным и доступным в практическом использовании в рамках аудиторной и самостоятельной работы студентов. В приложениях приведены основные понятия теории измерений и порядок обработки результатов. Список литературных источников по всем изложенным в пособии темам и вопросам, рассматриваемым в рамках дисциплины специализации "Физические основы электроники", приведен в конце практического пособия.

Тема 1

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ АКТИВНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКОВ

1. Активные диэлектрики, пьезоэлектрики
2. Пьезоэлектрический эффект
3. Кварцевые резонаторы
4. Резонанс механический и электрический

Основные понятия по теме

Активными диэлектриками, или управляемыми диэлектриками, принято называть такие диэлектрики, свойства которых существенно зависят от внешних условий – температуры, давления, напряженности поля и так далее. Такие диэлектрики могут служить рабочими телами в разнообразных датчиках, преобразователях, генераторах, модуляторах и других активных элементах.

К активным диэлектрикам относят сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты и др. Строгая классификация активных диэлектриков невозможна, поскольку один и тот же материал может проявлять признаки различных активных диэлектриков. Так, сегнетоэлектрики часто сочетают свойства пьезоэлектриков. Кроме того, нет резкой границы между активными и пассивными диэлектриками. Один и тот же материал в зависимости от условий эксплуатации может выполнять либо функции пассивного изолятора, либо активные функции преобразующего или управляющего элемента.

Пьезоэлектрики – это вещества с сильно выраженным пьезоэлектрическим эффектом. Прямым пьезоэлектрическим эффектом называют явление поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. При обратном пьезоэффекте происходит изменение размеров диэлектрика под действием приложенного электрического поля. В различных пьезопреобразователях используют кристаллы кварца, сульфата лития, сегнетовой соли, ниобата и танталата лития. Широко применяется керамика на основе твердых растворов цирконата – титаната свинца (сокращенно ЦТС). Наибольшее распространение получили керамические материалы на основе титаната бария $BaTiO_3$, ниобатные керамики на основе ниобата бария свинца $(PbBa)Nb_2O_6$ и керамики на основе системы цирконат-титанат свинца $Pb(ZrTi)O_3$. Введение модифицирующих добавок позволило, например, в последней системе получить гамму пьезокерамических материалов с необходимыми для практики свойствами. Материалы этой системы характеризуются высокими значениями пьезомодулей, диэлектрической проницаемостью, большой механической прочностью, технологичностью и малой стоимостью при массовом производстве.

Внешние механические силы, воздействуя в определенных направлениях на пьезоэлектрический кристалл, вызывают в нем не только механические напряжения и деформации (как во всяком твердом теле), но и электрическую поляризацию и, следовательно, появление на его поверхностях связанных электрических зарядов разных знаков. При изменении направления механических сил на противоположное становятся противоположными направление поляризации и знаки зарядов (рисунок 1). Это явление называют прямым пьезоэффектом. Пьезоэффект обратим. При воздействии на пьезоэлектрик, например кристалл, электрическим полем соответствующего направления в нем возникают механические напряжения и деформации. При изменении направления электрического поля на противоположное соответственно изменяются на противоположное направления напряжений и деформаций. Это явление получило название обратного пьезоэффекта.

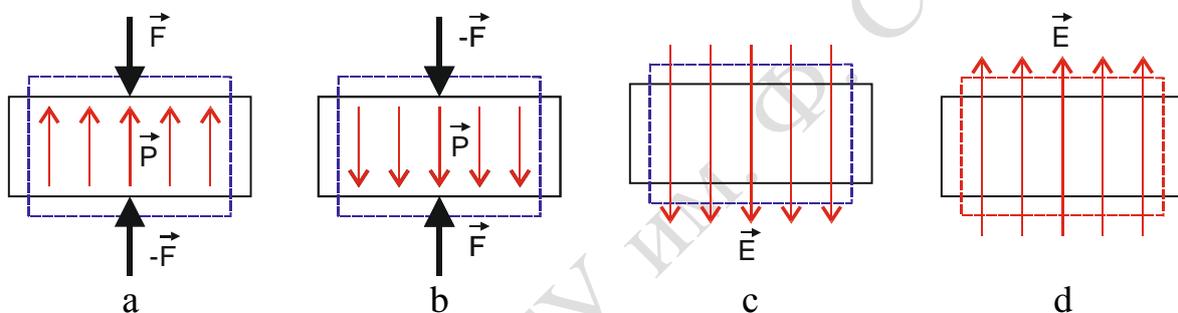


Рисунок 1 – Схематическое изображение прямого и обратного пьезоэффекта (а, б – прямой пьезоэффект; в, г – обратный пьезоэффект)

Вектора \mathbf{F} и \mathbf{E} показывают внешние воздействия – механическую силу и напряженность электрического поля. Штриховыми линиями показаны контуры пьезоэлектрика до воздействия, сплошными линиями – контуры деформации пьезоэлектрика (для наглядности во много раз увеличены); \mathbf{P} – вектор поляризации.

Не следует путать обратный пьезоэффект и электрострикцию, относящийся к сходному физическому явлению, характерному для всех диэлектриков – деформации их под действием электрического поля. Электрострикция – эффект квадратичный по полю, это означает, что деформация не зависит от направления электрического поля, а ее величина пропорциональна квадрату напряженности электрического поля. Порядок деформаций при электрострикции намного меньше, чем при пьезоэффекте (примерно на два порядка). Электрострикция всегда возникает и при пьезоэффекте, но вследствие малости в расчет не принимается. Электрострикция – эффект необратимый.

Электрострикция состоит в деформации (относительном изменении длины) образца, пропорциональной квадрату приложенного электрическо-

го поля. Электрострикция обусловлена смещением под действием поля атомов и молекул, из которых состоит диэлектрик, и присуща всем твердым и жидким диэлектрикам независимо от их симметрии и структуры. В отличие от электрострикции, пьезоэффект имеет место только в нецентросимметричных кристаллах. Обычно электрострикционная деформация очень мала, намного меньше, чем пьезоэлектрическая. Однако в некоторых сегнетокерамических материалах из-за добавочного вклада в деформацию, обусловленного переориентацией доменов в измерительном электрическом поле, электрострикционная деформация может достигать огромных значений, соизмеримых с пьезоэлектрической деформацией. В этом случае доменный вклад в электрострикцию по существу определяется обратным пьезоэффектом за счет двукратной за период поля переориентации доменов. Приложение к такому материалу постоянного поляризующего поля, наряду с переменным, приводит к выключению доменного механизма и уменьшению электрострикции.

Прямой и обратный пьезоэффект линейны и описываются линейными зависимостями, связывающими электрическую поляризацию \mathbf{P} с механическим напряжением \mathbf{t} : $\mathbf{P} = d\mathbf{t}$. Данную зависимость называют уравнением прямого пьезоэффекта. Коэффициент пропорциональности d называется пьезоэлектрическим модулем (пьезомодулем), и он служит мерой пьезоэффекта. Обратный пьезоэффект описывается зависимостью: $\mathbf{r} = d\mathbf{E}$ где \mathbf{r} – деформация; \mathbf{E} – напряженность электрического поля. Пьезомодуль d для прямого и обратного эффектов имеет одно и то же значение.

Приведенные выражения даны в элементарной форме только для уяснения качественной стороны пьезоэлектрических явлений. В действительности пьезоэлектрические явления в кристаллах более сложны, что обусловлено анизотропией их упругих и электрических свойств. Пьезоэффект зависит не только от величины механического или электрического воздействия, но и их характера и направления сил относительно кристаллофических осей кристалла. Пьезоэффект может возникать в результате действия как нормальных, так и касательных напряжений. Существуют направления, для которых пьезоэффект равен нулю. Пьезоэффект описывается несколькими пьезомодулями, число которых зависит от симметрии кристалла. Направления поляризации может совпадать с направлением механического напряжения или составлять с ним некоторый угол. При совпадении направлений поляризации и механического напряжения пьезоэффект называют продольным, а при их взаимно перпендикулярном расположении – поперечным. За направление касательных напряжений принимают нормаль к плоскости, в которой действуют напряжения.

Деформации пьезоэлектрика, возникающие вследствие пьезоэффекта, весьма незначительны по абсолютной величине. Например, кварцевая пластина толщиной 1 мм под действием напряжения 100 В изменяет свою

толщину всего на $2,3 \times 10^{-7}$ мм. Незначительность величин деформаций пьезоэлектриков объясняется их очень высокой жесткостью.

Кварцевые резонаторы являются устройствами, использующими пьезоэлектрический эффект для возбуждения механических колебаний упругой пьезопластины. При совпадении частоты приложенного электрического напряжения с собственной частотой пластины амплитуда ее колебаний резко возрастает. Это позволяет получить резонаторы очень высокой добротности ($Q \sim 10^5 - 10^7$, для LC-фильтра добротность не превышает 10^2 , у пьезокерамического фильтра – не более 10^3).

Кварц является ярко выраженным пьезоэлектриком из-за того, что у кристалла отсутствуют плоскости и центр симметрии. Кристаллическая структура кварца представляет собой каркас из кремнеземных тетраэдров. Эти тетраэдры расположены винтообразно с правым или левым ходом по отношению к главной оси кристалла, поэтому различают правые и левые структурно-морфологические формы кристаллов, которые различаются внешне по симметрии расположения некоторых граней. Обладая высокой температурной стабильностью и низкой долговременной нестабильностью частоты ($10^{-6} - 10^{-7}$), кварцевые резонаторы применяются в генераторах опорных частот, в управляемых по частоте генераторах, а также в селективных устройствах: фильтрах, частотных дискриминаторах и т.д.

Резонаторы для низкочастотной аппаратуры имеют вид, представленный на рисунке 2. Кварцевая пластина 1 закреплена в стеклянном корпусе 2. Сигнал подводится по проводникам 3. На основание пластины нанесены контактные площадки, к которым припаяны проводники. Электрический сигнал подводится к паре контактов, которые расположены на одной стороне пластины (первая пара контактов). Из-за пьезоэлектрических свойств кварца пластина колеблется, и это в свою очередь приводит к возникновению разности потенциалов на пластинах, расположенных на обратной стороне пластины (вторая пара контактов).

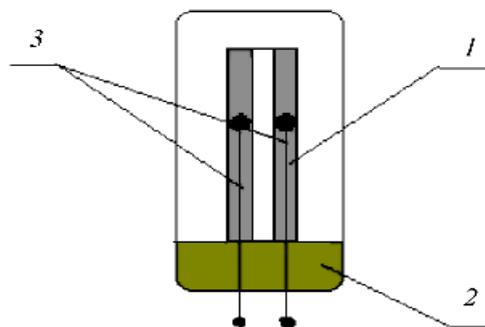


Рисунок 2 – Кварцевый резонатор для низкочастотной аппаратуры:
(1 – пластина с нанесенными контактами; 2 – стеклянный корпус;
3 – электрические проводники)

На определенной частоте, которая определяется геометрическими параметрами пластины, возникает механический резонанс, и амплитуда сигнала, снимаемого со второй пары контактов, резко возрастает. Данная частота называется *частотой резонанса*. Данное свойство кварцевых пластин используется в частности для стабилизации частоты в генераторах радиостанций, работающих в диапазоне длинных и средних волн.

Вопросы для самоконтроля

1. Структура кристаллов кварца и их электромеханические свойства.
2. Принцип работы кварцевого резонатора.
3. Применение кварцевых резонаторов.
4. От каких параметров зависит резонансная частота?
5. Принцип работы установки для определения АЧХ.

Лабораторная работа 1 Изучение свойств активных пьезоэлектриков

Цель работы: освоение принципов работы кварцевого резонатора, экспериментальное изучение его частотной характеристики и электрических параметров.

Приборы и принадлежности: двухлучевой осциллограф, низкочастотные кварцевые резонаторы, генератор низкой частоты, испытательный стенд.

Описание установки

Собрать лабораторную установку для изучения характеристик кристалла кварца (рисунок 3).

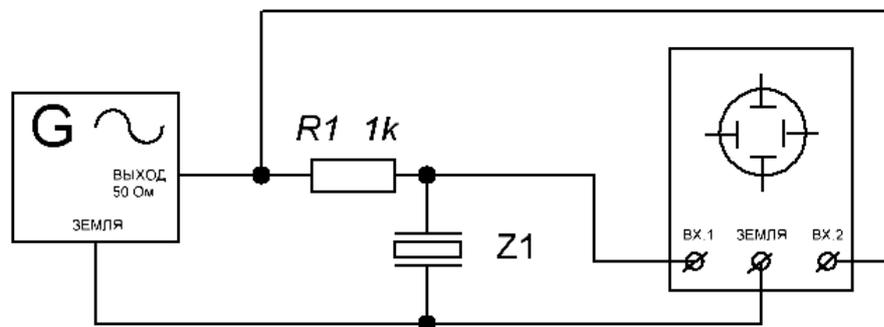


Рисунок 3 – Схема установки для снятия АЧХ резонатора (G – генератор; Z1 – резонатор; двухлучевой осциллограф)

С выхода генератора G сигнал подается на вход "2" двухлучевого осциллографа. На вход "1" осциллографа подается сигнал, снятый с кварцевого

резонатора Z1. При постоянной амплитуде сигнала (на входе "2") и при изменении частоты, меняется амплитуда сигнала на входе "1". Это изменение фиксируется на экране осциллографа. На частоте резонанса амплитуда сигнала на входе "1" осциллографа значительно превышает первоначальную. Дальнейшее увеличение частоты приводит к уменьшению амплитуды.

Ход работы

1. Включить осциллограф и генератор и прогреть их в течение 2 - 3 минут.
2. Изменяя частоту сигнала, подаваемого на вход резонатора, определить его резонансную частоту. Результаты измерений занести в таблицу 1.
3. Построить график зависимости амплитуды колебаний на выходе резонатора от частоты.
4. По разности сигналов на входе и выходе определить ослабление сигнала в пластине кварца на различных частотах.

Таблица 1 – Зависимость амплитуды сигнала от частоты

Частота F, кГц										
Амплитуда U, В										
Ослабление ΔU , В										

5. Определить время задержки сигнала по смещению h полувольт сигнала на экране осциллографа: $\tau = hn$, где n – коэффициент развертки, мс/дел.
6. Рассчитать скорости движения акустических волн в пластине кварца: $V = l/\tau$, где l – расстояние между электродами преобразователя.

Содержание отчета

1. Рисунок лабораторной установки с пояснениями к принципу ее работы.
2. Заполненная таблица 1 зависимости амплитуды от частоты с указанием резонансной частоты.
3. График зависимости амплитуды от частоты.
4. Расчетные данные ослабления сигнала и скорости распространения акустических колебаний в пластине кварца.

Тема 2

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОГО ПЕРЕХОДА (p-n-перехода)

1. Полупроводники с собственной и примесной типами проводимости
2. Электронно-дырочный переход
3. Свойства p-n-перехода в электрическом поле
4. Полупроводниковый диод

Основные понятия по теме

Полупроводниковые диоды и транзисторы нашли широкое применение в различных областях электротехники и электроники. На их основе и с их применением строятся самые различные электронные устройства, применяемые в разных сферах жизни человека.

По ряду применяемых полупроводниковых материалов диоды разделяются на германиевые, кремниевые, селеновые. По конструкции - на плоскостные и точечные; по назначению - на диоды, предназначенные для преобразования переменного тока промышленной частоты в постоянный ток, и диоды, используемые для выпрямления переменного тока и детектирования.

Обычно электронно-дырочный переход создают внутри полупроводника путем введения в одну его часть акцепторной примеси, а в другую - донорной. Тогда одна область имеет дырочную проводимость, а другая - электронную. Переход между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет электропроводимость n -типа (электронную), а другая p -типа (дырочную), называется электронно-дырочным переходом (p - n -переходом).

При контакте полупроводников разного типа проводимости вследствие диффузии из n -слоя в p -слой переходит большее число электронов, чем в обратном направлении, а из p -слоя в n -слой переходит большее число дырок, чем в обратном направлении. Возникающее при этом в области контакта электрическое поле будет тормозить дальнейший переход электронов из n -слоя и дырок из p -слоя. Через короткий промежуток времени (практически мгновенно) напряженность поля E_k в контакте достигает такого значения, при котором наступает равновесие (рисунок 1).

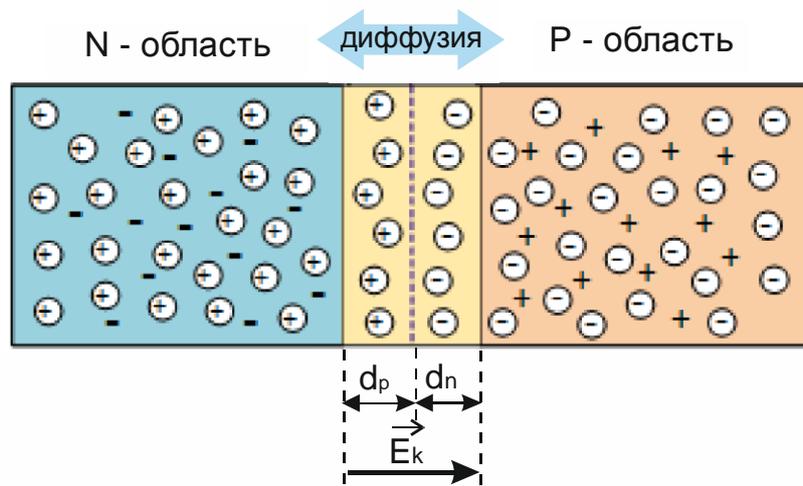


Рисунок 1 – Схема образования электронно-дырочного перехода

В результате диффузии электронов и дырок через границу контакта в n -области у границы перехода на расстоянии d_n остаются нескомпенсированные положительно ионизированные доноры и неравновесные дырки (область у границы n -полупроводника заряжается положительно); в p -области у границы перехода на расстоянии d_p остаются нескомпенсированными отрицательно ионизированные акцепторы и неравновесные электроны (область у границы p -полупроводника заряжается отрицательно).

В области p - n -перехода возникает двойной электрический слой (запирающий слой) и электрическое поле E_k , препятствующее диффузионному переходу основных носителей. Это поле приводит к появлению дрейфового тока неосновных носителей: из p -области в n -область электронов, а из n -области в p -область дырок.

Таким образом, через p - n -переход протекают четыре тока: два диффузионных и два дрейфовых. При установившемся режиме (динамическом равновесии) общий ток через p - n -переход равен нулю.

Если от внешнего источника напряжения к n -слою подвести отрицательный потенциал, а к p -слою - положительный, то при этом внешнее поле напряженностью E_0 в области контакта будет направлено противоположно контактному E_k . Поэтому напряженность результирующего поля ($E = E_k - E_0$) уменьшается. При некоторой величине подводимого к p - n -переходу напряжения $E_0 = E_k$ запирающий слой исчезает. Если изменить полярность подводимого напряжения, то внешнее и контактное поля в запирающем слое будут совпадать по направлению и напряженность результирующего поля в контакте возрастет, т. е. $E = E_0 + E_k$. Поэтому толщина и удельное сопротивление запирающего слоя возрастут.

На этом основано выпрямительное свойство p - n -перехода, которое получило практическое применение в устройстве полупроводниковых диодов. Двухэлектродный прибор, основу которого составляет p - n -переход,

называется *полупроводниковым диодом*. Диод - двухэлектродный электронный прибор, обладает различной проводимостью в зависимости от направления электрического тока. Электрод диода, подключённый к положительному полюсу источника тока, когда диод открыт (то есть имеет маленькое сопротивление), называют *анодом*. Электрод, подключённый к отрицательному полюсу, называется *катодом*.

Полупроводниковым диодом называют прибор с двумя электродами (выводами), действие которого основано на использовании односторонней проводимости *p-n*-перехода.

Полупроводниковые диоды в основном используются в качестве выпрямителей переменного тока и детекторов.

Возможности полупроводникового диода как выпрямителя переменного тока характеризуются величиной допустимого выпрямленного тока и величиной допустимого обратного напряжения, определяющего величину максимального выпрямленного напряжения. Выпрямительные свойства полупроводникового диода зависят от частоты подаваемого на него напряжения. С повышением частоты напряжения начинает проявляться частотная зависимость параметров диода. Особенно сильно это заметно у плоскостных диодов. При синусоидальном напряжении на диоде знак напряжения периодически изменяется. Если напряжение меняется медленно, то при каждом значении напряжения успевает установиться соответствующее ему стационарное распределение носителей и ток через *p-n*-переход определяется тем напряжением, которое приложено в данный момент. Во время положительного полупериода (прямого смещения) происходит инжекция носителей заряда через *p-n*-переход, и накопленные заряды не исчезают мгновенно, а сохраняются в течении некоторого времени, необходимого для рекомбинации.

Если к полупроводниковому диоду (выпрямителю) приложено переменное напряжение такой частоты f , что полупериод меньше, чем время рекомбинации τ , то дырки, инжектированные за положительный полупериод в *n*-область, и электроны, инжектированные в *p*-область, возвращаются назад во время обратного полупериода, когда напряжение на *p-n*-переходе понижается.

Наличие высокой концентрации неосновных носителей вблизи *p-n*-перехода резко уменьшает его обратное сопротивление в начальный момент отрицательного напряжения. По мере уменьшения концентрации неосновных носителей вблизи *p-n*-перехода наблюдается постепенное увеличение обратного сопротивления.

Таким образом, при выпрямлении синусоидального напряжения высокой частоты часть неосновных носителей возвращается во время отрицательного полупериода, что ухудшает выпрямление.

Когда обратное напряжение диода достигает определенного критического значения, ток диода начинает резко возрастать. Это явление называ-

ется пробоем диода. Различают два основных вида пробоя *p-n*-перехода: электрический и тепловой. В обоих случаях резкий рост тока связан с увеличением количества носителей тока в переходе. При электрическом пробое количество носителей в переходе возрастает под действием сильного электрического поля и ударной ионизации атомов решетки, а при тепловом пробое - за счет термической ионизации атомов.

Выпрямительные полупроводниковые диоды обладают рядом достоинств по сравнению с ламповыми диодами: длительным сроком службы, отсутствием накальных цепей, высоким КПД и др.

К основным параметрам полупроводниковых диодов, определяющим их свойства и эксплуатационные возможности, относятся: предельно допустимый прямой (выпрямительный) ток, прямое падение напряжения, пороговое прямое напряжение, обратный ток, обратное напряжение, напряжение пробоя диода, ёмкость *p-n*-перехода.

Основной характеристикой диода является вольт-амперная характеристика (ВАХ) *p-n*-перехода, она показывает зависимость тока через диод от приложенного напряжения.

Предельно-допустимый прямой (выпрямительный) ток. Прямым током называют ток, проходящий через диод в пропускном направлении. Величина выпрямительного тока равна постоянной составляющей тока, протекающего через диод при подаче на него переменного напряжения. Предельно-допустимый прямой ток - максимальный ток, который может длительно протекать через диод, не вызывая ухудшения его качества.

Прямое падение напряжения - средняя величина падения напряжения на диоде, на который подаётся переменное напряжение (для выпрямления переменного тока)

Пороговое прямое напряжение - напряжение, при котором начинается резкое возрастание прямого тока через диод (для германиевых диодов - около 0,3 В, для кремниевых - около 0,5 В).

Обратный ток - ток, проходящий через диод в запиорном направлении. В исправном диоде обратный ток во много раз меньше прямого. Чем меньше обратный ток диода, тем выше его качество. Наибольшая величина обратного тока указана в паспорте диода.

Обратное напряжение - напряжение, вызывающее обратный ток. Напряжение пробоя диода - предельное обратное напряжение, при котором резко возрастает обратный ток диода (т.е. когда его сопротивление делается практически равным нулю).

*Ёмкость *p-n*-перехода:* у точечных диодов - десятые доли пикофарады, у плоскостных достигает несколько десятков пикофарад. Поэтому для плоскостных диодов, работающих в выпрямительных и низкочастотных схемах, максимальная рабочая частота не превышает 50 кГц.

Вопросы для самоконтроля

1. Механизм возникновения запирающего слоя при контакте полупроводников p - и n - типа.
2. Какова роль основных и неосновных носителей тока в работе p - n -перехода?
3. Особенности вольт-амперной характеристики полупроводникового диода.
4. Каковы возможные механизмы пробоя p - n -перехода?
5. Каковы преимущества и недостатки полупроводниковых диодов, по сравнению с вакуумными?
6. Какими основными параметрами характеризуются выпрямительные диоды?

Лабораторная работа 2

Изучение свойств электронно-дырочного перехода

Цель работы: изучить физическую природу и свойства p - n -перехода. Исследовать вольт-амперную характеристику (ВАХ) и зависимость коэффициента выпрямления от напряжения для полупроводникового диода.

Приборы и принадлежности: лабораторный стенд для исследования ВАХ диода и стабилитрона, источник питания, комбинированные цифровые измерительные приборы типа В7-35.

Описание установки

На рисунке 2 приведена структурная схема разработанной лабораторной установки.

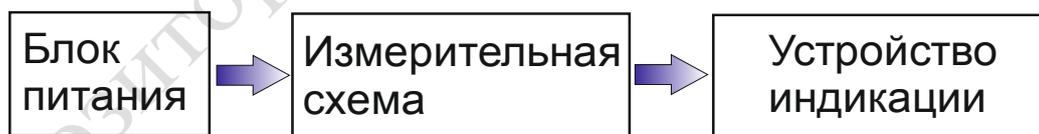


Рисунок 2 - Структурная схема лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из блока питания, измерительной схемы, к которой подключаются полупроводниковый диод и устройство индикации. Устройство индикации в нашей установке может быть либо амперметр с вольтметром, либо осциллограф.

Внешний вид лабораторной установки с элементами управления приведен на рисунке 3.

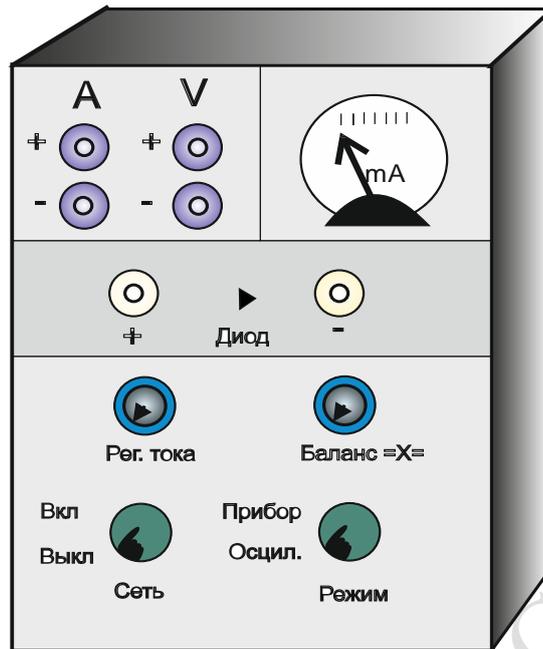


Рисунок 3 – Общий вид лабораторной установки с элементами управления

Лабораторная установка представлена в виде отдельного устройства с необходимыми измерительными приборами и клеммами для подключения внешних устройств. На передней панели стенда установлен миллиамперметр с диапазоном измерения до 100 мА. Клеммы для подключения внешнего вольтметра (V) и амперметра (A). На клеммы “Диод” подключается исследуемый полупроводниковый прибор. Ручкой “Рег. тока” имеется возможность плавной регулировки тока через исследуемый полупроводниковый прибор. Регулятор “Баланс =X=”, позволяет регулировать смещение луча по горизонтали при работе в режиме “Осциллограф”. Так же на панели управления имеется ручка включения - выключения питания и переключатель режима работы, который позволяет выбрать режим измерения: автономный (все измерения производятся на базе лабораторной установки) и режим “Осцил.” (в этом режиме имеется возможность наблюдать ВАХ полупроводникового прибора на экране осциллографа).

Электрическая схема лабораторной установки позволяет задавать постоянный ток в диапазоне от 0 до 500 мА.

Ход работы

1. Подключить установку к сети $\approx 220\text{В}$.
2. Проверить установку всех регуляторов в минимальное значение.
3. Подключить измеряемый полупроводниковый прибор на клеммы “Диод”.
4. К клеммам “V” и “A” подключить внешние измерительные приборы (вольтметр и амперметр соответственно) в необходимой полярности включения.

5. Убедитесь, что выбран правильный режим работы прибора. В нашем случае режим: “Прибор”.
6. Включить тумблер “Сеть”. При этом должна загореться сигнальная лампочка “СЕТЬ”.
7. Включить питание внешних измерительных приборов.
8. Плавно вращая регулировку тока, снять зависимость $I=f(U)$ в прямом направлении. Для этого измерять величину тока не менее 3 раз в интервале напряжений от 0 до 0,5 В. Результаты занести в таблицу 1.
9. Выключив прибор, поменять полярность включения полупроводникового диода на “Обратное направление” и включить питание прибора снова.
10. Вращая потенциометр “Рег. тока”, установить минимальное значение тока.
11. Снять зависимость $I=f(U)$ в обратном направлении в интервале напряжений от 0 до 10 В, измеряя величину тока не менее 3 раз. Результаты занести в таблицу 2.
12. Построить вольт-амперную характеристику полупроводникового прибора (для прямого и обратного включения в различных масштабах тока).
13. Вычислить значения коэффициента выпрямления при различных значениях напряжения U (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 В) по формуле 1:

$$K = \frac{I_{\text{прям.}}}{I_{\text{обр.}}} \quad (1)$$

14. Результаты занести в таблицу 3.
15. Построить график зависимости коэффициента выпрямления от напряжения $K=f(U)$.

Таблица 1 – Прямое включение полупроводникового прибора

U, В	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
I, mA										

Таблица 2 – Обратное включение полупроводникового прибора

U, В	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
I, μ A										

Таблица 3 – Зависимость коэффициента выпрямления от напряжения

U, В	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
K										

Содержание отчета

1. Рисунок лабораторной установки с пояснениями к принципу ее работы.
2. Заполненные таблицы 1, 2 зависимости тока прямого и обратного от напряжения.
3. Заполненная таблица 3 зависимости коэффициента выпрямления от напряжения.
4. График вольт-амперной характеристики полупроводникового прибора.
5. Выводы.

Репозитории ГГУ им. Ф. Скоринны

Тема 3

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

1. Гальваномагнитные явления в полупроводниках
2. Продольные и поперечные гальваномагнитные явления
3. Физические принципы эффекта Холла
4. Измерение ЭДС Холла

Основные понятия по теме

Физические явления, возникающие в полупроводнике при одновременном воздействии на него электрического и магнитного полей, называют гальваномагнитными эффектами. Среди гальваномагнитных эффектов одним из важнейших является эффект Холла. Сущность его заключается в следующем. Если пластину полупроводника, по которой проходит электрический ток, поместить в магнитное поле, перпендикулярное току, то на боковых гранях пластины в направлении, перпендикулярном току и магнитному полю, возникнет разность потенциалов, которая получила название ЭДС Холла.

Появление ЭДС Холла обусловлено тем, что на носители заряда, движущиеся со скоростью \vec{V} , в магнитном поле с индукцией \vec{B} действует сила Лоренца $\vec{F}_l = e \vec{V} \times \vec{B}$, отклоняющая их к одной из боковых граней пластины. Направление действия силы Лоренца можно определить по известному правилу левой руки, относя его к техническому направлению тока.

Рассмотрим брусок полупроводника n-типа проводимости прямоугольной формы, по которому протекает ток I под действием внешнего электрического поля (рисунок 1).

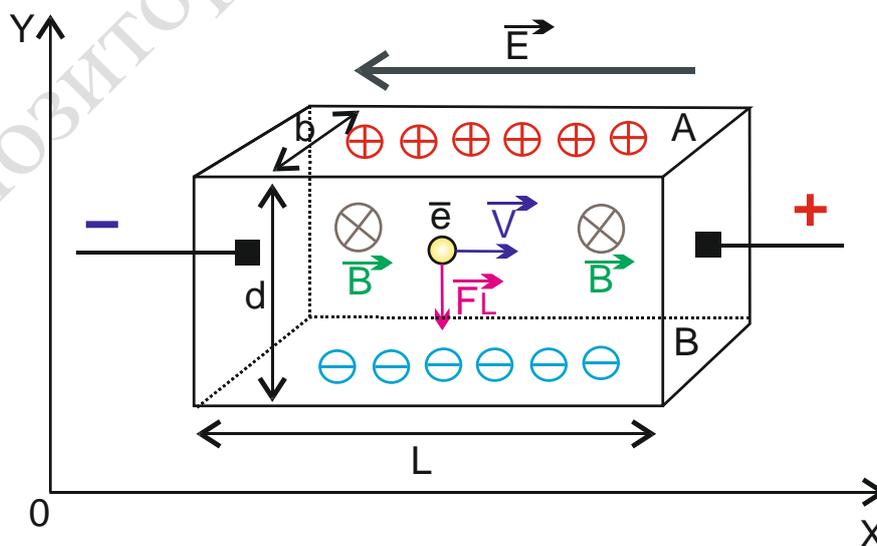


Рисунок 1 - Возникновение поля Холла в полупроводнике прямоугольной формы

Плотность этого тока \vec{J} определится формулой

$$\vec{J} = en\vec{V}_X = \sigma\vec{E}_X, \quad (1)$$

где e -заряд электрона; n -концентрация электронов; \vec{V}_X - скорость электронов в электрическом поле \vec{E}_X ; σ - удельная проводимость полупроводника.

Если полупроводник однородный, то в отсутствии магнитного поля эквипотенциальные поверхности будут перпендикулярны вектору напряженности электрического поля, а, следовательно, и силовым линиям тока. В этом случае, при расположении точек А и В на одной эквипотенциальной поверхности, т.е. строго напротив друг друга, напряжение между ними равно нулю.

Поместим теперь образец в магнитное поле с индуктивностью \vec{B} , перпендикулярной плоскости рисунка и направлению электрического поля. При этом на носители тока в образце начинает действовать сила Лоренца

$$\vec{F}_l = e \vec{v} \times \vec{B}, \quad (2)$$

направленная перпендикулярно дрейфовой скорости \vec{V}_X и индукции магнитного поля \vec{B} , причем знак (+) соответствует дырке, а знак (-) - электрону. С другой стороны, дрейфовую скорость \vec{V}_X можно записать в виде

$$\vec{V}_X = \pm \mu \vec{E}, \quad (3)$$

где (+) соответствует дырке; (-)соответствует электрону, в результате чего

$$\vec{F}_l = e\mu \vec{E} \times \vec{B}, \quad (4)$$

т.е. направление силы Лоренца не зависит от знака носителя, а значит и электроны, и дырки под действием силы Лоренца будут отклоняться в одну сторону (к точке А на рисунке 1). Полученный результат становится очевидным, если учесть, что при изменении знака носителя меняется и направление его движения в электрическом поле. Из вышеизложенного следует, что в полупроводнике n-типа проводимости и основные, и неосновные носители отклоняются к точке А и накапливаются около нее. Но поскольку основных носителей много больше, чем неосновных, то в точке А будет избыток электронов, а в точке В их недостаток. Таким образом, между точками А и В возникает дополнительное электрическое поле, направленное от В к А (в случае акцепторного полупроводника направление этого поля будет противоположным). Возникающее электрическое поле перпендикулярно как вектору магнитной индукции, так и направлению

протекания тока и носит название поля Холла (\vec{E}_H).

Поле \vec{E}_H будет расти до тех пор, пока не скомпенсирует силу Лоренца

$$e\vec{E}_H = e \left[\vec{v} \times \vec{B} \right] \quad (5)$$

После достижения этого условия носители потекут по полупроводнику только под действием внешнего электрического поля, т.е. магнитное поле при этом как бы отсутствует. Однако суммарная напряженность поля в образце станет $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_H$, а ее вектор окажется повернут относительно исходного поля на некоторый угол θ , называемый углом Холла. В результате этого эквипотенциальные поверхности также оказываются повернутыми относительно силовых линий тока на тот же угол, и точки А и В окажутся теперь на разных эквипотенциальных поверхностях, следовательно, между ними возникнет разность потенциалов, называемая ЭДС Холла или холловским напряжением, которое в случае $\vec{V}_x \perp \vec{B}$ и с учетом (1) запишется в виде

$$U_H = E_H b = -V_x B d = \frac{1}{en} J B d = R_H J B d, \quad (6)$$

где d - ширина образца; $R_H = \frac{1}{en}$ - постоянная Холла, определяемая концентрацией основных носителей тока в полупроводнике.

Для полупроводника n-типа она определяется приведенной формулой и имеет знак минус, а для полупроводника p-типа она положительна и запишется как $R_H = \frac{1}{qn}$.

Электрический ток в веществе обуславливается направленным движением носителей тока: ионов и электронов в электролитах, электронов проводимости в металлах, электронов и дырок в полупроводниках. Некоторые сведения о природе носителей тока и их количественных характеристиках (знак заряда, концентрация) можно получить с помощью соотношений, описывающих явление Холла.

Рассмотрим тонкую пластинку, изготовленную из исследуемого материала германия, длина которой значительно превышает ширину и толщину ($L > b > d$). Пропустим, через нее в продольном направлении ток I . Так как носители тока в ней имеют положительный знак (дырки), то под действием электрического поля источника носители тока будут двигаться по полю (слева направо). Сила тока вдоль пластинки определяется выражением

$$I = qn v S, \quad (7)$$

где q - заряд носителя тока; n - концентрация носителей; v - средняя скорость направленного движения носителей тока; S - площадь сечения пластинки.

При наличии однородного магнитного поля, перпендикулярного большой плоскости пластинки, на носитель тока в ней будет действовать сила Лоренца, направленная согласно правилу левой руки.

$$F_L = qvB. \quad (8)$$

Под действием этой силы происходит дрейф носителей тока (дырок) и на одной из боковых граней накапливается избыточный положительный заряд, что приводит к возникновению поперечного электрического поля напряженностью E_{AB} . Со стороны этого поля на носитель тока действует кулоновская сила, направленная противоположно силе Лоренца.

$$F_K = E_{AB}q. \quad (9)$$

Дрейф носителей тока поперек пластины происходит до тех пор, пока обе силы не станут численно равными, т.е.

$$F_L = F_K \quad (10)$$

Вследствие этого между электродами появляется разность потенциалов $\Delta\varphi$ - холловская разность потенциалов (ЭДС Холла).

Электрическое поле поверхностных зарядов в первом приближении можно считать однородным, тогда

$$E_H = \frac{\Delta\varphi}{d}, \quad (11)$$

где d - ширина пластины.

Из формулы (1) найдем скорость, подставим в выражение (2) и с учетом соотношений (3) - (5) получим выражение для холловской разности потенциалов

$$\Delta\varphi = \frac{1}{qn} \frac{IBd}{S} \quad (12)$$

Величина $R_H = \frac{1}{qn}$ носит название постоянной Холла. Величины $\Delta\varphi$, I , B , b , S измеряются экспериментально. Если величина заряда носителя тока известна (обычно $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), то, учитывая, что $S = db$ (где d - толщина пластинки), можно определить концентрацию носителей тока в пластинке

$$n = \frac{1}{q\Delta\varphi} \frac{IB}{b} \quad (13)$$

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется электрическим током? Как он реализуется в проводниках, электролитах и полупроводниках?
2. Какие частицы являются носителями электрического тока?
3. Какой характер движения зарядов в магнитном поле?
4. Чему равна сила Лоренца и как она направлена?
5. В чем заключается сущность эффекта Холла?
6. Как экспериментально определяется концентрация носителей тока с использованием эффекта Холла?

Лабораторная работа 3 Изучение физических принципов эффекта Холла

Цель работы: получить необходимые знания о физических принципах эффекта Холла и методах экспериментального измерения ЭДС Холла.

Приборы и принадлежности: лабораторная установка для изучения эффекта Холла, исследуемый образец, содержащий плоскопараллельную пластинку из германия с размерами: $l = 1,5\text{мм}$; $d = 1\text{мм}$; $b = 0,2\text{мм}$ (датчик Холла).

Описание установки

Лабораторная установка для изучения гальваномагнитных явлений в полупроводниках представлена на рисунке 2.

Она состоит из гальваномагнитного преобразователя (датчик Холла), электромагнита, регулятора тока электромагнита, цифровые измерительные приборы (вольтметр, амперметр). Лабораторная установка позволяет проводить лабораторные работы, объясняющие физические принципы эффекта Холла. В частности, представляется возможным проводить изучение зависимости ЭДС Холла в полупроводниковом образце в зависимости от тока через ячейку Холла и индукции магнитного поля. Лабораторная установка позволяет определять удельное сопротивление образца (полупроводникового элемента датчика Холла), концентрацию носителей тока в полупроводнике и их подвижность.



Рисунок 2 – Вид панели управления лабораторной установки

Основные элементы лабораторного стенда:

- ячейка Холла;
- регулятор тока через ячейку Холла (I_x , mA);
- регулятор индукции магнитного поля (B, Тл);
- милливольтметр для измерения ЭДС Холла и падения напряжения на ячейке;
- миллиамперметр для измерения тока, протекающего через ячейку Холла;
- блок питания.

Магнитное поле создается электромагнитом. Индукция магнитного поля в зазоре электромагнита определяется по градуировочному графику зависимости индукции магнитного поля (B) от силы тока в цепи электромагнита. Градуировочный график представлен на рисунке 3.

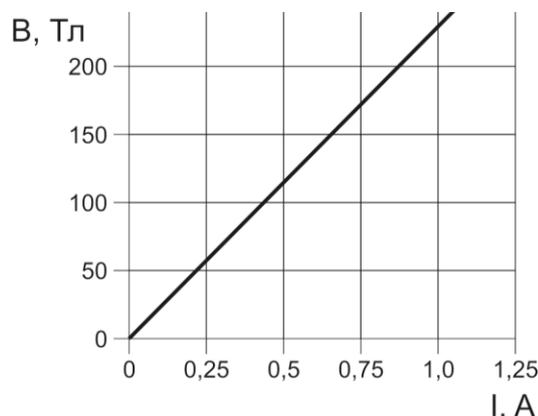


Рисунок 3 - Градуировочный график для расчета индукции магнитного поля

Для удобства, шкала регулятора индукции магнитного поля проградуирована в единицах индукции магнитного поля.

На рисунке 4 представлена структурная схема лабораторного стенда для изучения гальваномагнитных явлений в полупроводниках.

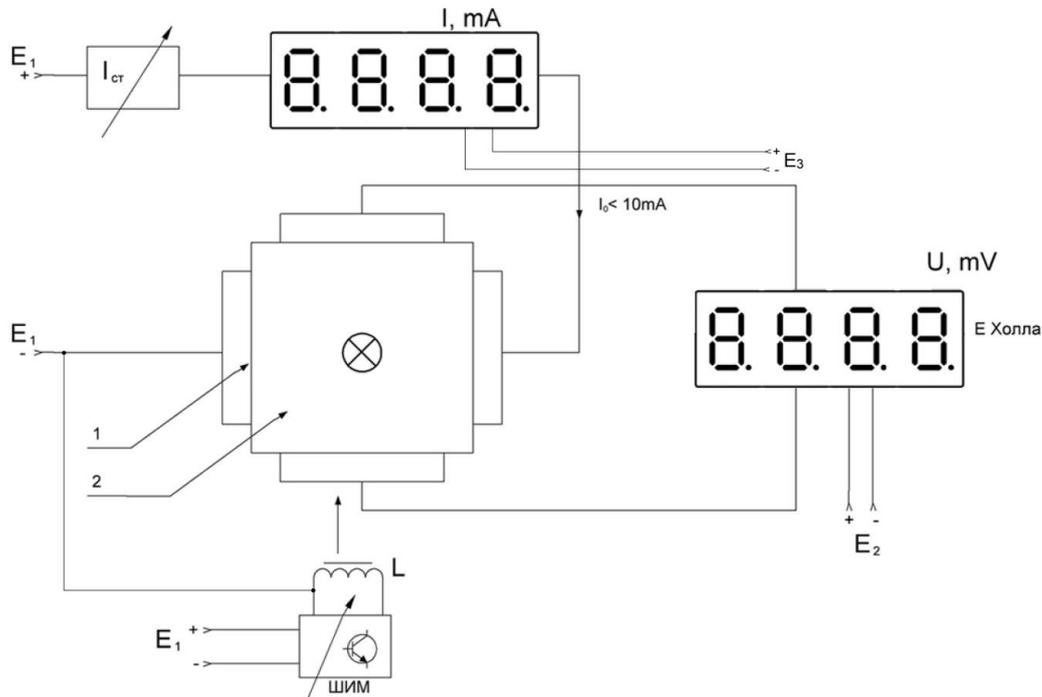


Рисунок 4 – Структурная схема лабораторного стенда для изучения гальваномагнитных явлений в полупроводниках (1 – обкладки ячейки Холла; 2 – кристалл полупроводника; L – соленоид; $I_{ст}$ - генератор тока через ячейку Холла; ШИМ – регулятор тока через соленоид)

Блок питания электромагнита выполнен по схеме, обеспечивающей высокий коэффициент стабилизации. Он обеспечивает регулировку тока. Индукция магнитного поля может плавно меняться в диапазоне от 0 до 300 Тл. Источник тока через ячейку Холла выполнен по схеме с ограничением тока и обеспечивает плавную регулировку от 0 до 10 мА.

Ход работы

Упражнение 1 - Вычисление значения концентрации носителей тока в полупроводнике

1. Потенциометры I_x и B поставить в минимальное значение.
2. Подключить установку к сети и включить питание схемы нажатием тумблера «Вкл».
3. Потенциометром I_x по миллиамперметру установить в пластинке ток I , равный 2 мА.
4. Изменяя величину магнитного поля потенциометром B от 25 до 300 Тл через каждые 25 Тл, записывать значения холловской разности потенциалов $\Delta\varphi$, отсчитанные по милливольтметру в мВ.

5. Провести измерения по п. 4 для различных значений тока через ячейку Холла от 2 до 5 мА.
6. Вычислить по формуле (7) значения концентрации носителей тока n в полупроводнике, принимая $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. За истинное значение концентрации принимать среднее арифметическое \bar{n} .
7. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Вычисление значения концентрации носителей тока

№ измерения	I , мА	B , Тл	$\Delta\varphi$, мВ	n , м ⁻³	\bar{n} , м ⁻³

Упражнение 2 - Изучение эффекта Холла

1. Установить ток через образец величиной $I = 0,5$ мА. Установить величину магнитного поля $B = 25$ Тл. Измерить ЭДС Холла с помощью милливольтметра.
2. Провести измерения ЭДС Холла при различных величинах индукции магнитного поля и тока через ячейку. Индукцию магнитного поля (B) необходимо изменять от 25 до 300 Тл с шагом 25 Тл, а значение силы тока (I) через образец от 0,5 мА до 5 мА с шагом 0,5 мА.
3. Вычислить удельную ЭДС Холла по формуле (13), построить зависимость E^*_H от индукции магнитного поля B и определить постоянную Холла R по крутизне наклона прямой $E^*_H = f(B)$.
4. Результаты измерений занести в таблицу 2.
5. Рассчитать погрешности выполненных измерений.

Таблица 2 – Изучение эффекта Холла

№ Измерения	I , мА	B , Тл	U_H , мВ	E_H , мВ	R , $\frac{M^3}{Кл}$

Содержание отчета

1. Рисунок лабораторной установки с пояснениями к принципу ее работы.
2. Заполненная таблица всех измеренных величин и погрешностей.
3. Расчеты, графики.
4. Расчет с учетом погрешности для концентрации носителей зарядов в полупроводнике.
5. Выводы.

Тема 4

ИЗУЧЕНИЕ ДВУХЗОНДОВОГО И ЧЕТЫРЕХЗОНДОВОГО МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1. Исследование электрических свойств полупроводников
2. Зондовый метод изучения проводимости полупроводников
3. Двух и четырехзондовый метод измерения
4. Погрешности зондовых методов

Основные понятия по теме

Методы измерения удельного сопротивления могут быть разделены на две группы:

1. Измерения с присоединением к образцу токопроводящих или измерительных контактов.

2. Бесконтактные измерения.

В настоящей работе используется первый метод.

В большинстве случаев в месте контакта измерительного зонда с полупроводником возникает так называемая контактная разность потенциалов, которая оказывает влияние на результаты измерений. В связи с этим, величина сопротивления полупроводника, как правило, не может быть измерена при простом включении его в цепь омметра. Поэтому методика измерения удельного сопротивления должна обеспечивать либо учёт, либо компенсацию этой дополнительной разности потенциалов.

Кроме этого, необходимо учитывать то обстоятельство, что на результаты измерений могут влиять размеры и форма образца.

Наиболее распространённым методом определения удельного сопротивления полупроводников являются двух- и четырёхзондовый метод.

При исследовании электрических свойств полупроводников и производстве полупроводниковых материалов, структур и приборов возникает необходимость измерения удельного электрического сопротивления или удельной электрической проводимости полупроводниковых материалов в виде монокристаллических слитков, образцов различной геометрической формы, пластин, диффузионных, эпитаксиальных и ионно-легированных слоев, составляющих часть полупроводниковых структур. Измерение удельного сопротивления осуществляется не только для установления его значения, но также для определения других важных параметров полупроводникового материала на основе теоретических расчетов или дополнительных экспериментальных данных.

Выбор метода измерения осуществляют с учетом получения требуемой информации, особенностей исследуемого материала, возможности изготовления электрических контактов, геометрической формы образца,

метрологических характеристик метода измерения. В идеальном случае измерение характеристик материалов не должно приводить к разрушению образца и не должно требовать его специальной обработки.

Многие методы измерения удельного электрического сопротивления полупроводниковых материалов основаны на измерении разности электрических потенциалов на некотором участке образца, через который пропускается электрический ток. Исторически одним из первых методов измерения удельного сопротивления был двухзондовый метод, применявшийся для измерения удельного сопротивления металлов. Измерения с помощью методов, для которых необходима строго определенная геометрия образца, сопряжены со значительными затратами времени, главным образом на изготовление образцов и контактов к ним. Для быстрого измерения удельного сопротивления используют четырехзондовый метод, метод сопротивления растекания точечного контакта, а также метод Ван-дер-Пау. Указанные методы удобны, позволяют выполнять измерения не только на однородных образцах, но и на диффузионных, эпитаксиальных и ионно–легированных слоях, а также исследовать пространственное изменение удельного сопротивления. Для зондовых методов силовые линии напряженности электрического поля не параллельны и распределены неоднородно по сечению образца, ввиду чего сначала необходимо теоретически рассчитывать распределение электрического потенциала в образце, а затем находить взаимосвязь между удельным сопротивлением и измеряемыми величинами – током и напряжением.

При использовании зондовых методов нужен непосредственный контакт с полупроводниковым образцом. Поэтому эти методы приводят к разрушению образцов. Например, при измерениях четырехзондовым методом или методом сопротивления растекания металлические зонды разрушают поверхность образца; для применения же метода Ван-дер-Пау необходимо создание четырех контактов. Поэтому существует потребность в методах измерения, не требующих непосредственного контакта с образцом, и получивших название *бесконтактных*.

Двухзондовый метод измерения удельного сопротивления

Двухзондовый метод применяют для измерения удельного сопротивления образцов, имеющих правильную геометрическую форму и постоянное поперечное сечение. При этом на торцевых гранях образца, например в виде прямоугольной пластины, изготавливают омические контакты. Через эти контакты вдоль образца пропускают электрический ток. На одной из поверхностей образца вдоль линий тока устанавливают два контакта в виде металлических иглол – зондов, имеющих малую площадь соприкосновения с поверхностью и позволяющих измерить разность потенциалов. Если образец однороден, то его удельное сопротивление $\rho =$

$U_{12}S/(Id)$, где I – сила тока, протекающего через образец, U_{12} – разность потенциалов между измерительными или потенциальными зондами, d – расстояние между зондами, S – площадь поперечного сечения.

Ток через образец подается от регулируемого источника постоянного тока, гарантирующего достаточную его стабильность во времени. Сила тока измеряется миллиамперметром, разность потенциалов – электронным цифровым вольтметром с высоким входным сопротивлением.

Погрешность измерений напряжения и тока при использовании приборов с цифровой индикацией не превышает 0,1%. Однако систематическая погрешность измерения напряжения между потенциальными зондами зависит от сопротивления контакта зонда с образцом, которое может в 10^3 - 10^4 раз превышать сопротивление образца. Чтобы устранить влияние сопротивлений контактов на результаты измерений, необходимо предельно уменьшить протекающий через них ток. Для этого используют вольтметры с высоким входным сопротивлением (10^8 Ом и больше), причем сопротивление изоляции каждого из зондов относительно любого элемента измерительной установки должно быть много больше этого значения.

Неточное соблюдение геометрических размеров образца ведет к отклонению формы эквипотенциальных поверхностей от плоских поверхностей, параллельных торцевым граням образца, и возникновению систематической погрешности. Искажение формы эквипотенциальных поверхностей и одномерного пространственного распределения линий тока имеет место в образце правильной геометрической формы вблизи омических контактов, если они неоднородны по площади. В предельном случае использования точечных токовых контактов эту погрешность можно свести к значению, не превышающему 0,5%. Отклонение реального контакта зонда от теоретической модели точечного потенциального контакта также вносит систематическую погрешность в результат измерения.

Случайная составляющая относительной погрешности измерений, обусловленная невоспроизводимостью расстояния между зондами при независимой фиксации каждого из зондов со среднеквадратическим отклонением Δs , определяется соотношением $\delta\rho/\rho = 1,41(2\Delta s/s)$ при доверительной вероятности 0,95.

На контакте металл - полупроводник при протекании электрического тока может возникать ряд физических эффектов и явлений, которые вносят существенную погрешность в результаты измерений. Основными из них являются: инжекция носителей заряда контактом, влияющая на проводимость образца; эффект Пельтье, приводящий к возникновению градиента температуры на образце и соответствующей этому градиенту термо - ЭДС; нагрев образца электрическим током, протекающим через образец.

Четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления

Четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления полупроводников является самым распространенным. Кроме высоких метрологических показателей преимущество четырехзондового метода состоит в том, что для его применения не требуется создания омических контактов к образцу, возможно измерение удельного сопротивления объемных образцов самой разнообразной формы и размеров, а также удельного сопротивления слоев полупроводниковых структур. Условием для его применения с точки зрения формы образца является наличие плоской поверхности, линейные размеры которой превосходят линейные размеры системы зондов.

Рассмотрим теоретические основы четырехзондового метода измерения удельного сопротивления применительно к образцу, представляющему собой полубесконечный объем, ограниченный плоской поверхностью.

На плоской поверхности образца вдоль прямой линии размещены четыре металлических зонда с малой площадью соприкосновения (рисунок 1), расстояния между которыми s_1, s_2, s_3 . Через два внешних зонда 1 и 4 пропускают электрический ток I_{14} , на двух внутренних зондах 2 и 3 измеряют разность потенциалов U_{23} . По измеренным значениям разности потенциалов между зондами 2 и 3 и тока, протекающего через зонды 1 и 4, можно определить удельное сопротивление образца.

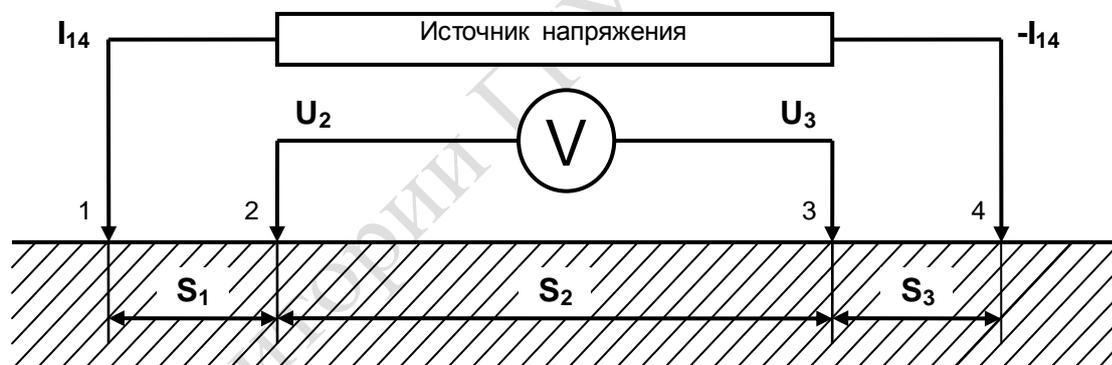


Рисунок 1 – Схема измерения удельного сопротивления четырехзондовым методом

Чтобы найти аналитическую связь между удельным сопротивлением ρ , током I_{14} и напряжением U_{23} , необходимо сначала решить более простую задачу, связанную с протеканием тока через отдельный точечный зонд, находящийся в контакте с плоской поверхностью полупроводникового образца полубесконечного объема (рисунок 1). Так как пространственное распределение электрического потенциала $U(r)$ в образце имеет сферическую симметрию, то для его определения достаточно решить уравнение Лапласа в сферической системе координат, в котором оставлен лишь член, зависящий от r :

$$\Delta U(r) = r^{-2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dU}{dr} \right) = 0, \quad (1)$$

при условии, что потенциал в точке $r = 0$ положителен и стремится к нулю при очень больших r . Интегрирование этого уравнения с учетом указанных граничных условий позволяет получить следующее решение: $U(r) = -C/r$. Константу интегрирования можно вычислить из условия для напряженности электрического поля E при некотором значении $r = r_0$:

$$E(r_0) = - \left. \frac{dU}{dr} \right|_{r=r_0} \quad (2)$$

Плотность тока, протекающего через полусферу радиусом r_0 : $j = I/(2\pi r_0^2)$, а в соответствии с законом Ома $j = E/\rho$. Окончательно получим $U(r) = I\rho/(2\pi r)$. Очевидно, что распределение потенциала будет таким же, когда форма контакта зонда с поверхностью образца имеет вид полусферы конечного диаметра.

Пусть радиус контакта равен r_1 . Тогда электрическое напряжение на образце равно электрическому потенциалу зонда:

$$U(r) = I\rho/(2\pi r_1) \quad (3)$$

Из сравнения напряжения на приконтактном слое толщиной (r_2-r_1) и напряжения на образце $U(r_2) - U(r_1) = I\rho(r_2-r_1)/(2\pi r_1 r_2)$ следует, что основное изменение потенциала происходит вблизи зонда. Например, при $r_2 = 10r_1$ напряжение на образце превосходит напряжение на слое толщиной (r_2-r_1) всего лишь на 10%. Это означает, что значение протекающего через зонд тока определяется главным образом сопротивлением приконтактной области, протяженность которой тем меньше, чем меньше радиус контакта.

Расположение зондов по вершинам квадрата

Линейное расположение зондов на поверхности полупроводникового образца не является единственно возможным. Можно, например, использовать систему четырех зондов, расположенных по вершинам квадрата. В этом случае ток пропускают через зонды, образующие одну из сторон квадрата, например через зонды 1 и 2, а напряжение измеряют на другой паре зондов 3 и 4. Используя соотношение (1), легко рассчитать, что при таком расположении зондов удельное сопротивление

$$\rho = 2\pi \frac{s}{2 - \sqrt{2}} \frac{U_{34}}{I_{12}}. \quad (4)$$

Расположение зондов по вершинам квадрата обеспечивает снижение случайных ошибок в два раза. Это достигается за счет выполнения измерений при пропускании тока последовательно через каждую пару соседних зондов, изменения полярности приложенного напряжения и последующего

вычисления среднего значения удельного сопротивления по результатам восьми измерений.

Электрическая схема и методика измерения

Электрическая схема измерения удельного сопротивления четырехзондовым методом представлена на рисунке 2.

Ток (I) от регулируемого источника постоянного напряжения (ИН) пропускается через зонды 1 и 4. Желательно, чтобы источник напряжения имел высокое выходное сопротивление, т.е. являлся генератором тока. Напряжение, возникающее при этом между зондами 2 и 3, регистрируется вольтметром (V). Сила тока фиксируется миллиамперметром или находится путем измерения напряжения на эталонном резисторе, включенном последовательно в цепь зондов 1 и 4. Наименьший рабочий ток определяется возможностью измерения малых напряжений; наибольший рабочий ток ограничивается нагревом образца.

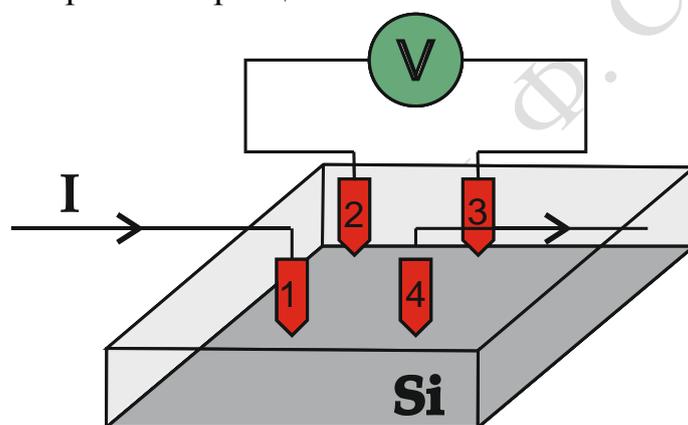


Рисунок 2 – Электрическая схема четырехзондового метода измерения удельного сопротивления

Чтобы контактные сопротивления потенциальных зондов не влияли на результаты измерений, разность потенциалов необходимо фиксировать в отсутствие тока через них.

Измерения проводят с помощью цифровых вольтметров с высоким входным сопротивлением. В таком случае ток через измерительные зонды пренебрежимо мал, что позволяет отказаться от использования компенсационных методов измерений. Применение милливольтметра с входным сопротивлением порядка 10^8 Ом дает возможность измерять удельное сопротивление на слитках и пластинах кремния до $3000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Погрешность измерения удельного сопротивления четырехзондовым методом определяется как составляющими погрешности входящих в формулы (3) или (4) величин, так и размером контактной площадки зонда, сопротивлением контактов, нестабильностью температуры образца, термо-ЭДС, освещенностью образца, инжекцией носителей заряда и др.

Различие в расстояниях между зондами ведет к погрешности измерения ρ . Если, например, каждый из зондов смещен относительно своего номинального положения на Δx_i , то относительная погрешность

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{4s} (\Delta x_1 - 5\Delta x_2 + 5\Delta x_3 - 3\Delta x_4) \quad (5)$$

Когда конструкция зондовой головки допускает независимое смещение каждого зонда относительно своего номинального положения со средне-квадратическим отклонением Δs , то случайная погрешность измерения $\Delta\rho/\rho = 2,06(2\Delta s/s)$ при доверительной вероятности 0,95.

Неточность контакта, т. е. конечные размеры контактной площадки, вносит систематическую погрешность в результаты измерений. Эта погрешность зависит от $(r_0/s)^2$, она различна для токовых и потенциальных контактов. Практически этой погрешностью можно пренебречь, если отношение $r_0/s < 0,05$.

Источником погрешности могут служить фотопроводимость и фото-ЭДС, возникающие под действием освещения и особенно сильно проявляющиеся в образцах с высоким удельным сопротивлением. Так как полупроводники имеют относительно высокий температурный коэффициент сопротивления, то при измерениях за счет протекания через образец тока может произойти не только локальный нагрев, но и повышение температуры всего образца. Поэтому для уменьшения нагрева образца необходимо выбирать рабочий ток минимальным, а температуру образца поддерживать постоянной. Рабочий ток, однако, должен обеспечивать необходимую точность измерений разности потенциалов. Измерение разности потенциалов производят при двух направлениях тока и полученные значения усредняют, исключая таким способом продольную термо-ЭДС, возникающую на образце вследствие градиента температуры. Уменьшение рабочего тока одновременно снижает модуляцию проводимости образца, вызванную инжекцией носителей заряда при протекании тока.

Рекомендуется использовать четырехзондовую измерительную головку с четырьмя зондами из карбида вольфрама с межзондовым расстоянием $(1,3 \pm 0,01)$ мм и максимальным линейным размером рабочей площадки зонда не более 60 мкм. Усилие прижима зонда к поверхности слитка составляет 0,5 - 2,0 Н. Измерительные приборы обеспечивают измерение силы электрического тока с погрешностью не более 0,5%, а электрического напряжения - с погрешностью не более 1% при необходимом для правильного измерения входном сопротивлении. Предельные значения рабочих токов и измеряемых напряжений, а также входных сопротивлений в зависимости от удельного сопротивления кремния приведены в таблице 1.

При выполнении всех требований к применяемым средствам измерения и соблюдении необходимых условий интервал, в котором находится слу-

чайная погрешность измерения удельного сопротивления, характеризующая сходимость результатов, равен $\pm 2\%$ при доверительной вероятности 0,95. Интервал, в котором находится погрешность измерения, определяющая воспроизводимость измерений при соблюдении требований стандарта, равен $\pm 5\%$ при доверительной вероятности 0,9.

Таблица 1 – Предельные значения рабочих токов и измеряемых напряжений, а также входных сопротивлений в зависимости от удельного сопротивления для кремния

Удельное сопротивление ρ , Ом·см	Рабочий ток I, А	Измеряемое напряжение U, В	Входное сопротивление не менее R, Ом
10^{-3}	$1.0 \cdot 10^{-1}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^3$
10^{-2}	$1.0 \cdot 10^{-1}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^4$
10^{-1}	$1.0 \cdot 10^{-1}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^5$
1.0	$8.2 \cdot 10^{-1}$	$1.0 \cdot 10^{-1}$	$1.0 \cdot 10^6$
10^1	$8.2 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-1}$	$1.0 \cdot 10^7$
10^2	$8.2 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-1}$	$1.0 \cdot 10^8$
10^3	$8.2 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-1}$	$2.0 \cdot 10^8$

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется удельной проводимостью полупроводников?
2. Зависимость удельной проводимости полупроводников от температуры.
3. Опишите двухзондовый метод измерения удельного сопротивления.
4. Погрешности двухзондового метода измерения удельного сопротивления.
5. Опишите четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления.
6. Погрешности четырехзондового метода измерения удельного сопротивления.
7. Какие преимущества и недостатки рассматриваемых методов?

Лабораторная работа 4

Изучение двух- и четырехзондового метода измерения удельного сопротивления полупроводников

Цель работы: Изучение электропроводности полупроводниковых материалов и методов определения их удельного сопротивления.

Приборы и принадлежности: Источник питания, лабораторная установка, цифровой миллиамперметр и вольтметр.

Описание установки

На плоской поверхности образца вдоль прямой линии размещены четыре металлических зонда с малой площадью соприкосновения (рисунок 1), расстояния между которыми s_1, s_2, s_3 . Через два внешних зонда 1 и 4 пропускают электрический ток I_{14} , на двух внутренних зондах 2 и 3 измеряют разность потенциалов U_{23} . По измеренным значениям разности потенциалов между зондами 2 и 3 и тока, протекающего через зонды 1 и 4, можно определить удельное сопротивление образца.

Ход работы

Упражнение 1 - Измерение удельного сопротивления двухзондовым методом

1. Закрепите зонды на прямой линии;
2. Измерьте расстояние S между зондами и занесите его значения в таблицу 2;
3. Зонды 1 и 4 подключите к источнику питания, а зонды 2 и 3 – к цифровому вольтметру;
4. По шкале блока питания определите ток I_{14} и занесите его в таблицу 2;
5. По вольтметру определите напряжение U_{23} и занесите его в таблицу 2;
6. По формуле (4) вычислите ρ и занесите ее значение в таблицу 2;
7. Прodelайте п.п. 3-5 пять раз, меняя с помощью блока питания ток I_{14} ;
8. Выполните обработку результатов измерений;
9. Рассчитайте погрешности измерения удельного сопротивления;
10. Сделайте выводы.

Таблица 2

№ п/п	$S, \text{ м}$	$I_{14}, \text{ А}$	$U_{23}, \text{ В}$	$\rho, \text{ Ом*м}^3$	$\rho \pm \Delta\rho, \text{ Ом*м}^3$
1					
2					
3					
....					

Упражнение 2 - Измерение удельного сопротивления полупроводника при расположении зондов в вершинах квадрата (четырёхзондовый метод)

1. Закрепите зонды установки в вершинах квадрата;
2. Измерьте расстояние S между ближайшими зондами и занесите его значение в таблицу 3;
3. Зонды 1 и 4 подключите к источнику питания, а зонды 2 и 3 подключить к вольтметру;
4. По шкале блока питания определите ток I_{14} и занесите его в таблицу 3;
5. По вольтметру определите напряжение U_{23} и занесите его в таблицу 3;
6. По формуле (4) вычислите ρ и занесите ее значение в таблицу;
7. Прodelайте п.п. 3-5 пять раз, меняя с помощью блока питания ток I_{14} ;

8. Проведите математическую обработку результатов;
9. Сделайте выводы.

Таблица 3

№ п/п	S, м	I ₁₄ , А	U ₂₃ , В	ρ , Ом*м ³	$\rho \pm \Delta\rho$, Ом*м ³
1					
2					
3					
...					

Содержание отчета

1. Рисунок лабораторной установки с пояснениями к принципу ее работы.
2. Заполненные таблицы по упражнениям 1 и 2 с расчетом погрешностей измерений.
3. Расчетные данные для удельного сопротивления по двум методам измерения.
4. Выводы по результатам проведенных измерений.

Тема 5

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ

1. Активные диэлектрики, сегнетоэлектрики
2. Кристаллическая структура сегнетоэлектрика
3. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости
4. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках и их характеристика

Основные понятия по теме

Сегнетокерамика широко используется в технике, в частности в электро- и радиотехнике, в первую очередь в качестве диэлектрической прослойки в конденсаторах, поскольку даже в поляризованном состоянии сегнетоэлектрики остаются хорошими изоляторами с большой диэлектрической проницаемостью. В то же время за счет поляризации сегнетоэлектрики способны накапливать электрический заряд, поэтому сегнетокерамика используется для изготовления низкочастотных малогабаритных конденсаторов, варикондов и других активных элементов электрических схем.

Сегнетоэлектриками называют полярные диэлектрики, которые в определенном интервале температур спонтанно (самопроизвольно) поляризованы, т.е. обладают поляризованностью при отсутствии внешнего электрического поля. К сегнетоэлектрикам относятся сегнетова соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, титанат бария BaTiO_3 , триглицинсульфат $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{SO}_4$. В настоящее время известно уже свыше ста сегнетоэлектриков.

Многие свойства сегнетоэлектриков отличаются от свойств, которых следовало бы ожидать для однородных материалов. Это обусловлено наличием доменов точно также, как и у ферромагнетиков. Так, например, характер тока переключения тесно связан с поведением доменов. Домены имеются как в монокристалле, так и в кристаллах керамического образца. Сегнетоэлектрический домен представляет собой макроскопическую область, в которой направление спонтанной поляризации одинаково и отличается от направления спонтанной поляризации в соседних доменах.

Разделяющие доменные стенки могут перемещаться внутри монокристалла; при этом одни домены увеличиваются, а другие уменьшаются. Теоретически было рассчитано Ландауэром и другими, что в титанате бария необходимое для реполяризации монокристалла поле должно составлять около 200 кВ/см, однако практически реполяризация легко осуществляется в поле порядка 1 кВ/см, очевидно, благодаря тому, что в кристалле всегда присутствуют небольшие домены с обратным направлением поляризации. При реполяризации эти домены растут либо за счет

перемещения доменных стенок, либо за счет некоторого сходного процесса. В монокристалле относительная ориентация электрических моментов доменов определяется симметрией кристаллической решетки. Например, в тетрагональной модификации титаната бария (BaTiO_3) возможны шесть направлений спонтанной поляризованности: антипараллельных или перпендикулярных друг другу. Соответственно для этого случая различают 180-градусные и 90-градусные доменные границы. Энергетически наиболее выгодной является такая структура, при которой обеспечивается электрическая нейтральность доменных границ, т.е. проекция вектора поляризации на границу со стороны одного домена должна быть равна по длине и противоположна по направлению проекции вектора поляризации со стороны соседнего домена. По этой причине электрические моменты доменов ориентируются в одном направлении. Установлено, что линейные размеры доменов составляют от 10^{-4} до 10^{-1} см.

Внешнее электрическое поле изменяет направления электрических моментов доменов, что создает эффект очень сильной поляризации. Этим объясняются свойственные сегнетоэлектрикам сверхвысокие значения диэлектрической проницаемости (до сотен тысяч). Доменная поляризация связана с процессами зарождения и роста новых доменов за счет смещения доменных границ, которые в итоге вызывают переориентацию вектора спонтанной поляризованности в направлении внешнего электрического поля.

Сегнетоэлектрики обладают рядом своеобразных электрических свойств:

- 1) Диэлектрическая проницаемость ϵ сегнетоэлектриков очень велика (10^3 - 10^4), в то время как у большинства обычных диэлектриков она составляет несколько единиц.
- 2) Диэлектрическая проницаемость ϵ сегнетоэлектриков является функцией напряженности \vec{E} внешнего электрического поля (рисунок 1) и температуры (рисунок 3).

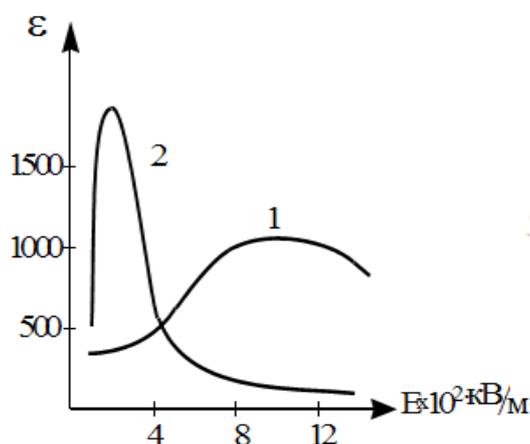


Рисунок 1– Зависимость ϵ от напряженности электрического поля.

На практике для сегнетоэлектриков с фазовым переходом температурная зависимость диэлектрической проницаемости описывается законом Кюри – Вейсса:

$$\varepsilon = \frac{C}{(T - T_c)} \quad (1)$$

где $C = \frac{1}{\alpha T_c}$ - постоянная Кюри, T_c – температура Кюри – Вейсса, при которой происходит фазовый переход, а α – меняет знак.

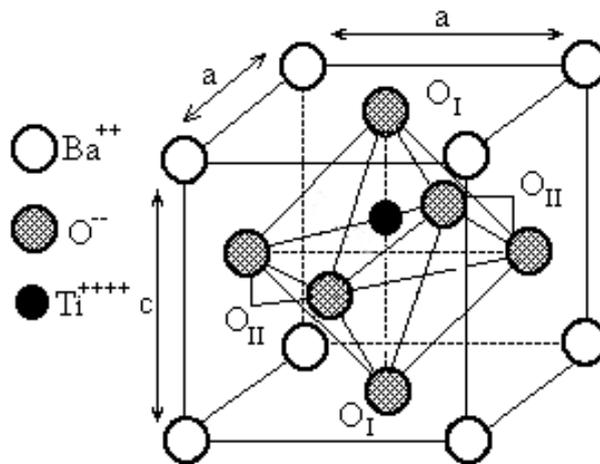


Рисунок 2 – Кристаллическая структура BaTiO_3 (структура перовскита) при комнатной температуре

Титанат бария при комнатной температуре имеет поликристаллическую структуру перовскита, в которой атомы кислорода образуют октаэдр, в центре которого находится атом титана (рисунок 2). Смещение ионов Ti , O_I и O_{II} по оси Z соответственно на $0,014c$, $-0,023c$ и $-0,04c$ является причиной возникновения спонтанной поляризации $P_s \approx 0,25 \text{ Кл/м}^2$. На рисунке 3 приведены температурная зависимость ε и $\text{tg}\delta$, а также ход зависимости $1/\varepsilon(T)$ и изменение кристаллической структуры при тепловом переходе из сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую фазу. Следует обратить внимание, что каждый структурный переход сопровождается фазовым переходом в точке Кюри $T_c = 400^\circ\text{C}$. Для чистого BaTiO_3 температура T_c на 12° ниже.

Постоянная Кюри-Вейсса для титаната бария $C = 1,2 \cdot 10^5 \text{ К}$, а величина $\varepsilon_{\text{max}} = 10^5$.

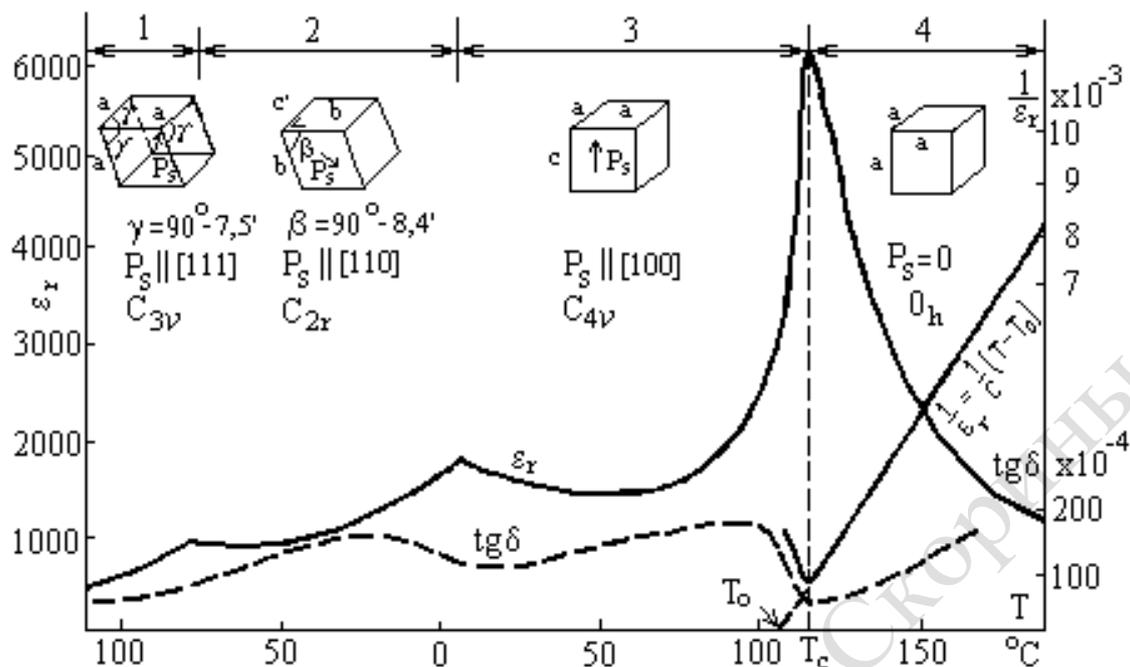


Рисунок 3 – Температурная зависимость диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ керамики BaTiO_3 (T_c – точка Кюри, T_0 – температура Кюри – Вейсса, 1 – ромбоэдрическая фаза, 2 – ромбическая фаза, 3 – тетрагональная фаза, 4 – кубическая фаза)

Значения констант некоторых сегнетоэлектриков с фазовым приходом первого рода для закона Кюри – Вейсса приведены в таблице 1.

Таблица 1- Константы сегнетоэлектриков

Кристалл	$C, 10^4 \text{ К}$	$T_c, \text{ К}$	$T_0, \text{ К}$
BaTiO_3	17	381	370
KNbO_3	27	689	623
PbTiO_3	11	769	693
KH_2PO_4	0.3	123	123

Вопросы для самоконтроля

1. Какие диэлектрики составляют класс сегнетоэлектриков?
2. Как изменяется поляризация с изменением электрического поля для сегнетоэлектриков?
3. Что выражает зависимость Кюри – Вейсса?
4. В чем различие фазовых переходов первого и второго рода?
5. Чем отличается спонтанная поляризация от индуцированной?
6. Почему и в каких структурах возможна спонтанная поляризация?

Лабораторная работа 5

Изучение свойств фазовых переходов в сегнетоэлектриках

Цель работы: изучение основ и кинетики фазовых переходов в сегнетоэлектриках, получение знаний о строении и структуре данного класса веществ.

Приборы и принадлежности: лабораторная установка для изучения фазовых переходов в сегнетоэлектриках, цифровой LC-метр, источник питания.

Описание установки

Для исследования зависимости $\varepsilon(T)$ используется схема, представленная на рисунке 4, позволяющая измерять емкость C_0 сегнетоэлектрика как функцию температуры.

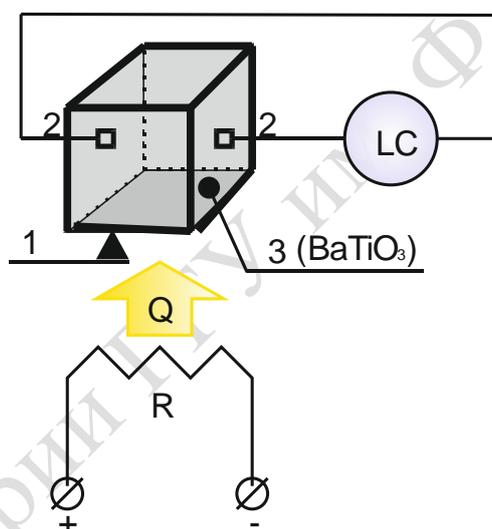


Рисунок 4 – Структурная схема лабораторной установки (1- датчик температуры; 2- проводящие обкладки; 3- исследуемый образец; R- нагревательный элемент, резистор)

Из формулы для расчета электрической емкости плоского конденсатора, диэлектрическая проницаемость ε выражается как:

$$\varepsilon = \frac{c_0 d}{\varepsilon_0 s} = \frac{4c_0 d}{\varepsilon_0 \pi D^2} \quad (2)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $d = 10$ мм, $S = 42$ мм – соответственно толщина и площадь образца. Для определения C_0 для каждой температуры необходимо определить величины диэлектрической проницаемости ε . По измеренным величинам построить график.

На рисунке 5 представлен общий вид лабораторной установки и обозначены элементы управления.

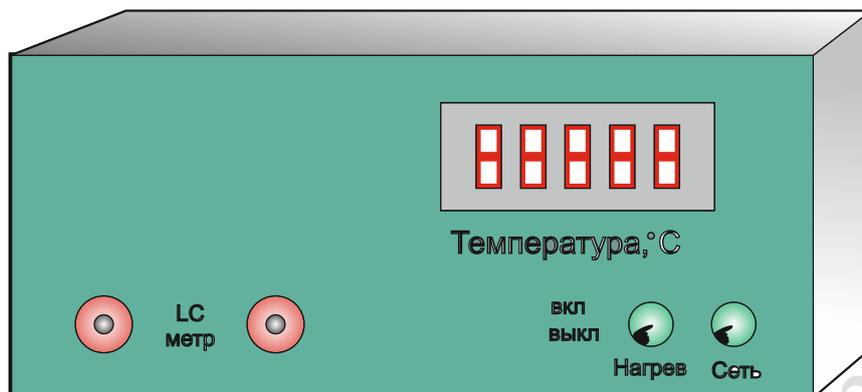


Рисунок 5 – Общий вид лабораторной установки с элементами управления

В корпусе лабораторной установки расположен цифровой измеритель температуры с цифровым датчиком температуры, который закреплен на самом исследуемом образце. Исследуемый образец сегнетокерамики типа BaTiO_3 находится в специальном термостате. Включение и отключение нагрева изучаемого образца производят элементами управления с передней панели установки. На исследуемом образце так же закреплены проводящие обкладки для подключения внешнего прибора.

Технические характеристики лабораторной работы приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Технические характеристики лабораторной работы

Параметр	Значение
Напряжения питания U	220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность P	15 Вт
Диапазон измерения температуры	от 0 до 120 °C
Диапазон температуры нагревательного элемента	< 50 °C
Физические размеры образца сегнетоэлектрика	(60*70*100) мм
Площадь обкладки сегнетоэлектрика	16 мм ²

Ход работы

1. Включить приборы в сеть.
2. Записать показания измерителя емкости C_0 .
3. Включить нагрев и нагреть исследуемый образец до температуры 50 °C.
4. Провести измерения емкости образца при различных температурах при

остывании до комнатных температур.

5. Измерения проводить с шагом температур 1°C .
6. Провести измерения не менее 5 раз.
7. Построить таблицу 3 и записать измеренные значения, рассчитать погрешности.

Таблица 3 – Результаты расчета лабораторной работы

№	T, °C	C, пФ	$C \pm \Delta C$, пФ	$\varepsilon * 10^{-12}$	$(\varepsilon \pm \Delta\varepsilon) * 10^{-12}$
1					
2					
3					
4					
5					
1					
2					
3					
4					
5					

8. По формуле 2 рассчитать диэлектрическую проницаемость для всех измеренных температур.
9. Построить график зависимости диэлектрической проницаемости ε от температуры T.
10. По графику определить температуру Кюри T_c – температуру фазового перехода.
11. Зная T_c , рассчитать постоянную Кюри.
12. Сделать выводы.

Содержание отчета

1. Заполненная таблица результатов измерений.
2. График зависимости диэлектрической проницаемости ε от температуры.
3. Определение температуры Кюри по графику.
4. Расчет постоянной Кюри.
5. Расчет погрешностей измерений.
6. Выводы по результатам проведенных измерений.

Тема 6 ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ВАН-ДЕР-ПАУ

1. Проводимость и подвижность носителей заряда
2. Измерение удельного сопротивления методом Ван-дер-Пау
3. Средняя скорость движения электронов
4. Электронный газ в проводнике

Основные понятия по теме

1. Проводимость и подвижность носителей. Проводимость полупроводников

Одним из основных электрофизических параметров вещества является его удельное сопротивление ρ (Ом·см) или обратная ему величина - удельная электрическая проводимость σ (Ом⁻¹·см⁻¹).

Рассмотрим для примера электронный полупроводник, где плотность тока \vec{j} определяется концентрацией свободных носителей n , средней дрейфовой скоростью $|\vec{V}|$ и зарядом e :

$$\vec{j} = e \cdot n \cdot |\vec{V}|. \quad (1)$$

Средняя скорость дрейфа очень просто связана с параметром, характеризующим рассеяние носителей заряда при их движении в решётке кристалла - средним временем свободного пробега носителей $|\tau|$, напряжённостью электрического поля \vec{E} , зарядом и эффективной массой дырки или электрона:

$$|\vec{V}| = \frac{e \cdot |\tau|}{m} \vec{E} = \mu \cdot \vec{E}, \quad (2)$$

где μ - подвижность.

Таким образом, из (1) и (2) следует

$$\vec{j} = en|\vec{V}| = en\mu \cdot \vec{E}, \quad (3)$$

а из закона Ома в дифференциальной форме следует, что величина $e \cdot n \cdot \mu$ имеет смысл удельной электрической проводимости:

$$\sigma = en\mu = \frac{1}{\rho}. \quad (4)$$

Если имеется полупроводник с обоими типами носителей заряда, то

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p). \quad (5)$$

Если полупроводник легирован примесными атомами какого либо одного сорта с малой энергией ионизации (например, атомами В, Р, As, Si и Ge), то приближённо можно считать, что уже при комнатной температуре

вся примесь однократно ионизирована, т.е. $n \approx N$ или $p \approx N$, где N - полная концентрация легирующей примеси. И, если известно μ , то по σ или по ρ , которые можно непосредственно измерить, определяется N . Концентрация легирующей примеси является очень важным параметром полупроводникового материала. Непосредственно для наиболее важных полупроводниковых материалов (Si, Ge, GaAs) обоих типов N удобно определять по графику Ирвина (рисунок 1).

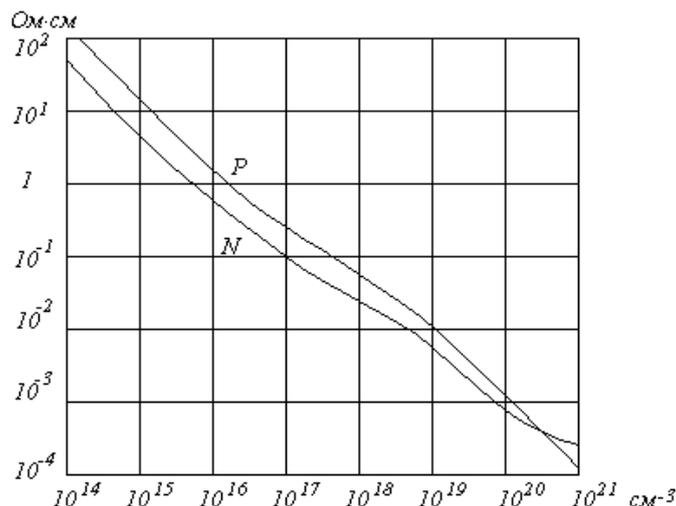


Рисунок 1 – График Ирвина

(Зависимость удельного сопротивления от концентрации легирующей примеси для полупроводников N и P типа проводимости)

Этот график получен экспериментально на основе многочисленных измерений при комнатной температуре подвижности носителей в полупроводниках с известной заранее концентрацией примеси. При небольших концентрациях примеси график даёт хорошее соответствие проводимости и концентрации.

Определяя N , надо иметь ввиду, что это концентрация электрически активной примеси, а не полная концентрация, так как при высоких уровнях легирования эти две концентрации могут отличаться.

В отсутствие внешнего поля электронный газ в проводнике находится в равновесном состоянии и описывается равновесными функциями распределения Максвелла - Больцмана, если газ не вырожден, и Ферми - Дирака, если газ вырожден. Как видно из формул,

$$f(E) = e^{M/kT} e^{-E/kT}, \quad (6)$$

$$f_{\phi}(E) = \frac{1}{e^{E-M/kT} + 1}, \quad (7)$$

эти функции зависят от квадрата скорости движения электронов (энергия электронов E пропорциональна v^2) и поэтому являются симметричными

относительно изменения знака скорости: при замене v на $-v$ функции не меняются. Графики этих функций симметричны относительно оси ординат (рисунок 2). Физически это означает, что плотность заполнения состояний, отличающихся друг от друга направлением скорости, одинакова.

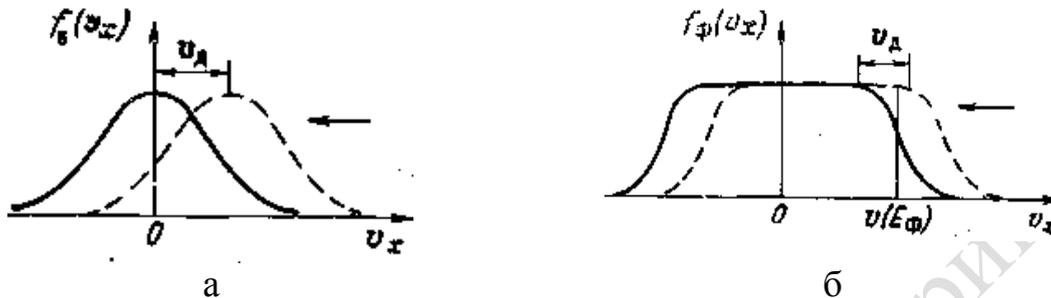


Рисунок 2 – Графики функций распределения Максвелла–Больцмана (а) и Ферми–Дирака (б).

По этой причине средняя скорость движения электронов в любом направлении равна нулю. Этим и объясняется тот факт, что в кристалле, содержащем сколь угодно большое число свободных носителей заряда, электрический ток отсутствует.

Установление равновесия в электронном газе происходит в результате взаимодействия электронов с дефектами решетки. Основными из них являются тепловые колебания и примеси. Электронная волна, распространяясь в кристалле, взаимодействует с колебаниями решетки и рассеивается. На корпускулярном языке это взаимодействие можно трактовать как столкновение электронов с фононами. В результате таких столкновений и происходит рассеяние электронов, приводящее к установлению равновесного их распределения.

При наличии в решетке примесных центров электроны могут локализоваться («прилипнуть») на них, а затем делокализоваться («отлипнуть»), обладая в общем случае уже иной энергией импульсов. На корпускулярном языке это означает столкновение электронов с примесными центрами и рассеяние, которое в отсутствие внешнего поля также будет приводить к установлению равновесного распределения.

Если к кристаллу приложить внешнее поле E , то в нем возникает электрический ток, плотность которого i , согласно закону Ома, пропорциональна E :

$$i = \sigma E \quad (8)$$

Коэффициент пропорциональности σ называется удельной электропроводностью проводника, а величина ρ , обратная σ - называется удельным сопротивлением проводника:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (9)$$

Появление тока в проводнике свидетельствует о возникновении в нем под действием поля направленного движения электронов, которое называют дрейфом. Так как заряд электрона отрицателен, то дрейф происходит в направлении, противоположном \vec{E} . Обозначим его среднюю скорость через v_d . Построим прямоугольный параллелепипед с основанием $S=1\text{ м}^2$ и боковой стороной, равной x_d (рисунок 3).

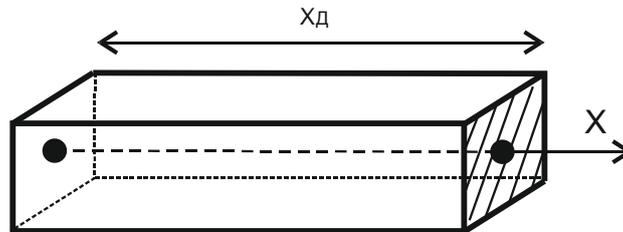


Рисунок 3 – Расчет плотности тока в проводнике

Объем этого параллелепипеда равен V_d , число электронов в нем nV_d , где n - концентрация электронов в проводнике. Все эти электроны пройдут в течение 1с через заштрихованное основание параллелепипеда и образуют ток плотности

$$\vec{i} = -en v_d \quad (10)$$

Знак минус указывает на то, что ток направлен противоположно v_d . Сравнивая (8) и (10), находим:

$$\vec{v}_d = -\frac{\sigma}{ne} \vec{E} \quad (11)$$

Из формулы видно, что средняя скорость дрейфа пропорциональна напряженности поля. Коэффициент пропорциональности

$$\mu = \frac{\sigma}{ne} \quad (12)$$

называется подвижностью носителей. Для электронов $\mu_n < 0$, для дырок $\mu_p > 0$.

На основании (12) формулу (11) можно переписать так:

$$\vec{v}_d = \mu \vec{E} \quad (13)$$

Из (12) следует, что

$$\sigma = ne\mu \quad (14)$$

Таким образом, вопрос об определении удельной проводимости проводника сводится к определению концентрации и подвижности носителей в нем.

В случае полупроводника, содержащего электроны и дырки, выражение (14) обобщается следующим образом:

$$\sigma = e(nu_n + pu_p) \quad (15)$$

где n , p - концентрация электронов и дырок соответственно; u_n , u_p - их подвижность.

2. Измерение удельного сопротивления методом Ван-дер-Пау.

Сущность метода заключается в следующем. На периферии плоского образца (рисунок 4) создаются четыре контакта: А, В, С и D.

Измеряют два сопротивления: $R_{ABCD} = U_{CD} / I_{AB}$ и $R_{BCDA} = U_{DA} / I_{BC}$. Теоретический анализ приводит к следующему соотношению:

$$c/d = R_s = (p/\ln 2) \left[R_{ABCD} + R_{BCDA} \right] / 2 \cdot f(R_{ABCD} / R_{BCDA}) \quad (16)$$

где d - толщина образца (толщина образца много меньше расстояния между контактами); f - функция поправок, зависящая только от отношения R_{ABCD} / R_{BCDA} и удовлетворяющая уравнению

$$\frac{(R_{ABCD} / R_{BCDA}) - 1}{(R_{ABCD} / R_{BCDA}) + 1} = \frac{\cosh^{-1} \left(\frac{1}{2} \exp \left[\ln 2 / f \right] \right)}{(\ln 2) / f} \quad (17)$$

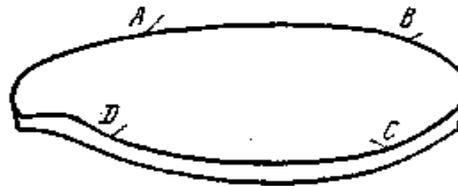


Рисунок 4 – Расположение контактов при измерении методом Ван-дер-Пау

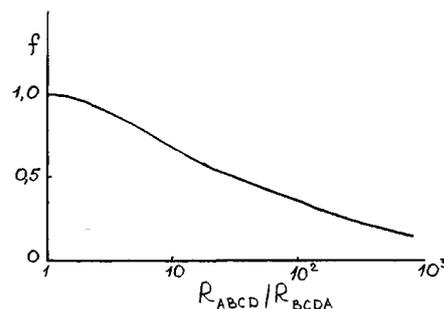


Рисунок 5 – Функция поправок при измерении методом Ван-дер-Пау

График и табулированные значения функции поправок f приведены на рисунке 5 и в таблице 1.

При выводе формул (16), (17) предполагалось, что контакты располагаются строго по периферии образца и имеют точечные размеры.

Для определения удельного сопротивления измеряют толщину плоско-

го образца с помощью индикатора с погрешностью измерений не более 1%. Погрешность измерений тока и напряжения при использовании приборов с цифровым отсчетом не более 0,1%. Таким образом, метод Ван дер Пау является одним из наиболее точных методов контроля удельного сопротивления образцов. Он используется для контроля удельного сопротивления плоских кристаллов небольших размеров, например кристаллов карбида кремния. Метод применяется также для отбора и сортировки кристаллов (чипов) кремния, применяющихся для изготовления стабилитронов.

Таблица 1 – Функция $f(R_{ABCD} / R_{BCDA})$

$\frac{R_{ABCD}}{R_{BCDA}}$	f	$\frac{R_{ABCD}}{R_{BCDA}}$	f	$\frac{R_{ABCD}}{R_{BCDA}}$	f
1,0	1,000	6,0	0,815	30	0,545
1,2	0,995	6,5	0,800	35	0,520
1,4	0,990	7,0	0,790	40	0,500
1,6	0,985	7,5	0,775	45	0,485
1,8	0,975	8,0	0,765	50	0,475
2,0	0,970	8,5	0,757	55	0,465
2,2	0,963	9,0	0,747	60	0,455
2,4	0,955	9,5	0,740	70	0,440
2,6	0,945	10	0,730	80	0,427
2,8	0,935	12	0,700	90	0,415
3,0	0,925	14	0,675	100	0,405
3,5	0,905	16	0,650	150	0,375
4,0	0,882	18	0,625	200	0,367
4,5	0,865	20	0,610	300	0,355
5,0	0,847	23	0,592	400	0,353
5,5	0,830	25	0,570	500	0,350

Вопросы для самоконтроля

1. Собственная и примесная проводимость полупроводников.
2. Удельная проводимость полупроводников.
3. От чего зависит проводимость полупроводников?
4. Что называется подвижностью носителей заряда?
5. Методы измерения удельной проводимости полупроводников.
6. Метод Ван-дер-Пау измерения удельного сопротивления.
7. Преимущества и недостатки метода Ван-дер-Пау.
8. Погрешности измерений удельного сопротивления, локальность метода.

Лабораторная работа 6

Измерение удельного сопротивления методом Ван-дер-Пау

Цель работы: Изучение теоретических основ проводимости полупроводниковых материалов и измерение удельного сопротивления полупроводников методом Ван-дер-Пау.

Приборы и принадлежности: лабораторный стенд с установленным образцом полупроводника, источник питания, цифровой комбинированный прибор.

Описание установки

На периферии плоского образца создаются четыре контакта: А, В, С, D (рисунок 4). Контакты методом пайки выведены на приборную панель лабораторной установки.

Измеряют два сопротивления: $R_{ABCD} = U_{CD} / I_{AB}$ и $R_{BCDA} = U_{DA} / I_{BC}$.

Ход работы

1. Измерьте расстояние между контактами S и толщину образца d и занесите их в таблицу 2;
2. Контакты АВ подключите к источнику питания, а CD к вольтметру;
3. По шкале блока питания определите ток I_{AB} и занесите его значение в таблицу 2;
4. По показаниям вольтметра определите напряжение U_{CD} и занесите его значение в таблицу 2;
5. По формулам (9), (10) вычислите ρ и занесите его значение в таблицу 2;
6. Проведите п.п. 3-5 пять раз, меняя с помощью блока питания величину тока I_{AB} ;
7. Выполните оценку погрешностей результатов измерений;
8. Сделайте выводы.

Таблица 2 – Результаты измерений удельного сопротивления

№ п/п	S, м	d, м	I_{AB} , А	U_{CD} , В	ρ , Ом·м ³	$\rho \pm \Delta\rho$, Ом·м ³

Содержание отчета

1. Рисунок лабораторной установки с пояснениями к принципу ее работы.
2. Заполненная таблица результатов измерений удельного сопротивления.
3. Расчет погрешностей измерений.
4. Выводы по результатам проведенных измерений.

Тема 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1. Электропроводность полупроводников
2. Собственные и примесные полупроводники
3. Концентрация носителей заряда в p- и n-областях
4. Температурная зависимость электропроводности

Основные понятия по теме

Полупроводники - это большой класс веществ, имеющих при температуре 0К полностью заполненные валентные энергетические зоны, отделенные от незанятой электронами свободной зоны запрещенной зоной шириной $\Delta E_0 \approx (1-4)$ эВ. Удельное электросопротивление полупроводников при комнатной температуре лежит в интервале значений от 10^{-5} до 10^8 Ом · м.

Электропроводность полупроводников и ее температурная зависимость могут быть истолкованы с точки зрения зонной теории твердого тела. В зависимости от степени заполнения при абсолютном нуле температуры энергетических зон электронами и от ширины запрещенной зоны все твердые тела делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики.

Собственные полупроводники

Электропроводность химически чистых полупроводников называется собственной проводимостью. Явление собственной проводимости легко интерпретировать с помощью схемы энергетической зонной структуры полупроводников, показанной на рисунке 1.

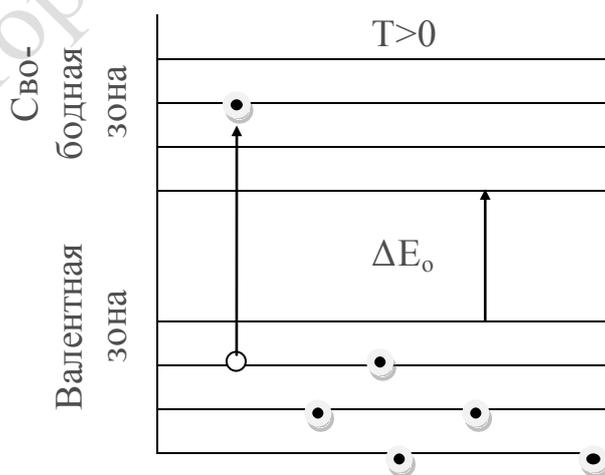


Рисунок 1 – Схема зон полупроводника с собственным типом проводимости

В создании проводимости полупроводников участвуют два вида носителей заряда - электроны и дырки. Электронная проводимость

(проводимость n-типа) возникает при перебросе электронов из валентной зоны, целиком заполненной электронами, в свободную зону.

Минимальная энергия, которая при этом может быть затрачена, равна ширине запрещенной зоны ΔE_0 и называется энергией *активации* собственной проводимости. Переход электронов из валентной зоны в свободную зону создает в валентной зоне вакантные энергетические уровни.

Движение электронов этой зоны под действием электрического поля эквивалентно движению положительных зарядов, численно равных заряду электрона - "дырок". Проводимость, обусловленная движением дырок, называется проводимостью p-типа.

Электропроводность любых полупроводников определяется концентрацией и подвижностью носителей заряда n- и p-типа. Общая удельная электропроводность полупроводников

$$\sigma = en_e u_e + en_p u_p, \quad (1)$$

где e - заряд электрона; n_e и n_p - равные концентрации электронов и дырок; где u_e и u_p - подвижности электронов и дырок.

Концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике определяется, в основном, температурой. При $T=0K$ электроны в свободной зоне отсутствуют. При любой температуре $T>0$ всегда существует вероятность перехода электронов из валентной зоны в свободную зону. Причем, с ростом температуры эта вероятность, а следовательно, и концентрация носителей заряда n- и p-типа в зоне проводимости существенно возрастают.

Зависимость концентрации электронов и дырок от температуры описывается выражением:

$$n_e = n_p = \left\{ (2\pi \sqrt{m_n m_p} kT)^{3/2} / h^3 \right\} \exp \left[-\Delta E_0 / (2kT) \right], \quad (2)$$

где m_n и m_p - эффективные массы электронов и дырок; ΔE_0 - ширина запрещенной зоны; h - постоянная Планка; k - постоянная Больцмана.

Температурная зависимость подвижности носителей заряда в собственных полупроводниках имеет вид

$$u_n = A_n T^{-3/2}; \quad u_p = A_p T^{-3/2}, \quad (3)$$

где A_n и A_p - коэффициенты пропорциональности.

Подставив выражения (2) и (3) в формулу (1), получим

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E_0 / 2kT), \quad (4)$$

где $\sigma_0 = \left\{ e(2\pi \sqrt{m_n m_p} k)^{3/2} / h^3 \right\} (A_n + A_p)$.

На практике часто пользуются не удельной электропроводностью, а удельным сопротивлением

$$\rho = 1/\sigma = \rho_0 \exp \left[-\Delta E_0 / 2kT \right] \quad (5)$$

где $\rho_0 = 1/\sigma_0$.

Выражение (5), полученное в рамках зонной теории, хорошо описывает наблюдаемое уменьшение сопротивления собственных полупроводников при повышении температуры.

Примесные полупроводники

Присутствие примесей, а также некоторые дефекты решетки могут весьма существенным образом влиять на электрические свойства полупроводников. Введение в химически чистый полупроводник донорных или акцепторных примесей приводит к появлению в запрещенной зоне соответственно донорных и акцепторных уровней. Схема зонной структуры примесных полупроводников приведена на рисунке 2.

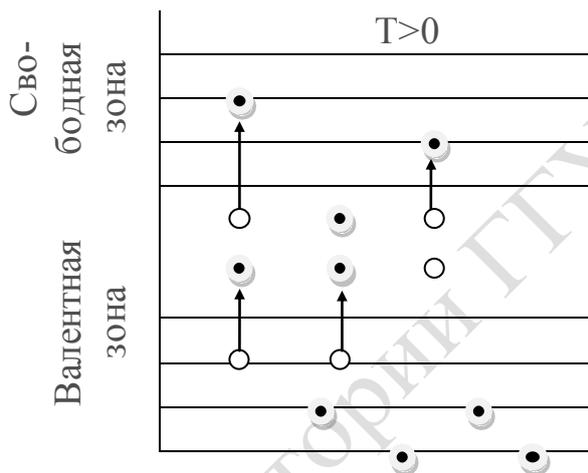


Рисунок 2 – Схема зон для полупроводника с примесным типом проводимости

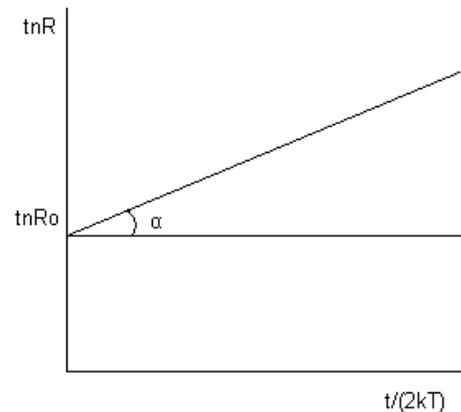


Рисунок 3 – График зависимости $\ln R = f[1/(2kT)]$ в системе координат $\ln R$

Проводимость примесных полупроводников, как и любых других, определяется концентрацией носителей заряда, их подвижностью и описывается выражением (1). Концентрация носителей заряда в примесных полупроводниках складывается из концентрации собственных носителей и концентрации примесных носителей. При этом концентрация примесных носителей заряда резко увеличивается при повышении температуры, и уже при комнатной температуре во много раз превышает концентрацию собственных носителей. Температурная зависимость подвижности в примесных полупроводниках носит достаточно сложный характер и описывается степенным законом. Концентрация носителей заряда

в примесных полупроводниках увеличивается с температурой по экспоненциальному закону. Подвижность носителей заряда меняется с температурой более слабо, чем их концентрация, поэтому температурная зависимость электропроводности примесных полупроводников, в основном, определяется температурной зависимостью концентрации носителей заряда.

В области примесной проводимости, как и в случае собственных полупроводников, удельная электропроводность возрастает при повышении температуры по экспоненциальному закону:

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left[-\frac{\Delta E_{np}}{2kT} \right] \quad (6)$$

где ΔE_{np} - энергия активации: доноров – (ΔE_d), акцепторов – (ΔE_a).

Соотношения, полученные в рамках зонной теории, удовлетворительно описывают физические свойства классических полупроводников - германия и кремния.

Сложные полупроводники

Полупроводниковыми свойствами обладают также арсенид галлия, карбиды и другие химические соединения типа A_3B_5 и A_2B_6 (цифрами указана валентность химических элементов А и В). Хорошими полупроводниковыми материалами являются окислы переходных металлов. Сопротивление этого класса полупроводников уменьшается с температурой по экспоненциальному закону и достаточно точно описывается, как и для собственных полупроводников, выражением

$$R = A_0 \exp \left[\frac{E}{2kT} \right] \quad (7)$$

где A_0 – коэффициент, зависящий от природы полупроводника.

Зависимость $R=R(T)$ удобно представлять в полулогарифмических координатах. В результате логарифмирования (7) имеем

$$\ln R = \ln A_0 + \frac{E}{2kT}. \quad (8)$$

График зависимости $\ln R = f \left[\frac{1}{2kT} \right]$ в системе координат $\ln R, 1/(2kT)$ представляет собой прямую, изображенную на рисунке 3. Тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс равен энергии активации полупроводника. Экспериментальная зависимость $\ln R = f \left[\frac{1}{2kT} \right]$ в линейной области, очевидно, может быть использована для графического определения энергии активации полупроводника ΔE .

Выражение (8), также используется для непосредственной оценки энергии активации ΔE . Измеряя сопротивление образца при двух температурах и подставляя полученные значения в (8), получим

$$\Delta E = 2k(\ln ART_1 - \ln RT_2) - (1/T_1 - 1/T_2). \quad (9)$$

Несмотря на одинаковый вид аналитической функции $R=R(T)$, классические полупроводники и полупроводники на основе окислов переходных металлов обладают различным механизмом температурной зависимости электропроводности. Для объяснения температурной зависимости электропроводности полупроводников на основе окислов переходных металлов зонная теория твердого тела оказывается недостаточной. Общепринятого объяснения наблюдаемой зависимости $R=R(T)$ этого типа полупроводников нет. Наиболее распространенной в настоящее время является теория "перескоков". Согласно этой теории, полупроводниковые сплавы ведут себя, как собственные полупроводники с низкой подвижностью носителей. Однако температурный рост электропроводности определяется для таких полупроводниковых материалов не увеличением концентрации свободных носителей, а экспоненциальным возрастанием их подвижности с температурой. Этот рост подвижности можно объяснить следующим образом. В полупроводниках с низкой подвижностью средняя длина свободного пробега носителей зарядов много меньше межатомных расстояний. При этом электрон может сравнительно долго находиться в одной из кристаллических ячеек. Перескок в другую ячейку осуществляется лишь время от времени. Необходимая для такого перескока энергия невелика и может быть получена за счет тепловой энергии. Это означает, что подвижность носителей заряда должна возрастать с повышением температуры. В окислах переходных металлов в кристаллографически эквивалентных узлах решетки могут находиться ионы одного и того же металла с различной валентностью. Перенос заряда между такими ионами требует очень малой энергии, поэтому электропроводность таких полупроводников, в отличие от "зонных", определяется не концентрацией примесей, а распределением ионов по узлам кристаллической решетки и их валентностью.

Полупроводниковые терморезисторы широко используют в автоматике, телемеханике и измерительной технике. Полупроводники на основе окислов переходных металлов в качестве технологических материалов, обладают большим преимуществом перед "зонными" полупроводниками, так как, в отличие от последних, незначительные загрязнения и режимы термообработки не так сильно влияют на их

электрические свойства. Поэтому большинство промышленных типов терморезисторов создано на основе окислов переходных металлов.

Одной из наиболее важных характеристик терморезистора является температурный коэффициент сопротивления. ТКС определяется как относительное изменение сопротивления полупроводника при изменении температуры:

$$TKC = (1/R_T) \left(\frac{dR_T}{dT} \right), \quad (10)$$

Подставляя выражение (7) в уравнение (10) и дифференцируя, получим

$$TKC = -\Delta E / (2kT^2). \quad (11)$$

Как следует из формулы (11), ТКС полупроводниковых материалов - величина отрицательная. Значения ТКС полупроводников изменяются в очень широких пределах.

В последние годы созданы также полупроводниковые соединения с положительным ТКС. Сопротивление этого типа полупроводников в определенной температурной области увеличивается с ростом температуры. Свойства полупроводников с положительным ТКС в данной работе не рассматриваются.

Вопросы для самоконтроля

1. Сравните зонные схемы металла, полупроводника и диэлектрика.
2. Объясните механизм электропроводности собственных полупроводников.
3. Объясните зависимость концентрации носителей заряда от температуры в полупроводниках различного типа.
4. Проанализируйте графическую зависимость $\ln R = f[1/2kT]$ для полупроводников различного типа.

Лабораторная работа 7 Исследование температурной зависимости электропроводности полупроводников

Цель работы: исследование температурной зависимости сопротивления полупроводниковых материалов с отрицательным и положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС).

Приборы и принадлежности: лабораторный стенд, мультиметр В7-35, терморезистор ТТС-103 и КМТ-1, полупроводниковый диод Д9Б.

Описание установки

В настоящей работе исследуется температурная зависимость двух полупроводниковых терморезисторов: КМТ-1 (терморезистор на основе системы $CuO-Co_3O_4$), ТТС-103 (терморезистор на основе системы $CuO - MoO_4$), а так же полупроводниковый кремниевый диод типа Д9Б.

Лабораторная работа выполняется на специальном стенде, который предназначен для изучения термоэлектрических явлений в полупроводниках. Стенд настольного типа, на лицевой панели размещены элементы управления и гнезда для подключения внешних устройств. Необходимая коммутация на панели осуществляется специальными соединительными проводами.

Основными элементами лабораторного стенда являются:

- цифровой термометр;
- термостат;
- блок питания;
- элементы управления, расположенные на лицевой панели прибора (рисунок 4).

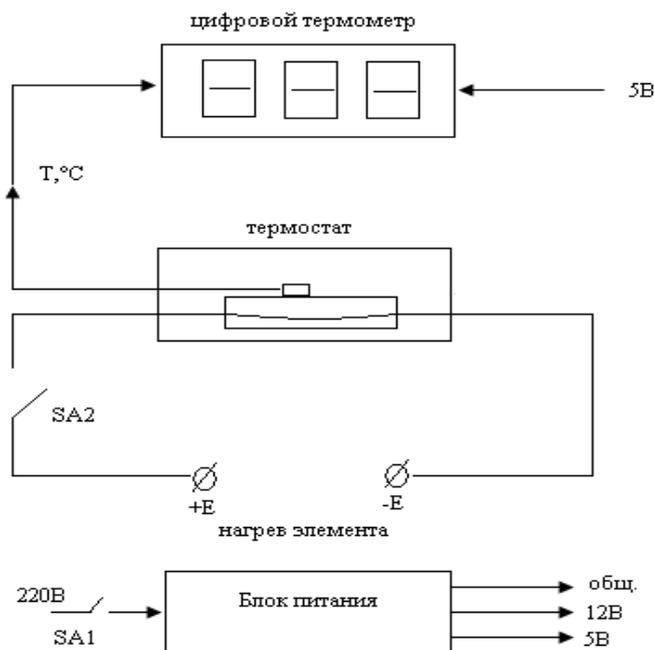


Рисунок 4 – Структурная схема с функциональными элементами лабораторного стенда

Элементы управления, расположенные на лицевой панели прибора:

- кнопка сеть подает питание и включает лабораторный стенд;
- кнопка нагрев позволяет включать нагрев исследуемого полупроводникового элемента. При включенном нагреве над кнопкой будет гореть красный светодиодный индикатор.

Цифровой экран показывает как комнатную температуру, так и температуру нагреваемого образца.

На лицевой панели стенда расположены гнезда, которые предназначены для подключения внешних измерительных приборов типа В7-35.

На рисунке 5 представлена схема подключения всех необходимых в лабораторной работе приборов.

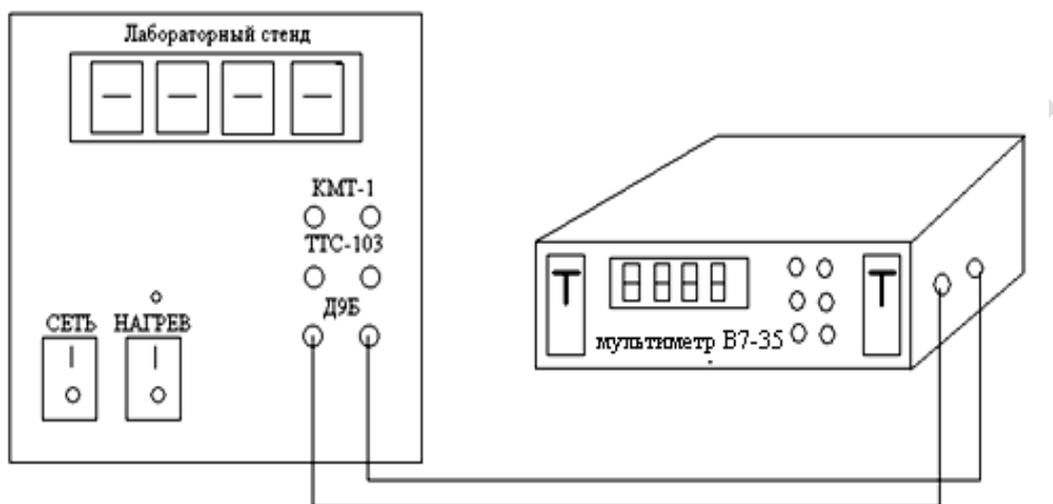


Рисунок 5 – Схема подключения приборов лабораторного стенда

Ход работы

1. Подключить прибор как показано на рисунке 5.
2. Ознакомиться с методикой измерения сопротивлений с помощью мультиметра В7 – 35 по прилагаемой к установке инструкции и произвести несколько измерений сопротивления исследуемых полупроводниковых приборов при комнатной температуре (не включая нагрев).
3. Включить лабораторный стенд, нажать кнопку нагрев.
4. Нагреть образцы до 60°C.
5. По мере остывания, проводить измерение сопротивления с помощью мультиметра с шагом 5°C в диапазоне температур с 60°C до 25°C.
7. Результаты расчетов занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты измерения температурной зависимости сопротивления

№ измерения	T, °C	R, Ом	\bar{R} , Ом	$\bar{R} \pm \Delta R$, Ом
1				
2				
3				
1				
2				
3				

8. Построить графики зависимости сопротивления от температуры $R=f(T)$.
9. Рассчитать погрешности измерений.

Содержание отчета

1. Рисунок схемы лабораторной установки с пояснениями принципа ее работы.
2. Заполненная таблица зависимости сопротивления от температуры для двух типов терморезисторов.
3. График зависимости сопротивления от температуры.
4. Расчет энергии активации ΔE для исследуемых образцов.
5. Расчет температурного коэффициента сопротивления.
6. Выводы по результатам проведенных измерений.

Репозитории ГГУ им. Ф. Скорины

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Л. Бонч - Бруевич, С.Г. Калашников. Физика полупроводников. - М., 1977.
2. Ю.М. Поппавко. Физика диэлектриков. - Киев, 1980.
3. Г. Шульце. Металлофизика. - М., 1971.
4. Дж. Блейкмор. Физика твердого тела. - М., 1988.
5. С.Зи. Физика полупроводниковых приборов. - М., 1984.
6. К.С. Ржевкин. Физические принципы действия полупроводниковых приборов. - М., 1986.
7. Шалабутов Ю.К. Введение в физику полупроводников. - М.: «Наука», 1969.- 240 с.
8. Зейман Дж. Принципы теории твердого тела.- М.: «Мир», 1966.- 264 с.
9. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов.- М.: «Высшая школа», 1975.- 7 с.
10. Шалабутов Ю.К. Введение в физику полупроводников.- М.: «Наука», 1969.- 24с.
11. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников.- М.: «Наука», 1977. - 174 с.
12. Шалимова К.В. Физика полупроводников. - М.: «Энергия», 1976. - 94 с.
13. Зеегер К. Физика полупроводников. - М.: «Мир», 1977. - 507 с.

Основные понятия теории измерений

В практической жизни человек всюду имеет дело с измерениями. Действительно, человечество на всем протяжении своего развития сталкивается с необходимостью определения и оценки характерных свойств тех предметов и явлений, которые его окружают. Измерения являются одним из важнейших путей познания природы человеком. Они дают количественную характеристику окружающего мира, раскрывая человеку действующие в природе закономерности. Математика, физика, химия – стали именоваться точными науками только потому, что благодаря измерениям они получили возможность устанавливать точные количественные соотношения, выражающие объективные законы природы.

Великий русский ученый Д. И. Менделеев, которого закономерно считают основоположником современной метрологии, определил метрологию как науку: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немислима без меры».

Для проведения измерения необходимо не только наличие материальных объектов и физических явлений, но и тех технических средств, которыми производят измерения, а также методов, позволяющих грамотно осуществлять процесс измерений.

Так постепенно от описательного определения мы приходим к определению метрологии как науки об измерениях. Измерения служат не только основой научно-технических знаний, но имеют первостепенное значение для учета материальных ресурсов, для торговли, для обеспечения качества продукции, взаимозаменяемости узлов и деталей и совершенствования технологии, для обеспечения безопасности труда и других видов человеческой деятельности.

Все вышеизложенное позволило сформулировать современное определение метрологии следующим образом. Метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Единство измерений – такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью. *Единство измерений необходимо для того, чтобы можно было сопоставить результаты измерений, выполненных в разных местах, в разное время, с использованием разных методов и средств измерений.*

В настоящее время, установлено следующее определение измерения: измерение есть нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Физическая величина – это свойство общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта.

Индивидуальность в количественном отношении следует понимать в том смысле, что свойство может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого.

Мы оперируем такими физическими величинами как длина, время, температура, сила, давление, скорость и многими другими. Все они определяют общие в качественном отношении физические свойства, количественные же характеристики их могут быть совершенно различными.

Однако объектами измерений могут быть не только физические величины, но и экономические, измерения (органолептические), основанные на использовании органов чувств человека (оценка спортивных выступлений в фигурном катании, гимнастике) и т. д. Другими словами, термин «измерение» не ограничен нахождением значения физической величины, так как часто измеряют и нефизические величины. Применяются измерения и в нематериальной сфере. Так, в математике широко используются меры неопределенности, значимости и другие. *Эти величины принципиально отличаются от реальных тем, что не подвержены изменениям вследствие внешних воздействий, для их измерений не требуются технические средства.*

В общем смысле величины можно сгруппировать по признакам: *реальные*, включающие в себя физические и нефизические величины; *идеальные*, включающие в себя математические величины, причем физические можно измерить, нефизические можно оценить или вычислить, математические – вычислить.

Метрология занимается изучением, обработкой, передачей и хранением физических величин.

Единица физической величины (единица измерения) – это физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице.

Для выбранной единицы измерения результат измерения может быть представлен в виде

$$\frac{Q}{[q]} = a \quad (1)$$

где Q – измеряемая величина; q – единица измерения; a – численное значение.

Эта запись в виде $Q = a [q]$ называется *основным уравнением измерений*.

Измерение физических величин заключается в сопоставлении какой-либо величины с однородной величиной, принятой за единицу.

Виды измерений. Измерения, выполняемые с помощью специальных технических средств, называют *инструментальными*. Простейшим примером таких измерений является определение размера детали линейкой с делениями, т. е. сравнение размера детали с единицей длины, хранимой линейкой.

Для упорядочения измерительной деятельности измерения классифицируют по следующим признакам:

- общим приемам получения результатов измерений – *прямые, косвенные, совместные и совокупные*;
- числу измерений в серии – *однократные и многократные*;
- метрологическому назначению – *технические и метрологические*;
- характеристике точности – *равноточные и неравноточные*;
- отношению к изменению измеряемой величины – *статические и динамические*;
- выражению результата измерений – *абсолютные и относительные*.

Прямые измерения – измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных (измерения массы на весах, температуры термометром, длины с помощью линейных мер). Прямые измерения можно выразить формулой $Q = X$, где Q – искомое значение измеряемой величины, а X – значение, непосредственно получаемое из опытных данных.

При прямых измерениях экспериментальным операциям подвергают измеряемую величину, которую сравнивают с мерой непосредственно или же с помощью измерительных приборов, градуированных в требуемых единицах. Примерами прямых служат измерения длины тела линейкой, массы при помощи весов и др. Прямые измерения широко применяются в машиностроении, а также при контроле технологических процессов (измерение давления, температуры и др.).

Косвенные измерения – измерения, при которых искомое значение находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, полученными прямыми измерениями.

Значение измеряемой величины находят путем вычисления по формуле $Q = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где Q – искомое значение косвенно измеряемой величины; F – функциональная зависимость, которая заранее известна, x_1, x_2, \dots, x_n – значения величин, измеренных прямым способом.

Примеры косвенных измерений: определение объема тела по прямым измерениям его геометрических размеров, нахождение удельного электрического сопротивления проводника по его сопротивлению, длине и площади поперечного сечения.

Косвенные измерения широко распространены в тех случаях, когда искомую величину невозможно или слишком сложно измерить непосредственно или когда прямое измерение дает менее точный результат. Роль их особенно велика при измерении величин, недоступных непосредственно

экспериментальному сравнению, например размеров астрономического или внутриатомного порядка.

Совокупные измерения – измерения нескольких однородных величин, при которых искомое значение величин находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин (измерения, при которых масса отдельных гирь набора находится по известной массе одной из них и по результатам прямых сравнений масс различных сочетаний гирь).

Примером совокупных измерений является определение массы отдельных гирь набора (калибровка по известной массе одной из них и по результатам прямых сравнений масс различных сочетаний гирь).

Совместные измерения – одновременные измерения двух или нескольких не одноимённых величин, для нахождения зависимости между ними (проводимые одновременно измерения приращения длины образца в зависимости от изменений его температуры и определение коэффициента линейного расширения).

В качестве примера можно назвать измерение электрического сопротивления при 20°C и температурных коэффициентов измерительного резистора по данным прямых измерений его сопротивления при различных температурах.

Абсолютные измерения – измерения, основанные на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и использовании физических констант.

Относительные измерения – получение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Однократное измерение – измерение, выполняемое один раз (измерение конкретного времени по часам).

Многократные измерения – измерения одной и той же физической величины, результат которых получают из нескольких следующих друг за другом измерений. Обычно многократными измерениями считаются те, которые производятся свыше трех раз.

Технические измерения – измерения, выполняемые при помощи рабочих средств измерений с целью контроля и управления научными экспериментами, контроля параметров изделий и т. д. (измерение давления воздуха в автомобильной камере).

Метрологические измерения – измерения при помощи эталонов и образцовых средств измерений с целью нововведения единиц физических величин или передачи их размеров рабочим средствам измерений.

Равноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях.

Неравноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных различными по точности средствами измерений и в разных условиях.

Статические измерения – измерения физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за постоянную на протяжении времени измерения (измерения размера детали при нормальной температуре).

Динамические измерения – измерения физической величины, размер которой изменяется с течением времени (*измерения расстояния до уровня земли со снижающегося самолета*).

Средства измерений и их классификация. *Средства измерений* – технические средства, применяемые для проведения экспериментальной части измерений и имеющие нормированные метрологические свойства. Средства измерений являются носителями единиц, в которых хотят выразить измеряемые величины. В связи с большим количеством видов измеряемых величин принципы действия средства измерений весьма разнообразны. Существуют средства измерений, в основе действия которых лежат механические, электрические, электронные, магнитные, оптические, термические, химические и другие явления, а также их сочетания. Кроме чисто измерительных целей, средства измерений широко используются также в устройствах контроля, сигнализации, регулирования, управления производственными процессами, а также для сбора всякого рода информации, подлежащей в дальнейшем обработке с помощью вычислительных машин.

Для практического измерения единицы величины применяются технические средства, которые имеют нормированные погрешности и называются *средствами измерений*. К средствам измерений относятся: меры, измерительные приборы, измерительные установки и системы, измерительные преобразователи и измерительные принадлежности.

Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера (*гиря – мера массы, генератор – мера частоты электрических колебаний*).

Меры, в свою очередь, подразделяют на *однозначные* и *многозначные* меры.

Однозначная мера – мера, воспроизводящая физическую величину одного размера (*плоскопараллельная концевая мера длины, нормальный элемент, конденсатор постоянной емкости*).

Многозначная мера – воспроизводящая ряд одноименных физических величин различного размера (*линейка с миллиметровыми делениями, конденсатор переменной емкости*).

Набор мер – специально подобранный комплект мер, применяемых не только по отдельности, но и в различных сочетаниях с целью воспроизве-

дения ряда одноименных величин различного размера (*набор гирь, набор плоскопараллельных концевых мер длины*).

Измерительные приборы – это средства измерений, которые позволяют получать измерительную информацию в форме, удобной для восприятия пользователем. Различаются измерительные приборы прямого действия и приборы сравнения. В зависимости от метода регистрации и формы представления результата измерения измерительные приборы делятся на *аналоговые (шкальные)* и *цифровые*.

Аналоговые приборы состоят из *шкалы*, представляющей собой совокупность отметок и чисел, изображающих ряд последовательных значений измеряемой величины, и *указателя* (стрелки, электронного луча и других), связанных с подвижной системой прибора.

Отметки шкалы с представленными числовыми значениями называют числовыми отметками шкалы. Основные характеристики шкалы – *длина деления* шкалы, выражающаяся расстоянием между осями двух соседних штрихов шкалы, и *цена деления* шкалы, представляющая значение измеряемой величины, вызывающей перемещение указателя на одно деление.

Диапазон измерений представляет собой часть диапазона показаний, для которого нормированы пределы допускаемых погрешностей средств измерений. Наименьшее и наибольшее значения диапазона измерений называют соответственно нижним и верхним пределами измерений.

Значение величины, определяемое по отсчетному устройству средства измерений и выраженное в принятых единицах этой величины, называют показанием средства измерений.

Приборы прямого действия отображают измеряемую величину на показывающем устройстве, имеющем соответствующую градуировку в единицах этой величины. Изменения рода физической величины при этом не происходит. *К приборам прямого действия относят, например, амперметры, вольтметры, термометры и т.п.*

Приборы сравнения предназначаются для сравнения измеряемых величин с величинами, значения которых известны. Такие приборы широко используются в научных целях, а также и на практике для измерения таких величин, как яркость источников излучения, давление воздуха и др.

Измерительные установки и системы - это совокупность средств измерений, объединенных по функциональному признаку со вспомогательными устройствами, для измерения одной или нескольких физических величин объекта измерений. Обычно такие системы автоматизированы и обеспечивают ввод информации в систему, автоматизацию самого процесса измерения, обработку и отображение результатов измерений для восприятия их пользователем.

Измерительный преобразователь – это средство измерений, которое служит для преобразования сигнала измерительной информации в форму, удобную для обработки или хранения, а также передачи в показывающее

устройство. Измерительные преобразователи либо входят в конструктивную схему измерительного прибора, либо применяются совместно с ним, но сигнал преобразователя не поддается непосредственному восприятию наблюдателем. Например, преобразователь может быть необходим для передачи информации в память компьютера, для усиления напряжения и т.д.

Преобразователи подразделяются на *первичные* (непосредственно воспринимающие измеряемую величину), *передающие* (на выходе которых величина приобретает форму, удобную для регистрации или передачи на расстояние), *промежуточные* (работающие в сочетании с первичными и не влияющие на изменение рода физической величины).

Измерительные принадлежности – это вспомогательные средства измерений величин. Они необходимы для вычисления поправок к результатам измерений, если требуется высокая степень точности. *Например, термометр может быть вспомогательным средством, если показания прибора достоверны при строго регламентированной температуре; психрометр - если строго оговаривается влажность окружающей среды.* Следует учитывать, что измерительные принадлежности вносят определенные погрешности в результат измерений, связанные с погрешностью самого вспомогательного средства.

По метрологическому назначению средства измерений делят на два вида - *рабочие средства измерений* и *эталоны*. Рабочие средства измерений применяют для определения параметров (характеристик) технических устройств, технологических процессов, окружающей среды и др. Рабочие средства могут быть лабораторными (для научных исследований), производственными или учебными (для обеспечения и контроля заданных характеристик технологических процессов), полевыми (для самолетов, автомобилей, судов и т.п.). Каждый из этих видов рабочих средств отличается особыми показателями. Так, лабораторные средства измерений - самые точные и чувствительные, а их показания характеризуются высокой стабильностью. Производственные (учебные) обладают устойчивостью к воздействиям различных факторов производственного процесса: температуры, влажности, вибрации и т.п., что может сказаться на достоверности и точности показаний приборов. Полевые – работают в условиях, постоянно изменяющихся в широких пределах внешних воздействий.

Методы и методики измерений. Выбор метода зависит от вида измеряемой величины, ее размера, точности результата измерений, быстроты его получения, условий, при которых проводятся измерения, и ряда других признаков (длину можно измерить линейкой, микрометром и т. д.).

Под термином *метод измерений* подразумевается способ решения измерительной задачи, характеризуемый его теоретическим обоснованием и разработкой основных приемов применения средств измерений. Существует более простое определение понятия метода измерений.

Метод измерений – совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

Принцип измерений – это совокупность физических явления, на которых основаны измерения. Например, температуру можно измерять платиновым термометром (принцип измерения – зависимость сопротивления платины от температуры) и термоэлектрическим термометром (принцип измерения – зависимость ЭДС от разности температур).

Каждую физическую величину можно измерить несколькими методами, которые имеют особенности как технического, так и методического характера. С методической стороны методы измерений поддаются систематизации и обобщению по характерным признакам.

Основными методами являются:

Метод непосредственной оценки, в котором значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчетным устройствам измерительного прибора прямого действия (отсчет по часам, барометру-анероиду, термометру).

Метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой (измерения массы на рычажных весах с уравновешиванием гирями; измерение напряжения постоянного тока на компенсаторе сравнением с ЭДС параллельного элемента).

Метод замещения – разновидность метода сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой (взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы груза и гирь на одну и ту же чашу весов).

Контактный и бесконтактный методы – методы, при которых чувствительный элемент прибора приводится или не приводится в контакт с объектом измерений (измерения диаметра вала измерительной скобой осуществляется контактным методом; температуры в доменной печи – бесконтактным методом).

Дифференциальный метод характеризуется измерением разности между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой. Метод позволяет получить результат высокой точности при использовании относительно грубых средств измерения.

Нулевой метод аналогичен дифференциальному, но разность между измеряемой величиной и мерой сводится к нулю. Другими словами нулевой метод – это метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сводят к нулю (взвешивание на равноплечих весах – безмене, шкальных весах).

При этом нулевой метод имеет то преимущество, что мера может быть во много раз меньше измеряемой величины. Рассмотрим, например, неравноплечие весы (рисунок 1, а), где $P_1 l_1 = P_2 l_2$. В электротехнике — это мосты для измерения индуктивности, емкости, сопротивления (рисунок 1, б).

Здесь $r_1 r_2 = r_x r_3$ откуда $r_x = r_1 r_2 / r_3$. В общем случае совпадение сравниваемых величин регистрируется нуль-индикатором.

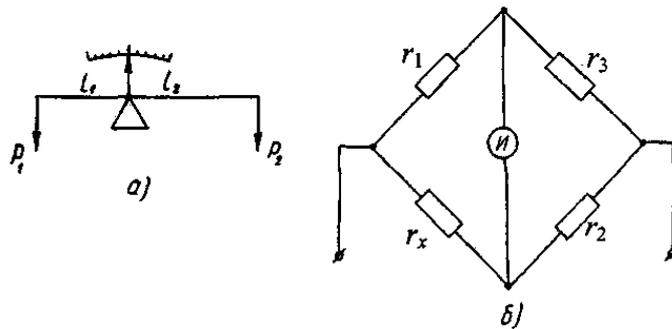


Рисунок 1 – Нулевой метод измерения
(а – схема механических весов; б – схема электрического моста)

Кроме того, можно выделить *нестандартизованные методы*:

- *метод противопоставления*, при котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения. Например, измерения массы на равноплечих весах с помещением измеряемой массы и уравнивающих ее гирь на двух чашках весов;
- *метод совпадений*, где разность между сравниваемыми величинами измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов. Например, при измерении длины штангенциркулем наблюдают совпадение отметок на шкалах штангенциркуля и нониуса; при измерении частоты вращения стробоскопом – метки на вращающемся объекте с момента вспышек известной частоты.

Выбор метода зависит от его теоретической проработки, конкретных средств измерений. Например, для решения такой измерительной задачи, как определение высоты телебашни, можно использовать один из следующих методов:

- *измерить высоту телебашни рулеткой (метод сравнения с мерой);*
- *на вертолете подняться до уровня телебашни и определить расстояние по высотомеру (метод непосредственной оценки);*
- *вычислить высоту телебашни, используя тригонометрические функции прямоугольного треугольника, т. е. измеряя горизонтальное расстояние до телебашни и вертикальный угол, образованный основанием и вершиной телецентра (метод косвенных измерений).*

Методы измерений предусматривают разработку основных приемов применения средств измерений, а методика их проведения представляет собой требования к выбору средств измерений, последовательность выполнения операций, соблюдение установленных условий измерений, числа измерений, способов обработки их результатов.

Строгое определение понятия методика измерений стандартами не определено, однако, с учетом имеющегося опыта разработок методик из-

мерений в стране его можно сформулировать так: методика измерений – это установленная совокупность операций и правил, выполнение которых при измерении обеспечивает получение результатов измерений в соответствии с данным методом.

Погрешности измерений и их виды. Погрешность или неопределенность измерений – одно из центральных в метрологии, а оценка погрешности измерений – одно из важных мероприятий по обеспечению единства измерений. В метрологии используются понятия "погрешность результата измерения" и "погрешность средства измерения".

Погрешность измерения $\Delta x_{\text{изм}}$ – это отклонение результата измерения x от истинного (действительного) $x_{\text{и}}$ ($x_{\text{д}}$) значения измеряемой величины: $\Delta x_{\text{изм}} = x - x_{\text{и}}$, или $\Delta x_{\text{изм}} = x - x_{\text{д}}$.

Погрешность средства измерения – отклонение показания средства измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. Оно характеризует точность результатов измерений, проводимых данным средством. Эти два понятия во многом близки друг к другу и классифицируются по одинаковым признакам.

Абсолютная погрешность – это погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины. Наряду с абсолютной погрешностью часто используется термин *абсолютное значение погрешности*, под которым понимают значение погрешности без учета ее знака. Эти два понятия различны.

Абсолютная погрешность определяется как разность: $\Delta x = x_{\text{и}} - x_{\text{изм}}$, или $\Delta x = x_{\text{и}} - x_{\text{д}}$.

Относительная погрешность – это погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности к результату измерения (рисунок 2):

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

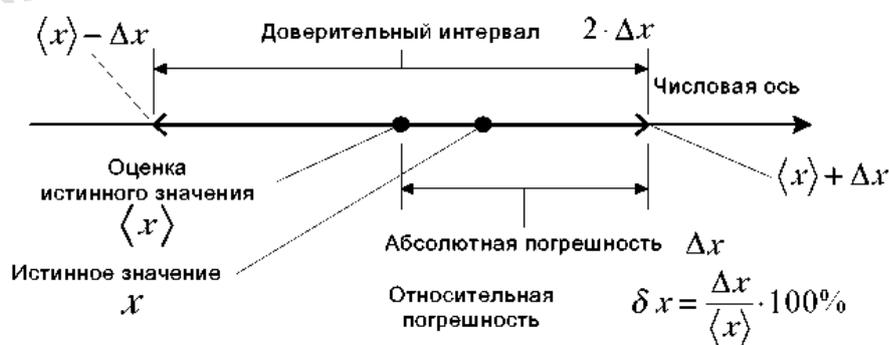


Рисунок 2 – Результат измерений $x = \bar{x} \pm \Delta x$

Приведенная погрешность – это погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерения (приборной погрешности) к некоторой постоянной величине, называемой *нормирующим значением* и имеющей размерность измеряемой величины:

$$\gamma = \pm \Delta x / x_N \cdot 100\% \quad (3)$$

где x_N – нормированное значение величины. В качестве нормирующего множителя может выступать, например, максимальное значение шкалы прибора (верхний предел показаний прибора). Понятие приведенной погрешности относится только к средствам измерений.

Методическая погрешность обусловлена несовершенством метода измерений или упрощениями, допущенными при измерениях. Так, она возникает из-за использования приближенных формул при расчете результата или неправильной методики измерений. Выбор ошибочной методики возможен из-за несоответствия (неадекватности) измеряемой физической величины и ее модели.

Причиной методической погрешности может быть не учитываемое взаимное влияние объекта измерений и измерительных приборов или недостаточная точность такого учета. Например, методическая погрешность возникает при измерениях падения напряжения на участке цепи с помощью вольтметра, так как из-за шунтирующего действия вольтметра измеряемое напряжение уменьшается. Механизм взаимного влияния может быть изучен, а погрешности рассчитаны и учтены.

Инструментальная погрешность обусловлена несовершенством применяемых средств измерений. Причинами ее возникновения являются неточности, допущенные при изготовлении и регулировке приборов, изменение параметров элементов конструкции и схемы вследствие старения. В высокочувствительных приборах могут сильно проявляться их внутренние шумы.

Статическая погрешность измерений – погрешность результата измерений, свойственная условиям статического измерения, то есть при измерении постоянных величин после завершения переходных процессов в элементах приборов и преобразователей.

Динамическая погрешность измерений – погрешность результата измерений, свойственная условиям динамического измерения. Динамическая погрешность появляется при измерении переменных величин и обусловлена инерционными свойствами средств измерений.

Статические и динамические погрешности относятся к погрешностям результата измерений. В большей части приборов статическая и динамическая погрешности оказываются связаны между собой, поскольку соотношение между этими видами погрешностей зависит от характеристик прибора и характерного времени изменения величины.

Систематическая погрешность измерения – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины. Систематические погрешности являются в общем случае функцией измеряемой величины влияющих величин (температуры, влажности, напряжения питания и пр.) и времени. В функции измеряемой величины систематические погрешности входят при поверке и аттестации образцовых приборов.

Случайными называют составляющие погрешности измерений, изменяющиеся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Случайные погрешности определяются совместным действием ряда причин: внутренними шумами элементов электронных схем, наводками на входные цепи средств измерений, пульсацией постоянного питающего напряжения, дискретностью счета. Случайные погрешности будут более подробно рассмотрены в следующем параграфе данной главы.

Промах вызван резким нарушением условий измерения при отдельных наблюдениях. Это ошибка, связанная с толчком или поломкой прибора, грубым просчетом экспериментатора, непредвиденным вмешательством и т.д. Грубая ошибка появляется обычно не более чем в одном–двух измерениях и резко отличается по величине от прочих ошибок. Наличие промаха может сильно исказить результат, содержащий промах. Проще всего, установив причину промаха, устранить его в процессе измерения. Если в процессе измерения промах не был исключен, то это следует сделать при обработке результатов измерений, используя специальные критерии, позволяющие объективно выделить в каждой серии наблюдений грубую ошибку, если она имеется.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Обработка результатов измерений

Для уменьшения влияния случайных ошибок необходимо произвести измерение данной величины несколько раз. Предположим, что мы измеряем некоторую величину X .

В результате проведенных измерений мы получили значений величины:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n. \quad (4)$$

Этот ряд значений величины X получил название выборки. Имея такую выборку, мы можем дать оценку результата измерений. Величину, которая будет являться такой оценкой, мы обозначим \bar{x} . Но так как это значение оценки результатов измерений не будет представлять собой истинного значения измеряемой величины, необходимо оценить его ошибку. Предположим, что мы сумеем определить оценку ошибки Δx . В таком случае мы можем записать результат измерений в виде

$$\mu = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (5)$$

Так как оценочные значения результата измерений \bar{x} и ошибки Δx не являются точными, запись (5) результата измерений должна сопровождаться указанием его надежности P .

Под надежностью или доверительной вероятностью понимают вероятность того, что истинное значение измеряемой величины заключено в интервале, указанном записью (5). Сам этот интервал называется *доверительным интервалом*.

Например, измеряя длину некоторого отрезка, окончательный результат мы записали в виде $l = (8.34 \pm 0.02) \text{ мм}$, $P = 0.95$. Это означает, что из 100 шансов – 95 за то, что истинное значение длины отрезка заключается в интервале от 8,32 мм до 8,36 мм.

Таким образом, задача заключается в том, чтобы, имея выборку (4), найти оценку результата измерений \bar{x} , его ошибку Δx и надежность P .

Эта задача может быть решена с помощью теории вероятностей и математической статистики.

В большинстве случаев случайные ошибки подчиняются нормальному закону распределения, установленного Гауссом. Нормальный закон распределения ошибок выражается формулой

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

где Δx – отклонение от величины истинного значения; σ – истинная среднеквадратичная ошибка; σ^2 – дисперсия, величина которой характеризует разброс случайных величин.

Как видно из (6) функция имеет максимальное значение при $x = 0$, кроме того, она является четной. На рисунке 3 показан график этой функции. Смысл функции (6) заключается в том, что площадь фигуры, заключенной между кривой, осью Δx и двумя ординатами из точек Δx_1 и Δx_2 (заштрихованная площадь на рисунке 3) численно равна вероятности, с которой любой отсчет попадет в интервал $(\Delta x_1, \Delta x_2)$

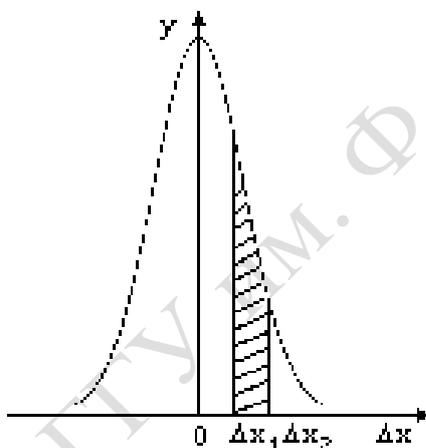


Рисунок 3 – Закон нормального распределения

Поскольку кривая распределена симметрично относительно оси ординат, можно утверждать, что равные по величине, но противоположные по знаку ошибки равновероятны. А это дает возможность в качестве оценки результатов измерений взять среднее значение всех элементов выборки (4)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (7)$$

где n - число измерений.

Итак, если в одних и тех же условиях проделано n измерений, то наиболее вероятным значением измеряемой величины будет ее среднее значение (арифметическое). Величина \bar{x} стремится к истинному значению μ измеряемой величины при $n \rightarrow \infty$.

Средней квадратичной ошибкой отдельного результата измерения называется величина

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (-x_i)^2}{n-1}}. \quad (8)$$

Она характеризует ошибку каждого отдельного измерения. При $n \rightarrow \infty$ S стремится к постоянному пределу

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} S. \quad (9)$$

С увеличением σ увеличивается разброс отсчетов, т.е. становится ниже точность измерений.

Среднеквадратичной ошибкой среднего арифметического называется величина

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (-x_i)^2}{n(n-1)}} = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (10)$$

Это фундаментальный закон возрастания точности при росте числа измерений.

Ошибка $S_{\bar{x}}$ характеризует точность, с которой получено среднее значение измеренной величины \bar{x} . Результат записывается в виде:

$$x = \bar{x}_n \pm S_{\bar{x}}, \quad (11)$$

Эта методика расчета ошибок дает хорошие результаты (с надежностью 0.68) только в том случае, когда одна и та же величина измерялась не менее 30 – 50 раз.

В 1908 году Стьюдент показал, что статистический подход справедлив и при малом числе измерений. Распределение Стьюдента при числе измерений $n \rightarrow \infty$ переходит в распределение Гаусса, а при малом числе отличается от него.

Для расчета абсолютной ошибки при малом количестве измерений вводится специальный коэффициент, зависящий от надежности P и числа измерений n , называемый коэффициентом Стьюдента t_s .

Опуская теоретические обоснования его введения, заметим, что

$$\Delta x = S_{\bar{x}} t_s \quad (12)$$

где Δx – абсолютная ошибка для данной доверительной вероятности; $S_{\bar{x}}$ – среднеквадратичная ошибка среднего арифметического. Коэффициенты Стьюдента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты Стьюдента

n	Коэффициенты Стьюдента t_s				
	Значения P				
	0,6	0,8	0,95	0,99	0,999
2	1,376	3,078	12,706	63,657	636,61
3	1,061	1,886	4,303	9,925	31,598
4	0,978	1,638	3,182	5,841	12,941
5	0,941	1,533	2,776	4,604	8,610
6	0,920	1,476	2,571	4,032	6,859
7	0,906	1,440	2,447	3,707	5,959
8	0,896	1,415	2,365	3,499	5,405
9	0,889	1,397	2,306	3,355	5,041
10	0,883	1,383	2,262	3,250	4,781
11	0,879	1,372	2,228	3,169	4,587
12	0,876	1,363	2,201	3,106	4,437
13	0,873	1,356	2,179	3,055	4,318
14	0,870	1,350	2,160	3,012	4,221
15	0,868	1,345	2,145	2,977	4,140
16	0,866	1,341	2,131	2,947	4,073
17	0,865	1,337	2,120	2,921	4,015
18	0,863	1,333	2,110	2,898	3,965
19	0,862	1,330	2,101	2,878	3,922
20	0,861	1,328	2,093	2,861	3,883
21	0,860	1,325	2,086	2,845	3,850
22	0,859	1,323	2,080	2,831	3,819
23	0,858	1,321	2,074	2,819	3,792
24	0,858	1,319	2,069	2,807	3,767
25	0,857	1,318	2,064	2,797	3,745
26	0,856	1,316	2,060	2,787	3,725
27	0,856	1,315	2,056	2,779	3,707
28	0,855	1,314	2,052	2,771	3,690
29	0,855	1,313	2,048	2,763	3,674
30	0,854	1,311	2,045	2,756	3,659
31	0,854	1,310	2,042	2,750	3,646
40	0,851	1,303	3,021	2,704	3,551
60	0,848	1,296	2,000	2,660	3,460
120	0,845	1,289	1,980	2,617	3,373
∞	0,842	1,282	1,960	2,576	3,291

Порядок обработки результатов прямых многократных измерений

При расчете точечных оценок результатов прямых многократных измерений необходимо соблюдать следующий порядок действий:

- Результат каждого измерения запишите в таблицу.
- Вычислить среднее значение из n измерений

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

- Найти погрешность отдельного измерения

$$\Delta x_i = \bar{x} - x_i. \quad (14)$$

- Вычислить квадраты погрешностей отдельных измерений

$$\Delta x_1^2, \Delta x_2^2, \dots, \Delta x_n^2. \quad (15)$$

- Определить среднюю квадратичную ошибку (СКО) отдельного результата измерения

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum \Delta x_i^2}{n-1}}. \quad (16)$$

- Определить СКО среднего арифметического значения $S_{\bar{x}}$

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (17)$$

- Найти значение надежности (обычно берут $P = 0,95$).
- Определить коэффициент Стьюдента t_s для заданной надежности P и числа произведенных измерений n .
- Найти доверительный интервал (погрешность измерения)

$$\Delta x = S_{\bar{x}} t_s. \quad (18)$$

Если величина погрешности результата измерения Δx окажется сравнимой с величиной погрешности прибора δ , то в качестве границы доверительного интервала возьмите

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x^2 + \delta^2}. \quad (19)$$

Если одна из ошибок меньше другой в три или более раз, то меньшую отбросьте.

- Окончательный результат записать в виде

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (20)$$

- Оценить относительную погрешность результата измерений

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%. \quad (21)$$

Обработка результатов косвенных измерений

При косвенных измерениях физическая величина z определяется функциональной зависимостью

$$z = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N), \quad (22)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ – непосредственно измеряемые величины или же величины, значения которых приводятся в справочных таблицах.

Обработка результатов косвенных измерений проводится в следующей последовательности:

1. Найти средние значения и погрешности (абсолютную и относительную) каждой из непосредственно измеренных величин: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$. Погрешности Δx_{icp} и εx_{icp} определяются из прямых измерений или же, как инструментальная погрешность прибора при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.
2. Найти значение z_{cp} искомой величины при средних арифметических значениях параметров $Z_{cp} = f(x_{1cp}, x_{2cp}, x_{3cp}, \dots, x_{Ncp})$.
3. Погрешность искомой величины z_{cp} зависит от погрешностей непосредственно измеренных величин, входящих в формулу (8). Определение погрешности величины z_{cp} можно выполнить одним из двух способов.

Вначале определяется *абсолютная погрешность* по формуле

$$\Delta z_{cp} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{df}{dx_i} \Delta x_{icp} \right)^2}, \quad (23)$$

где Δx_{icp} – абсолютная погрешность величины x_i . Частные производные $\frac{df}{dx_i}$ вычисляются при $x_i = x_{icp}$.

Затем определяется *относительная погрешность* по формуле

$$\varepsilon z_{cp} = \frac{\Delta z_{cp}}{z_{cp}} 100\%. \quad (24)$$

Или же вначале определяется *относительная погрешность* по формуле

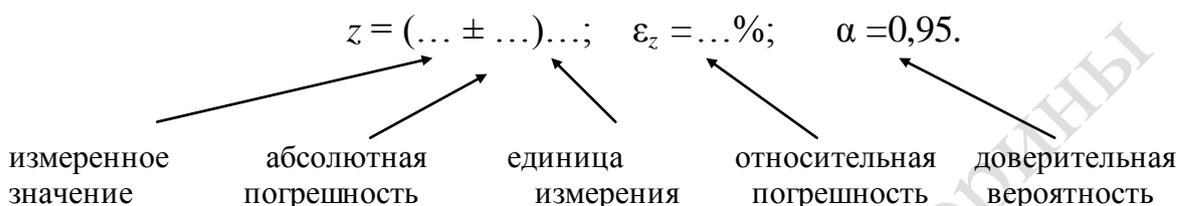
$$\varepsilon z_{cp} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{d \ln f}{dx_i} \Delta x_{icp} \right)^2} 100\%. \quad (25)$$

где Δx_{icp} – абсолютная погрешность величины x . Частные производные от логарифма $\frac{d \ln f}{dx_i}$ вычисляются при $x_i = x_{icp}$.

Затем определяется *абсолютная погрешность* по формуле

$$\Delta z_{cp} = \frac{z_{cp} \varepsilon_{z_{cp}}}{100}. \quad (26)$$

4. Округляются погрешности.
5. Округляется результат косвенных измерений и записывается с указанием единиц по следующей форме:



Если искомая величина является функцией одной переменной ($i = 1$), то следует применять первый способ, и формула (9) принимает вид

$$\Delta z_{cp} = \left| \frac{df}{dx} \Delta x_{cp} \right| = \frac{df}{dx} \Delta x_{cp}. \quad (27)$$

Например, $z = A \sin x$, где A - величина постоянная,

$$z_{cp} = A \sin(x_{cp}); \quad \Delta z_{cp} = A \cos(x_{cp}) \Delta x_{cp}. \quad (28)$$

Погрешность суммы и разности двух величин следует определяться первым способом.

Например, $z = Ax \pm Bx$, $z = Ax \pm By$. В соответствии с формулой: $z_{cp} = Ax_{cp} \pm By_{cp}$.

Абсолютная погрешность находится по формуле

$$\Delta z_{cp} = \sqrt{A^2 \Delta x_{cp}^2 + B^2 \Delta y_{cp}^2}. \quad (29)$$

Если искомая физическая величина определяется как произведение или частное от деления нескольких непосредственно измеряемых величин, то следует использовать второй способ, например $z = \frac{Ax_1^a x_2^b}{x_3^c}$. Прологарифми-

руем это выражение $\ln z = \ln A + a \ln x_1 + b \ln x_2 - c \ln x_3$.

Учитывая, что производная от постоянной величины равна нулю, а производная от натурального логарифма $\frac{d \ln x_i}{dx_i} = \frac{1}{x_i}$, по формуле получаем

$$\varepsilon_{z_{cp}} = \sqrt{\left(\frac{a \Delta x_{1cp}}{x_{1cp}} \right)^2 + \left(\frac{b \Delta x_{2cp}}{x_{2cp}} \right)^2 + \left(\frac{c \Delta x_{3cp}}{x_{3cp}} \right)^2} = \sqrt{a^2 \varepsilon_{x_{1cp}}^2 + b^2 \varepsilon_{x_{2cp}}^2 + c^2 \varepsilon_{x_{3cp}}^2}. \quad (30)$$

Учебное издание

**Алешкевич Николай Александрович
Барсуков Сергей Дмитриевич**

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

*по спецкурсу "Физические основы электроники"
для студентов физических специальностей*

В авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Бумага писчая №1. Гарнитура «Таймс». Усл. п. л. .
Уч.- изд. л. . Тираж 25 экз.

Отпечатано в учреждении образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»
246019, г. Гомель, ул. Советская, 104