

УДК 620.2

К

Рецензент:

- П Электротехнические материалы: метод. указания по выполнению лабор. работ / сост. А. В. Коловский ; Сиб. федер. ун-т; ХТИ – филиал СФУ – Абакан : РИО ХТИ – филиала СФУ, 2012. – __ с.

Приведены краткие теоретические сведения по разделу «Электротехнические материалы» дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение», даны рекомендации к выполнению лабораторных работ.

Предназначено для студентов специальности 140211.65 – «Электроснабжение» и бакалавров по направлению подготовки 140211.62 – «Электроэнергетика» очной и заочной форм обучения.

УДК 620.2

© ХТИ – филиал СФУ, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Диэлектрики	8
Лабораторная работа № 1. Измерение диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь твёрдых диэлектриков	
Лабораторная работа № 2. Измерение зависимости угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости от температуры	
Лабораторная работа № 3. Измерение диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь активных диэлектриков	
Лабораторная работа № 4. Изучение прямого и обратного пьезоэффекта	
Лабораторная работа № 5. Электрический пробой в диэлектриках	
Проводники	
Лабораторная работа № 6 Определение удельного сопротивления проводника	
Лабораторная работа № 7. Изучение температурной зависимости сопротивления проводника	
Лабораторная работа № 8. Контактные явления и термоэлектродвижущая сила	
Полупроводники	
Лабораторная работа № 9. Изучение температурной зависимости сопротивления полупроводников	
Лабораторная работа № 10. Фотопроводимость	
Лабораторная работа № 11. Контактные явления в полупроводниках и барьерный фотоэффект	
Магнитные материалы	
Лабораторная работа № 12. Снятие основной кривой намагничивания ферромагнетика	
Лабораторная работа № 13. Изучение свойств ферромагнетика с помощью петли гистерезиса .	
Лабораторная работа № 14. Определение точки Кюри	
Лабораторная работа № 15. Изучение магнитотвёрдых материалов	

Заключение.....

Библиографический список.....

ВВЕДЕНИЕ

Материалы являются одним из главных звеньев в решении многих инженерных задач в производстве электрооборудования, где основная роль принадлежит электротехническим материалам (ЭТМ). Современное электрооборудование представляет собой сложное устройство с большим количеством разнообразных деталей, для изготовления которых требуется широкий ассортимент различных электротехнических материалов с вполне определенными электрическими, механическими и химическими свойствами.

Главной задачей науки *материаловедение* является:

- 1) изучение основных физических процессов, протекающих в материалах под воздействием на них электрического, магнитного или теплового полей и механического напряжения;
- 2) изучение зависимости электрических, механических и других свойств материалов от их химического состава и строения;
- 3) описание свойств и знакомство с материалами, наиболее часто применяемыми в производстве электрооборудования.

Электротехнические материалы разделяются на четыре основных класса: диэлектрические, полупроводниковые, проводниковые и магнитные. По своему поведению в электрическом поле ЭТМ подразделяют на три класса: диэлектрические, полупроводниковые и проводниковые. В магнитном же поле – на два класса: магнитные (сильномагнитные) и немагнитные (слабомагнитные).

Диэлектрические материалы обладают способностью поляризоваться под действием приложенного электрического поля и подразделяются на два подкласса: диэлектрики пассивные и активные.

Пассивные диэлектрики (или просто диэлектрики) используют:

- 1) для создания электрической изоляции токопроводящих частей;
- 2) служат для создания определенной электрической емкости в электрических конденсаторах.

Активные диэлектрики в отличие от обычных применяют для изготовления активных элементов (деталей) электрических схем. Детали, изготовленные из них, служат для генерации, усиления, модуляции, преобразования электрического сигнала. К ним относятся: сегнето- и пьезоэлектрики, пироэлектрики, электреты, люминофоры, жидкие кристаллы, электрооптические материалы и др.

Полупроводниковые материалы по величине удельной электропроводности занимают промежуточное положение между диэлектриками и проводниками. Характерной их особенностью является существенная зависимость электропроводности от

интенсивности внешнего энергетического воздействия: напряженности электрического поля, температуры, освещенности, длины волны падающего света, давления и т. п. Эта их особенность положена в основу работы полупроводниковых приборов: диодов, транзисторов, термисторов, фоторезисторов, тензодатчиков и др.

Проводниковые материалы подразделяются на четыре подкласса: материалы высокой проводимости, сверхпроводники и криопроводники, материалы высокого (заданного) сопротивления, контактные материалы.

Материалы высокой проводимости используют там, где необходимо, чтобы электрический ток проходил с минимальными потерями. К таким материалам относятся металлы: *Cu, Al, Fe, Ag, Au, Pt* и сплавы на их основе. Из них изготавливают провода, кабели и другие токопроводящие части электроустановок.

Сверхпроводниками являются материалы, у которых при температурах ниже некоторой критической $T_{кр}$ сопротивление электрическому току становится равным нулю.

Криопроводники – это материалы высокой проводимости, работающие при криогенных температурах (температуре кипения жидкого азота $-195,6\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Проводниковыми материалами высокого (заданного) сопротивления являются металлические сплавы, образующие твердые растворы. Из них изготавливают резисторы, термодары и электронагревательные элементы.

Из *контактных материалов* изготавливают скользящие и разрывные контакты. В зависимости от предъявляемых требований эти материалы очень разнообразны по своему составу и строению. К ним относятся, с одной стороны, металлы высокой проводимости (*Cu, Ag, Au, Pt* и т. п.) и сплавы на их основе, с другой — тугоплавкие металлы (*W, Ta, Mo* и др.) и композиционные материалы. Последние, хотя и имеют относительно высокое удельное электрическое сопротивление, обладают повышенной стойкостью к действию электрической дуги, образующейся при разрыве контактов.

Различие между проводниками, полупроводниками и диэлектриками наиболее наглядно можно показать с помощью энергетических диаграмм зонной теории твердых тел (рис. В.1).

Диэлектриками будут такие материалы, у которых запрещенная зона настолько велика, что электронной электропроводности в обычных случаях не наблюдается.

Полупроводниками будут вещества с более узкой запрещенной зоной, которая может быть преодолена за счет внешних энергетических воздействий.

Проводниками будут материалы, у которых заполненная электронами зона вплотную прилегает к зоне свободных энергетических уровней или даже перекрывается ею. Вследствие этого электроны в металле свободны, т. е. могут переходить с уровней заполненной зоны на незанятые уровни свободной зоны под влиянием слабой напряженности приложенного к проводнику электрического поля.

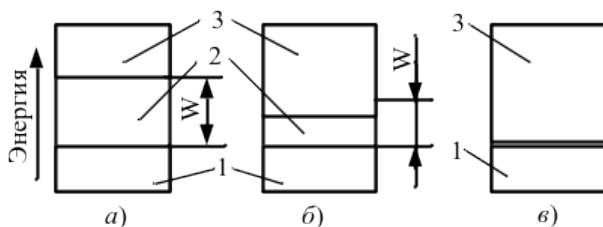


Рис. В.1. Энергетические диаграммы диэлектриков (а), полупроводников (б), проводников (в).

1 – Заполненная электронами зона; 2 – запрещенная зона; 3 – зона свободных энергетических уровней.

К магнитным материалам, используемым в технике, относят ферромагнетики и ферриты. Собственное магнитное поле в сотни и тысячи раз больше, чем вызвавшее его внешнее магнитное поле. Для них характерно наличие магнитного гистерезиса. Магнитные материалы применяют для концентрации магнитного поля в сердечниках катушек индуктивности, дросселях и других конструкциях, в качестве магнитопроводов запоминающих устройств в ЭВМ и т. п. Они способны сильно намагничиваться даже в слабых полях, а некоторые из них сохраняют намагниченность и после снятия внешнего магнитного поля. К наиболее широко используемым в технике магнитным материалам относятся *Fe*, *Co*, *Ni* и их сплавы.

Методические указания являются руководством по выполнению (аудиторные занятия), а также по подготовке, и оформлению (самостоятельные занятия) лабораторных работ по части «Электротехнические материалы» дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение» для студентов специальности 140211.65 «Электроснабжение и по направлению бакалавриата 140200.62 «Электроэнергетика».

Целью выполнения лабораторных работ является закрепление теоретических знаний, полученных на лекциях, приобретение навыков постановки эксперимента.

При выполнении лабораторных работ студенты знакомятся с основными свойствами ЭТМ и возникающими физическими процессами при помещении их в электрическое или магнитное поле, а также исследуют зависимость этих свойств от внешнего энергетического воздействия.

Методические указания приведены для пятнадцати лабораторных работ. Последовательность выполнения и количество лабораторных работ определяется преподавателем в зависимости от изложения лекционного материала и индивидуального графика работы каждой бригады.

Методические указания по каждой работе содержат: цели и задачи выполняемой работы, краткие теоретические сведения, описание применяемого оборудования (блоков), схемы для проведения экспериментов, программу работы, содержание отчета по выполняемой работе, контрольные вопросы для подготовки к защите работы.

Задания на выполнение лабораторной работы могут при необходимости корректироваться преподавателем. При этом возможна корректировка объема выполняемых экспериментов или замена части экспериментов индивидуальным заданием.

Техника безопасности при выполнении лабораторных работ

1. При выполнении работ на металлических корпусах приборов при нарушении изоляции может возникнуть опасное для жизни человека напряжение. В связи с этим **запрещается** самостоятельно **вскрывать** переднюю панель стенда и производить электромонтажные соединения в приборах.

2. Подавать питание на стенд следует только после проверки правильности собранной схемы преподавателем.

3. При выполнении эксперимента **запрещается** производить какие-либо эксперименты на стенде, не имея допуска на выполнение данной работы.

4. **Запрещается** подавать питание на незаземленный стенд.

5. **Запрещается** подключать к стенду оборудование, не предусмотренное техническим описанием и методическими указаниями.

6. **Запрещается** производить какие-либо переключения на стенде при включенном питании (кроме предусмотренных в методических указаниях).

ДИЭЛЕКТРИКИ

Диэлектрические материалы имеют молекулярное или ионное строение. Молекулы, в свою очередь, образованы из атомов, атомы и ионы – из электронов и положительно заряженных ядер. При этом суммарные заряды всех отрицательно и положительно заряженных частиц равны друг другу.

Идеальный диэлектрик состоит только из *связанных* между собой *заряженных частиц*. Свободных зарядов в нем нет, поэтому электропроводность в идеальном диэлектрике отсутствует.

В *реальных диэлектриках* из-за наличия в них дефектов строения и ионогенной примеси имеются *свободные заряженные частицы* (свободные заряды), которые не связаны с определенными молекулами или атомами. Под действием приложенного электрического поля они направленно перемещаются (дрейфуют) в диэлектрике на относительно большие расстояния. Подходя к электродам, свободные заряды разряжаются на них, обуславливая *электрический ток*. Поскольку содержание свободных зарядов в диэлектриках ничтожно мало, их электропроводность очень низкая (в $10^{11} - 10^{26}$ раз меньше, чем у проводников).

Диэлектрические материалы используют в электротехнике в основном для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электрических устройств и отделяет друг от друга элементы схемы или конструкции, находящиеся под различными электрическими потенциалами.

Применение диэлектриков в конденсаторах позволяет получать требуемые значения емкости, а в некоторых случаях обеспечивает определенный характер зависимости этой емкости от внешних факторов. Диэлектрик конденсатора может запасать, а потом отдавать в цепь электрическую энергию (емкостный накопитель). Иногда конденсатор используют для разделения цепей постоянного и переменного токов, для изменения угла фазового сдвига и т. д.

Некоторые диэлектрики применяют как для создания электрической изоляции, так и в качестве конденсаторных материалов (например, слюда, керамика, стекло, полистирольные и другие пленки). Тем не менее, требования к электроизоляционным и конденсаторным материалам существенно различаются. Если от электроизоляционного материала требуется невысокая относительная диэлектрическая проницаемость и большое удельное сопротивление,

то диэлектрик конденсатора, наоборот, должен иметь повышенную ϵ и малое значение $\text{tg}\delta$.

Диэлектрические материалы являются основными видами электротехнических материалов, с которыми придется встретиться на практике будущим инженерам-электрикам.

Физические условия, в которых должна находиться и функционировать изоляция, накладывают определенные требования на физико-химические параметры материала, ограничивая возможные вид и тип используемых электротехнических материалов. Кроме того, при конструировании даже простейших изделий, предназначенных для работы в электрическом поле, необходимо четко представлять, какие процессы происходят в материале, как влияет тот, или иной материал на работу других частей устройства, в том числе за счет перераспределения электрического поля. Здесь необходимо учитывать разноплановые характеристики материала:

- механические: плотность и вес материала, прочность;
- теплофизические: теплопроводность, теплоемкость, нагревостойкость, теплостойкость и горючесть;
- электрофизические: диэлектрическая проницаемость, электропроводность, электрическая прочность, трекинговая стойкость;
- физико-химические: химическая стойкость, влагопроницаемость и т.д.

Чтобы оценить значимость каждого из них и понять, какие требования, в каждом конкретном случае, являются главными, а какие – второстепенными необходимо ясное понимание всего комплекса процессов, происходящих при функционировании устройств.

Основными электрическими характеристиками диэлектриков являются *диэлектрическая проницаемость ϵ , удельное объемное сопротивление ρ , удельное поверхностное сопротивление ρ_s , тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и электрическая прочность $E_{\text{пр}}$.*

Лабораторная работа № 1

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

1.1. Цель работы

Изучить процессы поляризации в диэлектриках. Определить диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь в образцах диэлектрических материалов.

1.2. Задачи работы

1. Измерить тангенс угла диэлектрических потерь и относительную диэлектрическую проницаемость.
2. Определить целесообразность применения диэлектрика в качестве изоляционного материала или в конденсаторе.

1.3. Краткие теоретические сведения

В отсутствие внешнего электрического поля все связанные и свободные заряженные частицы диэлектрика, а также его полярные молекулы (диполи) расположены таким образом, что общий электрический дипольный момент всех микроскопических объемов, занимаемых этими частицами и диполями, равен или близок нулю. Под действием приложенного электрического поля все заряженные частицы смещаются из своих равновесных положений на ограниченные расстояния. Положительные заряды смещаются в направлении вектора внешнего поля, а отрицательные – в обратном направлении, образуя диполи (индуцированные диполи). Имеющиеся диполи ориентируются по полю. Возникает поляризация диэлектрика, и его результирующий дипольный момент всех микрообъемов становится отличным от нуля. В таком состоянии диэлектрик называют **поляризованным**. *Способность диэлектриков поляризоваться под действием приложенного электрического поля является их фундаментальным свойством.*

Диэлектрическая проницаемость ϵ количественно характеризует способность диэлектрика поляризоваться, а также оценивает степень его полярности; ϵ является константой диэлектрического материала при определенной температуре и частоте электрического напряжения и показывает, во сколько раз заряд конденсатора с данным диэлектриком больше заряда конденсатора тех же размеров с вакуумом.

Заряд Q_0 на каждой пластине плоского конденсатора с вакуумом равен (по модулю):

$$Q_0 = \frac{\epsilon_0 S U}{d},$$

соответственно ёмкость

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d}, \quad (1.1)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная, или диэлектрическая проницаемость вакуума, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, S – площадь каждой из пластин, d – зазор между пластинами, U – напряжение между ними.

Заряд Q_x на каждой пластине плоского конденсатора с диэлектриком равен (по модулю):

$$Q_x = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U}{d}.$$

соответственно ёмкость

$$C_x = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}.$$

Диэлектрическая проницаемость ε равна

$$\varepsilon = \frac{Q_x}{Q_0} = \frac{C_x}{C_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0}, \quad (1.2)$$

где Q_d – заряд, обусловленный поляризацией диэлектрика.

Диэлектрическими потерями называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика.

Потери в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку в материале обнаруживается сквозной ток при постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации. Качество материала характеризуется значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений. При переменном напряжении необходимо использовать другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозного тока, возникают дополнительные причины, вызывающие потери в диэлектрике.

Диэлектрические потери в электроизоляционном материале можно характеризовать рассеиваемой мощностью, отнесенной к единице объема, или *удельными потерями*; чаще для оценки способности диэлектрика рассеивать мощность в электрическом поле пользуются углом диэлектрических потерь, а также тангенсом этого угла.

Углом диэлектрических потерь называется угол, дополняющий до 90° угол фазового сдвига φ между током и напряжением в емкостной цепи. Для идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи будет опережать вектор напряжения на 90° , при этом угол диэлектрических потерь δ будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в теплоту, тем меньше угол фазового сдвига φ и тем больше угол δ и его функция $\operatorname{tg} \delta$.

Недопустимо большие диэлектрические потери в электроизоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению. Даже если напряжение, приложенное к диэлектрику, недостаточно велико для того, чтобы за счет диэлектрических потерь мог произойти недопустимый перегрев, то и в этом случае большие диэлектрические потери могут принести существенный вред, увеличивая, например, активное сопротивление колебательного контура, в котором использован данный диэлектрик, а, следовательно, и величину затухания.

Природа диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах различна в зависимости от агрегатного состояния вещества. Диэлектрические потери могут обуславливаться сквозным током или, как указывалось при рассмотрении явления поляризации, активными составляющими токов смещения.

В технических электроизоляционных материалах, помимо потерь от сквозной электропроводности и потерь от замедленной поляризации, возникают диэлектрические потери, которые сильно влияют на электрические свойства диэлектриков. Эти потери вызываются наличием изолированных друг от друга посторонних проводящих или полупроводящих включений углерода, оксидов железа; они значительны даже при малом содержании таких примесей в электроизоляционном материале.

Дальнейшее рассмотрение диэлектрических материалов будем проводить на примере конденсатора.

В любом реальном конденсаторе при работе его на переменном токе неизбежны потери в диэлектрике, обусловленные переменной поляризацией. Кроме того, конденсатор имеет ещё активную проводимость через изоляцию электродов, поэтому реальный конденсатор представляется эквивалентной схемой в виде идеальной ёмкости, последовательно или параллельно соединённой с активным сопротивлением (рис. 1.1 а, б).

Векторные диаграммы и схемы замещения для идеального

диэлектрика и диэлектрика с потерями показаны на рис. 1.1.

Из векторной диаграммы тангенс этого угла равен отношению активного и реактивного токов или отношению активной мощности P_A к реактивной P_C .

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_A}{P_C}.$$

Иногда для характеристики устройства с диэлектриком определяют добротность – параметр обратный тангенсу угла диэлектрических потерь:

$$Q = 1/\operatorname{tg} \delta = \operatorname{ctg} \delta.$$

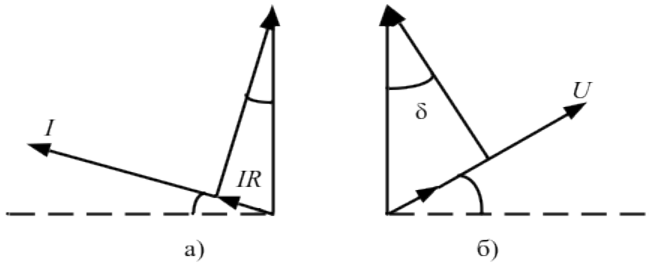


Рис. 1.1 – Последовательная (а) и параллельная (б) схемы замещения реального конденсатора и соответствующие векторные диаграммы

Для последовательной схемы

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_1 C_1,$$

для параллельной

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_2 C_2}.$$

Сопоставление формул для последовательной и параллельной схем замещения показывает, что они дают взаимно противоположные зависимости параметров цепи конденсатора от частоты. Это объясняется тем, что ни одна из схем замещения не отражает полностью тех реальных процессов, которые имеют место в конденсаторах.

Последовательная схема и соответствующие ей формулы лучше отражают физические свойства реального конденсатора в области высоких частот (более 1 МГц), параллельная схема даёт более правильные результаты в области низких частот. В области средних

частот обе схемы являются достаточно удовлетворительными.

Методы и средства измерений емкости, угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости

1. По определению угол диэлектрических потерь – угол, дополняющий 90° угол фазового сдвига между током и напряжением в емкостной цепи (рис. 1.2). Угол сдвига определяется как отношение времени сдвига к периоду колебаний, и для перевода в радианы помножить на 2π .

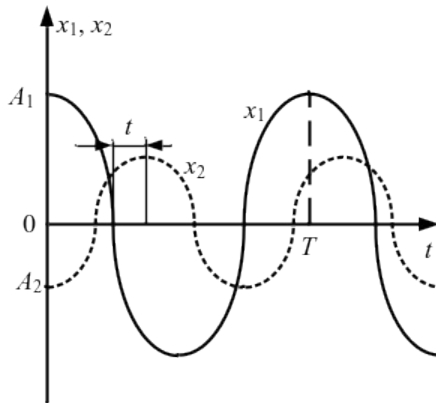


Рис. 1.2 Оциллограмма тока и напряжения в цепи с емкостной нагрузкой

$$\delta = \frac{2\pi}{T} t = 2\pi \cdot f \cdot t,$$

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg}(2\pi \cdot f \cdot t).$$

2. Наиболее часто значения C и $\operatorname{tg} \delta$ на частоте 50 Гц определяют при помощи мостов переменного тока. Предел измерения моста по емкости должен быть не менее емкости образца, а по $\operatorname{tg} \delta$ превышать примерно в 2 раза $\operatorname{tg} \delta$ образца. Принципиальная схема такого моста показана на рис. 1.3, а.

Схема, приведённая на рис. 1.3,а позволяет получить большую точность измерений. Испытуемый образец подключают к мосту параллельно с градуированным измерительным конденсатором C_0 . Производят уравнивание моста и записывают C'_0 и C'_1 . Затем отключают образец и вновь уравнивают мост изменением C_0 и C

и записывают значения C''_0 и C'_1 . Значения C_x и $\text{tg } \delta$ находят по формулам:

$$\text{tg } \delta = \frac{\omega R(C''_1 - C'_1)C'_0}{C'_0 - C''_0},$$

$$C_x = C'_0 - C''_0.$$

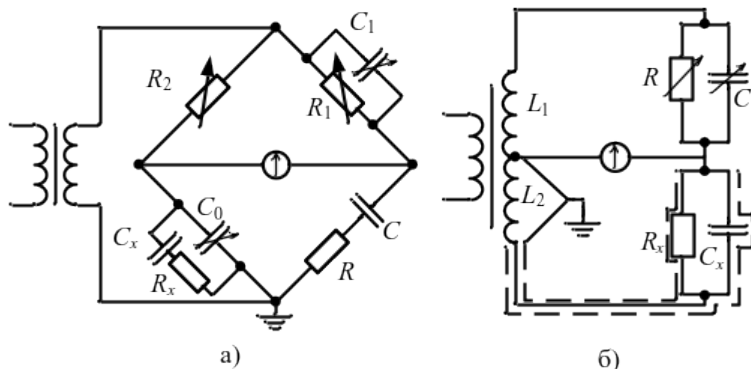


Рис. 1.3. Основные схемы мостов для измерения C и $\text{tg } \delta$: а – метод замещения; б – схема трансформаторного моста.

Высокую точность измерений позволяют получить трансформаторные мосты переменного тока (рис. 1.3,б), в которых уравновешивание выполняется изменением емкости и индуктивности. Изменением отношения L_1/L_2 устанавливают диапазон изменения, а точное уравновешивание осуществляется регулировкой C и R . Уравнения равновесия моста:

$$\text{tg } \delta = \frac{1}{\omega RC},$$

$$C_x = \frac{L_1 C}{L_2}.$$

3. Для измерений на частоте 50 Гц применяют как прямые, так и косвенные измерения. Измерение емкости осуществляется при помощи приборов непосредственной оценки или приборов сравнения (мостов).

Измерения при помощи стрелочных приборов непосредственной оценки не применяются из-за невысокой точности и сложности расчетов, однако те же методы измерения с использованием цифровых

приборов и ЭВМ позволяют получить удовлетворительные результаты.

Схема с использованием амперметра, вольтметра и ваттметра показана на рис. 1.4, а. Ваттметр должен обладать высокой чувствительностью, поскольку значения мощности потерь незначительны. Искомые значения величин вычисляют по формулам:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}},$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI},$$

$$C_x = \frac{I\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\omega U}.$$

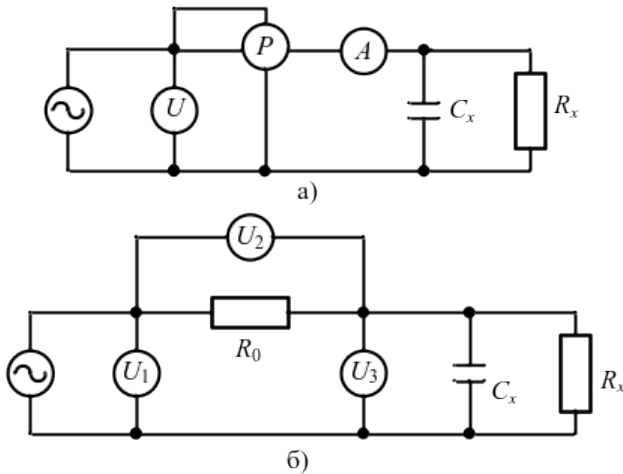


Рис. 1.4. Косвенные методы измерения

На рис. 1.4, б приведена схема, использующая три вольтметра. Значения C_x и $\operatorname{tg} \delta$ находят по формулам:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_0 k}{2R}, \quad (1.3)$$

$$C_x = \frac{R}{2\pi f R_0^2} \left(\frac{U_3}{U_2} \right)^2, \quad (1.4)$$

$$R = \sqrt{R_0^2 \left(\frac{U_3}{U_2} \right)^2 - \frac{R_0^2}{4} k^2}, \quad (1.5)$$

$$k = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 - \left(\frac{U_3}{U_2} \right)^2 - 1. \quad (1.6)$$

Обе схемы чувствительны к изменению частоты.

4. Рассматривая переходные процессы в цепи (рис. 1.5), состоящей из последовательно соединенных участков с датчиком тока R , источником тока I и конденсатором емкостью C , протекающий через конденсатор ток будет равен изменению заряда в единицу времени:

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

Так как

$$Q = CU,$$

то

$$i = \frac{d(UC)}{dt} = C \frac{dU}{dt},$$

откуда

$$C = \frac{I \cdot \Delta t}{\Delta U}. \quad (1.7)$$

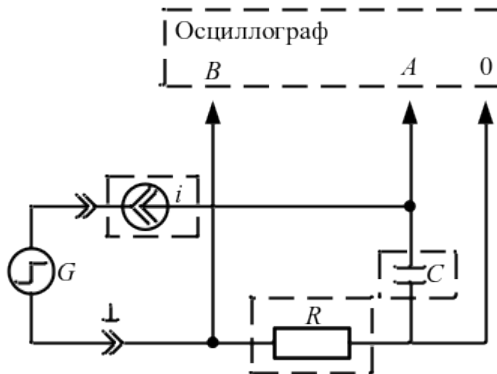


Рис. 1.5. Схема электрических соединений установки для измерения емкости конденсатора

На схему (рис. 1.5) подается переменное напряжение

прямоугольной формы и рассматривается заряд конденсатора при постоянном токе.

Частота сигнала выбирается таким образом, чтобы осциллограмма тока (канал B) имела участок Δt , на котором значение тока I установилось и поддерживалось источником тока i на одном уровне.

Измерение приращения напряжения $\Delta U (\Delta U_c)$ производится по осциллограмме канала A в интервале вышеописанного прямолинейного участка Δt .

Подставляя полученные значения ΔU , Δt и значение источника тока I в формулу (1.7) получим ёмкость конденсатора C .

5. Диэлектрическая проницаемость материала образца может быть найдена как отношение ёмкости C_x при заданной конфигурации электродов и испытуемом материале в качестве диэлектрика к ёмкости C_0 , тех же электродов без образца (но с сохранением геометрических размеров) в вакууме (параметры, необходимые для расчёта приведены на корпусе минимодуля).

1.4. Используемое оборудование

«Измеритель RLC », минимодули «Диэлектрическая проницаемость бумаги», «Диэлектрическая проницаемость полиэтилентерефталата», «Диэлектрическая проницаемость полипропилена», соединительные проводники.

1.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Для выданных образцов определить ϵ и $\text{tg}\delta$,
2. Сравнить полученные результаты со справочными данными.
3. Построить гистограммы и сравнить диэлектрики по величине ϵ и $\text{tg}\delta$.

1.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.
2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.
3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового

комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);

4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;

5. Подключить минимодуль «Диэлектрическая проницаемость» к измерителю RLC , как указано на рис. 1.6 (полярность подключения значения не имеет).

В данной лабораторной работе производится измерение емкости конденсаторов прямым методом – измерителем RLC .

6. Собрав электрическую (монтажную) схему, необходимо пригласить преподавателя для её проверки.

7. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО «Модуля питания».

Включить измеритель RLC , нажав кнопку 2 (рис. 1.6), нажатию кнопки 1 (рис. 1.6) установить режим измерения емкости, о чем будет свидетельствовать значок «F» - фарады в нижнем правом углу дисплея. Установить частоту тест сигнала 120 Гц нажатию кнопки 3 (рис. 1.6), частота тест сигнала отображается в правой части дисплея «120 Hz». Установить режим измерения диэлектрических потерь кнопкой 4 (рис. 1.6), данный режим измерения индицирует символ «D» в верхней части дисплея.

Значение емкости будет отображаться крупными цифрами в нижней части дисплея, справа от значения расположена единица измерения: « μF » - 10^{-6} Ф; « nF » - 10^{-9} Ф; « pF »- 10^{-12} Ф.

В правой верхней части дисплея отображается тангенс угла диэлектрических потерь. Заносить показания измерителя RLC в табл. 1.1.

Не отключая измеритель RLC заменить минимодуль на другой из набора и заносить емкость и угол диэлектрических потерь в табл. 1.1. Повторить измерения для всех выданных образцов. Результаты измерений заносить в табл. 1.1

Таблица 1.1

№ п.п.	f , Гц	ϵ_0 , Ф/м	Измерителем RLC		ϵ	d , м	S , м ²	C_0 , Ф
			$tg\delta$	C_x				
1-ый образец		851 0 ⁻¹²						
2-ой образец								



Рис. 1.6 - Соединение измерителя *RLC* и минимодуля «Диэлектрическая проницаемость»: 1 – кнопка выбора режима измерения основного параметра (емкость, индуктивность, сопротивление); 2 – кнопка включения прибора; 3 – кнопка выбора частоты тест сигнала; 4 – кнопка выбора режима измерения дополнительного параметра (активное сопротивление, добротность, диэлектрические потери).

8. Рассчитать диэлектрическую проницаемость ε образцов, используя формулы (1.1) – (1.2) и данные табл. 1.1.

Для минимодулей «Диэлектрическая проницаемость»: площадь обкладок измерить на опытном образце, толщина диэлектрика d указана на минимодуле. Расчёты данные заносить в таблицу 1.1.

9. Сравнить полученные данные со справочными.

10. По полученным данным построить гистограммы и сравнить диэлектрики по величине тангенса диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости. Сделать вывод о целесообразности применения диэлектрика в том или ином случае.

11. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

12. Ответить на контрольные вопросы.

1.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.

2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.

3. Результаты измерений.

4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).

5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:

– сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;

– сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;

– сопоставление их расхождений с точностью измерений.

6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:

а) основные численные результаты работы;

б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

1.8. Контрольные вопросы

1. Приведите определение поляризации

2. Назовите основные механизмы поляризации

3. Приведите определение «диэлектрической проницаемости».

4. Физическая природа диэлектрических потерь.

5. На что расходуется мощность диэлектрических потерь и от чего она зависит?

6. Приведите векторные диаграммы, соответствующие последовательной и параллельной схемам замещения диэлектрика.

7. Приведите определение тангенса угла диэлектрических потерь.

8. В чем опасность диэлектрических потерь в конденсаторах и изоляционных материалах?

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

2.1. Цель работы

Изучить влияние температуры на тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости представленных диэлектриков.

2.2. Задачи работы

1. Построить график зависимости диэлектрической проницаемости (или емкости) ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ исследуемых диэлектриков от температуры.

2. Определить температурный коэффициент диэлектрической проницаемости при температуре, указанной преподавателем.

2.3. Краткие теоретические сведения

Диэлектрическая проницаемость ϵ зависит от концентрации молекул n диэлектрика и поляризуемости α каждой молекулы. В свою очередь, n и α зависят от природы диэлектрика и его температуры, а α – еще и от частоты приложенного напряжения.

В твердых неполярных диэлектриках молекулярного строения обладают в основном только электронной поляризацией. Поэтому они имеют невысокое значение диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 2,0 \div 2,5$).

Значения n и α , от частоты напряжения не зависят, поэтому и диэлектрическая проницаемость ϵ неполярных диэлектриков не зависит от частоты во всем диапазоне, включая оптические частоты. При нагревании ϵ монотонно снижается (рис. 2.1), так как уменьшается концентрация n поляризуемых молекул в результате теплового расширения диэлектрика. В области температуры плавления $T_{\text{пл}}$, (у парафина $T_{\text{пл}} \approx 50 \text{ }^\circ\text{C}$) ϵ скачкообразно снижается.

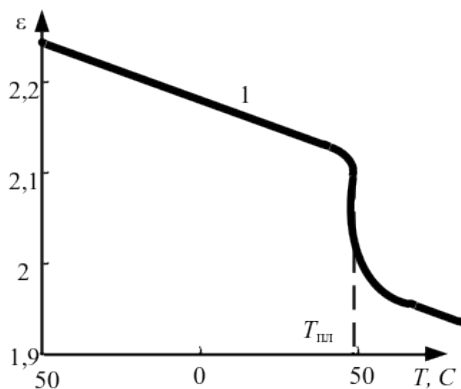


Рис. 2.1. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ неполярных диэлектриков от температуры T

Величина, характеризующая относительное изменение ϵ при нагревании диэлектрика на один кельвин, называется *температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости* TK_ϵ и измеряется в K^{-1} :

$$TK_\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT}. \quad (2.1)$$

Среднее значение $\overline{TK_\epsilon}$ (K^{-1}) можно определить из выражения

$$\overline{TK_\epsilon} = \frac{1}{\epsilon_1} \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{T_2 - T_1}, \quad (2.2)$$

где значение ϵ_2 измерялось при температуре T_2 а ϵ_1 – при T_1 .

Твердые диэлектрики молекулярного строения полярные (канифоль) наряду с электронной поляризацией обладают и дипольно-релаксационной.

Величина ϵ полярных диэлектриков при нагревании вначале меняется незначительно, затем резко возрастает, проходит через максимум и далее медленно снижается; максимум с увеличением частоты напряжения смещается в область более высоких температур (рис. 2.2). Наличие максимума объясняется тем, что с увеличением температуры дипольно-релаксационная поляризуемость $\alpha_{др}$ сначала возрастает, а затем снижается (см. рис. 2.2, 1).

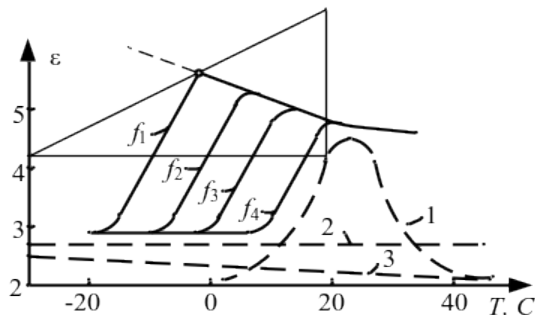


Рис. 2.2. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ полярного диэлектрика от температуры T : частота измерения: $f_1 = 10^2, f_2 = 10^3, f_3 = 10^4, f_4 = 10^5$ Гц. Образующие ϵ : 1 – $\alpha_{др}(T)$; 2 – $\alpha_3(T)$; 3 – $n(T)$.

Вследствие нелинейной зависимости ϵ от температуры TK_ϵ находят для различных температурных интервалов. Значения TK_ϵ определяют чаще всего методом графического дифференцирования кривой зависимости ϵ от T (см. рис. 2.2). Для этого в точке A , соответствующей заданной температуре T_1 и частоте f_1 проводят касательную к кривой и строят на ней, как на гипотенузе, прямоугольный треугольник произвольных размеров. Значение TK_ϵ в точке A находится как отношение катетов треугольника с учетом масштабов ϵ и T , деленное на значение ϵ в точке A .

Для **твердых диэлектриков ионного строения с плотной упаковкой решетки ионами** (корунд, кварц, слюда) характерны электронная и ионная поляризации. При нагревании диэлектрическая проницаемость обычно возрастает (TK_ϵ положительный), так как возрастает $\alpha_{и}$ (рис. 2.3, а).

У некоторых диэлектриков (титаносодержащая керамика) TK_ϵ отрицательный, поэтому при нагревании ϵ у них уменьшается.

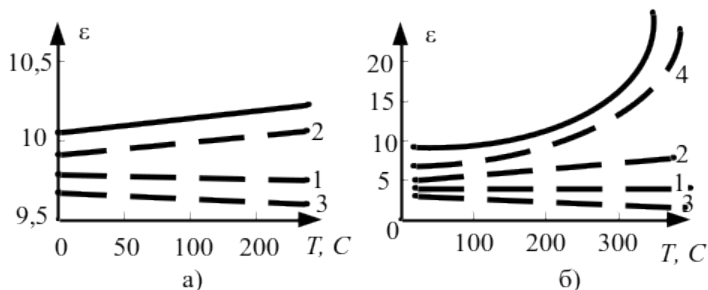


Рис. 2.3. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости ϵ диэлектрика с плотной упаковкой решетки – корунда (а) и с неплотной упаковкой решетки – электротехнического фарфора (б).
 Образующие ϵ : 1 – $\alpha_s(T)$; 2 – $\alpha_n(T)$; 3 – $n(T)$; 4 – $\alpha_{np}(T)$

Диэлектрическая проницаемость **аморфных и кристаллических диэлектриков с неплотной упаковкой решетки ионами** (электротехнический фарфор, неорганические стекла, асбест) зависит от температуры и частоты напряжения вследствие проявления ионной и, главным образом, ионно-релаксационной поляризации (см. рис. 2.3, б). У этих диэлектриков TK_ϵ положительный и в отличие от TK_ϵ диэлектриков ионного строения с плотной упаковкой решетки имеет высокие значения. Увеличение диэлектрической проницаемости при нагревании происходит преимущественно за счет роста концентрации ионов, принимающих участие в ионно-релаксационной поляризации.

В кристаллических диэлектриках с **плотной упаковкой** решетки ионами поляризация не вызывает рассеивание мощности приложенного электрического поля, поэтому диэлектрические потери обусловлены только удельной электропроводностью и имеют небольшие значения, тангенса угла потерь ($\text{tg}\delta \approx 10^{-4}$), который при нагревании незначительно возрастает (рис. 2.4, а,б, кривые II) так как возрастает удельная электропроводность (см. рис. 2.4 а, кривая I). Наличие примеси, искажающей кристаллическую решетку, приводит к существенному увеличению $\text{tg}\delta$.

В диэлектриках **аморфных и кристаллических с неплотной упаковкой** решетки поляризация, вызывает ионно-релаксационные потери. Диэлектрические потери в этом случае обусловлены электропроводностью и ионно-релаксационной поляризацией (см. рис. 2.4, а, кривые 1 и 2). Диэлектрические потери в этих диэлектриках выше ($\text{tg}\delta \approx 10^{-2}$), чем в диэлектриках кристаллических с плотной упаковкой

решетки ионами и сильно зависят от температуры (см. рис. 2.4, б, кривая *I*): при нагревании $\text{tg}\delta$ существенно возрастает (ср. кривые *I* и *II* рис. 2.4).

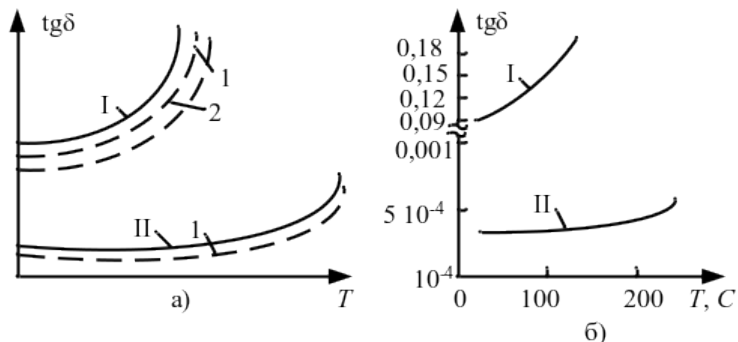


Рис. 2.4. Общий вид (а) зависимости $\text{tg}\delta$ от температуры T диэлектриков ионного строения аморфных или кристаллических с неплотной упаковкой решетки ионами (*I*) и с плотной упаковкой решетки ионами (*II*). Образующие $\text{tg}\delta$, обусловленные электропроводностью (1) и ионно-релаксационной поляризацией (2); температурная зависимость (б) $\text{tg}\delta$ изоляторного фарфора (*I*) и алюминоксида (корунда) — (*II*) при 1 МГц

В неполярных диэлектриках молекулярного строения потери обусловлены только удельной электропроводностью. У этих диэлектриков наблюдается электронная поляризация; релаксационные виды поляризации отсутствуют. Диэлектрические потери небольшие ($\text{tg}\delta \approx 10^{-4}$) и при нагревании слегка возрастают (аналогично кривой $\text{tg}\delta$ 1 рис. 2.5). Наличие ионогенной примеси (например, влаги) приводит к существенному возрастанию диэлектрических потерь.

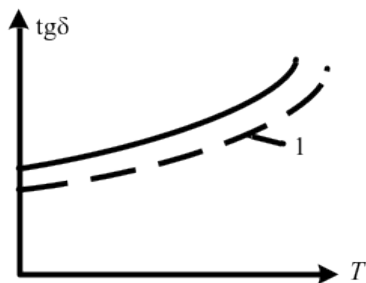


Рис. 2.5. Общий вид зависимости $\operatorname{tg}\delta$ жидких неполярных диэлектриков от температуры T . 1- образующая $\operatorname{tg}\delta$, обусловленная удельной электропроводностью.

В полярных диэлектриках (например, в канифоли) на кривых зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от температуры и частоты напряжения, подобно полярным жидким диэлектрикам, проявляется максимум тангенса угла диэлектрических потерь, обусловленный дипольно-релаксационной поляризацией (рис. 2.6). В этих диэлектриках, так же как в жидких полярных, диэлектрические потери складываются из потерь, обусловленных электропроводностью и дипольно-релаксационной поляризацией. Величина $\operatorname{tg}\delta \approx 10^{-3}$ - 10^{-2} .

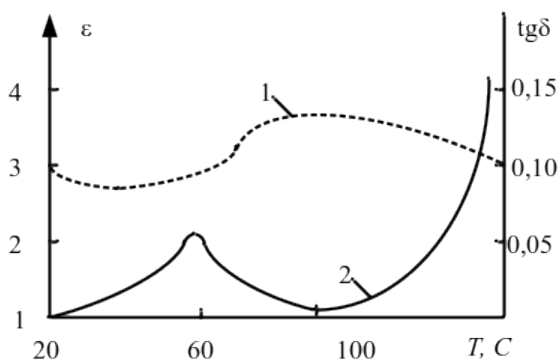


Рис. 2.6. Зависимость ϵ (1) и $\operatorname{tg}\delta$ (2) канифоли от температуры T при 50 Гц

2.4. Используемое оборудование

Модули «Функциональный генератор», «Магнитомягкие материалы и тепловой коэффициент сопротивления / емкости», «Модуль питания», минимодуль «ТКЕ конденсаторов», «Измеритель RLC », мультиметр, соединительные проводники.

2.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Измерить емкость конденсатора и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ исследуемых диэлектриков при различных температурах.

2. Методом графического дифференцирования вычислить температурный коэффициент емкости и тангенса угла диэлектрических потерь исследуемых образцов при указанной преподавателем температуре.

2.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.

2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.

3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);

4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;

5. Согласно рис. 2.7 выполнить электрические соединения модулей для измерения тангенса диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости твёрдых диэлектриков. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**

В качестве источника питания, для нагрева опытного образца, использовать нерегулируемый выход «+15В» модуля питания (на время настройки измерителя RLC не соединять общий проводника модуля питания и схемы). В качестве $P1$ использовать измеритель RLC , в качестве $P2$ – мультиметр в режиме измерения температуры «°C». Подключить выводы термопары миниמודля «ТКЕ конденсаторов» к контактам «TEMP» мультиметра.

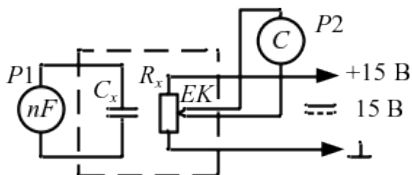


Рис. 2.7. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения зависимости диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь от температуры

6. После проверки правильности соединений схемы

преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО «Модуля питания».

Включить измеритель RLC, нажав кнопку 2 (рис. 1.6), нажатием кнопки 1 (рис. 1.6) установить режим измерения емкости, о чем будет свидетельствовать символ «F» - фарады в нижнем правом углу дисплея. Установить частоту тест сигнала 1кГц нажатием кнопки 3 (рис. 1.6), частота тест сигнала отображается в правой части дисплея «120 Hz». Установить режим измерения диэлектрических потерь кнопкой 4 (рис. 1.6), данный режим измерения индицирует символ «D» в верхней части дисплея.

Значение емкости будет отображаться крупными цифрами в нижней части дисплея, справа от значения расположена единица измерения: « μF » - $10^{-6}F$; « nF » - $10^{-9}F$; « pF » - $10^{-12}F$.

7. Для начала эксперимента необходимо соединить общий проводник модуля и нагревательного элемента минимодуля (рис. 2.7).

Заносить значение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь в табл. 2.1 через каждые 5 °С. Измерения проводить до 100 °С. **НЕ ДОПУСКАЕТСЯ НАГРЕВАТЬ ОБРАЗЦЫ ВЫШЕ 100°С**

8. Повторить измерения для всех выданных образцов. Результаты заносить в табл. 2.1.

9. Рассчитать диэлектрическую проницаемость ϵ образцов используя формулы (1.1) – (1.2) и данные табл. 2.1.

Расчёты и исходные данные заносить в табл. 2.1.

Таблица 2.1.

№ п.п.	Конденсатор 1				Конденсатор 2			
	$t, ^\circ C$	$tg\delta$	$C_x, \mu F$	ϵ	$t, ^\circ C$	$tg\delta$	$C_x, \mu F$	$\epsilon \text{€}$ €
1	20				20			
2	25				25			
3	30				30			
4	35				35			
5	40				40			
...			

10. Построить зависимость $tg\delta$ и ϵ от температуры.

11. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

2.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.
2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.
3. Результаты измерений.
4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).
5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление их расхождений с точностью измерений.
6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:
 - а) основные численные результаты работы;
 - б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

2.8. Контрольные вопросы

1. Какие физические процессы сопровождают нагрев диэлектрика, ведущие к изменению его основных параметров?
2. Какое физическое явление лежит в основе измерения температуры с использованием термопары?

Лабораторная работа № 3

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ АКТИВНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

3.1. Цель работы

Исследовать явление поляризации в активных диэлектриках.

3.2. Задачи работы

Определить $\text{tg}\delta$ и ϵ активных диэлектриков и по полученным результатам определить исследуемый материал.

3.3. Краткие теоретические сведения

Активными называют диэлектрики, свойствами которых есть возможность управлять с помощью внешних энергетических воздействий и использовать эти воздействия для создания функциональных элементов электротехники и электроники. Активные диэлектрики позволяют осуществлять генерацию, усиление, модуляцию электрических и оптических сигналов, запоминание или преобразование информации. По мере наращивания сложности электронной аппаратуры и перехода к функциональной электронике роль и значение активных материалов, при решении важнейших научных и технических задач непрерывно возрастают.

К числу активных диэлектриков относят сегнето-, пьезо- и пироэлектрики; электреты; материалы квантовой электроники; жидкие кристаллы; электро-, магнито- и акустооптические материалы; диэлектрические кристаллы с нелинейными оптическими свойствами и др.

Свойствами активных диэлектриков могут обладать не только твердые, но также жидкие и даже газообразные вещества (например, активная среда газовых лазеров). По химическому составу это могут быть органические и неорганические материалы. По строению и свойствам они подразделяются на кристаллические и аморфные, полярные и неполярные диэлектрики. Ряд материалов проявляет свою активность лишь благодаря наличию в них спонтанной или устойчивой остаточной поляризации. Однако поляризованное начальное состояние не является обязательным условием проявления активности материала при внешних воздействиях. Строгая классификация активных диэлектриков, охватывающая многие отличительные признаки этих материалов, оказывается весьма затруднительной. К тому же резкой границы между активными и пассивными диэлектриками не существует. Один и тот же материал в различных условиях его эксплуатации может выполнять либо пассивные функции изолятора или конденсатора, либо активные функции управляющего или преобразующего элемента.

В зависимости от технического назначения существенно различны и требования к материалам. Так, одно из главных

требований, предъявляемых к пассивным диэлектрикам, заключается в сохранении стабильности свойств при внешних воздействиях. В то же время требования к активному материалу совершенно противоположные: чем сильнее изменяются его свойства при внешних возмущениях, тем лучше может выполнять активный элемент функции управления энергией или преобразования поступающей информации.

В большинстве случаев активные диэлектрики классифицируют по роду физических эффектов, которые используются для управления свойствами материалов. Однако такая классификация, хотя и является вполне логичной и обоснованной, все же не позволяет четко разделить одну группу материалов от другой. Это связано с тем, что многие материалы проявляют высокую чувствительность по отношению к нескольким видам энергетических воздействий. Наибольшей универсальностью в этом плане характеризуются сегнетоэлектрики, которые сочетают в себе свойства пьезо- и пирозэлектриков, электрооптических и нелинейно-оптических материалов. Они могут выступать и в качестве электретов. Вместе с тем, сегнетоэлектрики обладают рядом специфических, только им присущих свойств. Важнейшим из них является нелинейное изменение поляризованности при воздействии электрического поля. Это обстоятельство позволяет выделить сегнетоэлектрики в самостоятельную группу активных диэлектриков, аналогично и жидкие кристаллы, спецификой которых является анизотропия свойств и высокая структурная подвижность молекул, проявляющаяся во многих оптических эффектах, несвойственных другим веществам.

3.4. Используемое оборудование

Модуль «Функциональный генератор», «Модуль питания», «Обратный пьезоэффект», «Измеритель RLC », соединительные проводники.

3.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Измерить тангенс угла диэлектрических потерь и емкость активных диэлектриков.
2. Вычислить относительную диэлектрическую проницаемость.
3. На основании полученных данных определить материал.

3.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.
2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.
3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);
4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;
5. Соединить RLC -метр и диэлектрик HF модуля «Обратный пьезоэффект» согласно рис. 3.1, где $P1$ – «Измеритель RLC ».

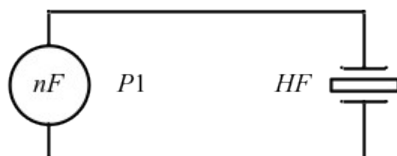


Рис. 3.1. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь в активных диэлектриках

6. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО «Модуля питания».

Включить измеритель RLC , нажав кнопку 2 (рис. 1.6), нажатием кнопки 1 (рис. 1.6) установить режим измерения емкости, о чем будет свидетельствовать значок «F» - фарады в нижнем правом углу дисплея. Установить частоту тест сигнала 1 кГц нажатием кнопки 3 (рис. 1.6), частота тест сигнала отображается в правой части дисплея «1kHz». Установить режим измерения диэлектрических потерь кнопкой 4 (рис. 1.6), данный режим измерения индицирует символ «D» в верхней части дисплея.

Значение емкости будет отображаться крупными цифрами в нижней части дисплея, справа от значения расположена единица измерения: « μF » – 10^{-6} Ф; «nF» – 10^{-9} Ф; «pF» – 10^{-12} Ф.

Заносить емкость и тангенс угла диэлектрических потерь в таб. 3.1. Сменить образец диэлектрика, подключив измеритель RLC ко

второму диэлектрику HF модуля «Обратный пьезоэффект» (аналогично рис. 3.1), и повторить измерение.

7. Рассчитать диэлектрическую проницаемость ϵ образцов, используя формулы (1.1) – (1.2) и данные табл. 3.1 (для данных диэлектриков $S = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $d = 170 \cdot 10^{-6} \text{ м}$).

Расчёты и исходные данные заносить в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

№ п.п.	$\text{tg } \delta$	$C_x, \text{ мкФ}$	C_0	ϵ
1-ый образец				
2-ой образец				

8. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

3.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.
2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.
3. Результаты измерений.
4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).
5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление их расхождений с точностью измерений.
6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:
 - а) основные численные результаты работы;
 - б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

3.8. Контрольные вопросы

1. Приведите определение активных диэлектриков? Области их применения
2. Какая электрическая упорядоченность свойственна сегнетоэлектрикам?
3. Приведите определение сегнетоэлектрической точки Кюри?
4. Назовите главное отличие сегнетоэлектриков от других активных диэлектриков
5. Приведите определение пьезоэлектрического эффекта? Какие применения пьезоэлектриков вам известны?

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ ПРЯМОГО И ОБРАТНОГО ПЬЕЗОЭФФЕКТА

4.1. Цель работы

Определить заряд, выделяемый при прямом пьезоэффекте. Изучить явления обратного пьезоэффекта

4.2. Задачи работы

1. Вычислить пьезомодуль пьезоэлектрика при прямом пьезоэффекте.
2. Построить АЧХ выходного напряжения пьезоэлектрика при обратном пьезоэффекте и определить резонансную частоту.

4.3. Краткие теоретические сведения

К пьезоэлектрикам относят диэлектрики, которые обладают сильно выраженным пьезоэлектрическим эффектом.

Прямым пьезоэлектрическим эффектом называют явление поляризации диэлектрика под действием механических напряжений.

Это явление было открыто братьями Кюри в 1880 г. Возникающий на каждой из поверхностей диэлектрика электрический заряд изменяется по линейному закону в зависимости от механических усилий (рис. 4.1).

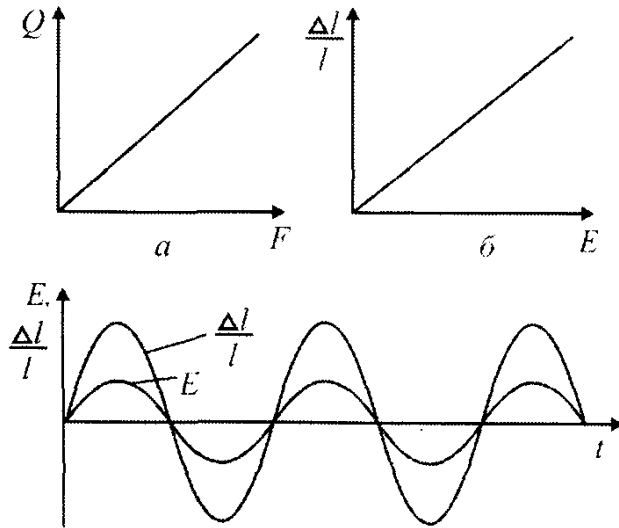


Рис. 4.1. Закономерности при пьезоэлектрическом эффекте в диэлектриках

$$Q = \partial F \quad (4.1)$$

$$\frac{Q}{S} = \frac{\partial F}{S} = q_s = P = \partial \sigma,$$

где Q – заряд; ∂ – пьезомодуль; F – сила, S – площадь; q_s – заряд, который приходится на единицу площади; P – поляризованность; σ – механическое напряжение в сечении диэлектрика.

Таким образом, пьезомодуль ∂ численно равен заряду, возникающему на единице поверхности пьезоэлектрика при приложении к нему единицы давления (рис. 4.2).

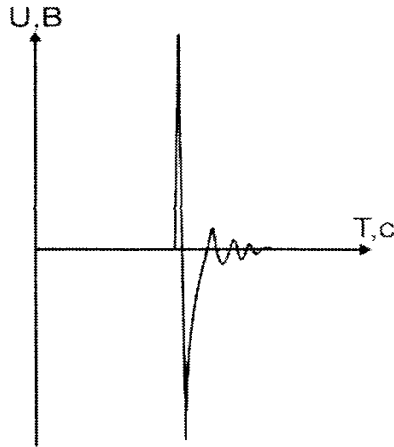


Рис. 4.2. Осциллограмма напряжения, возникающего на обкладках пьезоэлемента при кратковременном приложении силы F .

Значение пьезомодуля используемых в практике пьезоэлектриков составляет около 10 Кл/Н.

Пьезоэлектрический эффект обратим. При обратном пьезоэлектрическом эффекте происходит изменение размеров диэлектрика $\Delta l/l$ в зависимости от напряженности электрического поля E по линейному закону (рис. 4.1, б)

$$\frac{\Delta l}{l} = \delta = \partial E, \quad (4.2)$$

где δ — относительная деформация.

В термодинамике доказывается, что пьезомодули ∂ прямого и обратного пьезоэффектов для одного и того же материала равны между собой.

Деформация пьезоэлектрика зависит от направления электрического поля и меняет знак при изменении направления последнего. На рис. 4.1 показано, что при приложении к пьезоэлектрику синусоидального электрического поля у него возникают синусоидальные деформации той же частоты. Различают также продольный и поперечный пьезоэлектрические эффекты. Под первым понимают такой эффект, когда возникновение зарядов на противоположных гранях пластинки определяют в том же

направлении, в котором были приложены механические усилия, а при обратном пьезоэлектрическом эффекте деформацию измеряют в направлении приложенного электрического поля. При поперечном пьезоэлектрическом эффекте возникающие заряды или деформации измеряют в направлении, перпендикулярном направлению механических усилий или электрического поля соответственно.

Следует иметь в виду, что уравнения (4.1) и (4.2) носят лишь качественный характер. Реальное описание пьезоэлектрического эффекта оказывается намного сложнее. Это обусловлено тем, что механическое напряжение является тензорной величиной, которая содержит в общем случае шесть независимых компонентов. Принципиальное отличие тензора напряжений от векторных характеристик состоит в том, что на противоположных гранях любого элементарного объема компоненты тензора имеют противоположное направление, тогда как составляющие (проекции) любого вектора во всех точках элементарного объема направлены одинаково. Пьезомодуль, устанавливающий связь между вектором поляризации и механическим напряжением, по сравнению с последним является тензором более высокого (третьего) ранга. Он имеет 18 независимых компонентов.

4.4. Используемое оборудование

Модуль «Измеритель RLC », « USB - осциллограф», модули «Прямой и обратный пьезоэффект. Наборное поле», «Функциональный генератор», соединительные проводники.

4.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Определить заряд, выделяемый при прямом пьезоэффекте.
2. Вычислить пьезомодуль пьезоэлектрика при прямом пьезоэффекте.
3. Построить АЧХ выходного напряжения пьезоэлектрика при обратном пьезоэффекте.
4. По полученному графику определить резонансную частоту. На слух проверить соответствует ли частота резонанса максимальной громкости звучания пьезоизлучателя.

4.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.

2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.

3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);

4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;

4.6.1. Опыт 1: Изучения прямого пьезоэффекта и расчёт пьезомодуля пьезоэлектрика

1. Согласно (рис. 4.3, б) выполнить электрические соединения модулей для изучения прямого пьезоэффекта. Монтаж схемы производить при отключенном питании. Элементы $VD1$ и $C1$ (рис. 4.3, б) установлены в схеме «Прямой пьезоэффект».

Для сборки схемы эксперимента воспользоваться модулем «Прямой и обратный пьезоэффект. Наборное поле». После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО «Модуля питания».

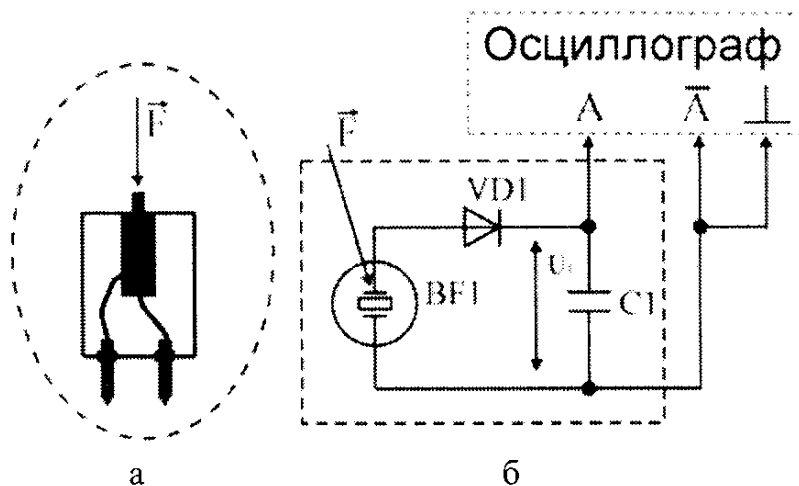


Рис. 4.3. Схема электрическая пикового детектора

2. Запустить программу «DiSco». Выбрать режим работы осциллографа «Самописец». Установить развёртку на 10 мкс, установить развертку канала «А» на 15 В. Включить сбор данных кнопкой «Запуск». Произвести нажатие кнопки (воздействие силы F на рис. 4.3, а), расположенной на схеме «Прямой пьезоэффект».

3. По полученной осциллограмме (рис. 4.4) определить значение пикового напряжения $U_{\text{пик}}$ заносить в табл. 4.1

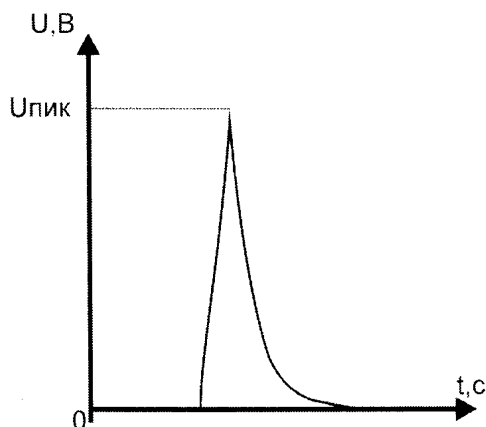


Рисунок 2.14

Рис. 4.4

4. Повторить измерения по пунктам 3 несколько раз С ПЕРИОДИЧНОСТЬЮ НЕ МЕНЕЕ 3 с. Результаты заносить в табл. 4.1.

Таблица 4.1

№ п.п.	U_{max}	Среднее напряжение $\langle U_{\text{max}} \rangle$, В	σ , Кл/Н
1			
2			
.....			

5. Рассчитать пьезомодуль, используя формулы (4.1) и (4.2). Сила воздействия на диэлектрик $F = 21 \text{ Н}$ и ёмкость конденсатора $C = 10 \text{ нФ}$.

Для определения пьезомодуля δ используя формулу (4.1) необходимо измерить выделяемый заряд при воздействии на пьезоэлектрик силы F .

На схеме 4.3, б весь заряд, выделенный пьезоэлектриком, переносится в ёмкость конденсатора. Измерив значение пикового напряжения $U_{\text{пик}}$ по формуле (4.3), определим значение заряда Q .

$$Q = CU. \quad (4.3)$$

Сравнить значение рассчитанного пьезомодуля δ со справочным.

6. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему.

4.6.2. Опыт 2: изучения обратного пьезоэффекта и определение резонансной частоты пьезорезонатора

1. Согласно рис. 4.5 выполнить электрические соединения модулей для изучения обратного пьезоэффекта. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**

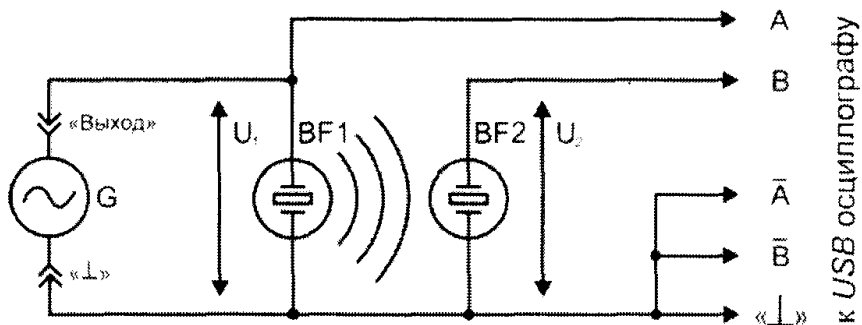


Рисунок 2.15- Схема электрических соединений типового комплекта для изучения обратного пьезоэффекта.

Запустить программу «DiSco», установить усиление 12 В/э, развертку 10 мкс, синхронизировать по каналу «А».

2. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО «Модуля

питания». Включить мультиметры и модуль «Функциональный генератор».

Установить следующий режим работы модуля «Функциональный генератор»:

– тип сигнала - синусоидальный «~»;

– частота сигнала - 50 Гц;

Установить амплитуду входного сигнала 8 В.

3. Порядок снятия АЧХ и определение резонансной частоты:

– увеличивая частоту входного сигнала кнопками увеличения частоты на модуле «Функциональный генератор», контролировать напряжение U_1 и поддерживать его на постоянном уровне, при помощи кнопок увеличения/уменьшения амплитуды на модуле «Функциональный генератор»;

Последовательно увеличивая частоту сигнала до 2 кГц, измерять амплитуду напряжения U_2 на пьезоэлектрике BF2, значения заносить в табл. 4.2.

Таблица 4.2

№ п.п.	f , Гц	U_2 , В
1		
2		
...		

4. По экспериментальным данным построить АЧХ в логарифмическом масштабе. По графику определить резонансную частоту (частота соответствующая максимальной амплитуде).

На слух определить, соответствует ли частота резонанса максимальной громкости звучания пьезоизлучателя.

5. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

4.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.

2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.

3. Результаты измерений.

4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).

5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:

- сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
- сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
- сопоставление их расхождений с точностью измерений.

6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:

- а) основные численные результаты работы;
- б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

4.8. Контрольные вопросы

1. Приведите определение прямого и обратного пьезоэффекта? В каких диэлектриках наблюдаются эти явления?

2. От каких факторов зависят пьезоэлектрические свойства сегнетоэлектрической керамики?

Лабораторная работа № 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

5.1. Цель работы

Закрепить и расширить знания студентов по теории пробоя газообразных диэлектриков.

5.2. Задачи работы

1. Определить электрическую прочность воздуха.
2. Сравнить полученные результаты со справочными данными.

5.3. Краткие теоретические сведения

Пробой - потеря электрической прочности под действием напряжённости электрического поля - может иметь место как в образцах различных диэлектриков и систем изоляции, так и в электроизоляционных системах любого электротехнического устройства - от мощных генераторов и высоковольтных трансфор-

маторов до любого бытового прибора. Сочетание в системах изоляции материалов, разных по электрической прочности, может приводить к серьёзным осложнениям в эксплуатации самых разнообразных электротехнических устройств, особенно высокого напряжения, где изоляция работает в сильных электрических полях и может возникнуть её пробой.

Причины пробоя бывают различными, поэтому не существует единой универсальной теории пробоя. В любой изоляции пробой приводит к образованию в ней канала повышенной проводимости, достаточно высокой, чтобы произошло короткое замыкание в данном электротехническом устройстве, создающее аварийную ситуацию, по существу выводящую это устройство из строя. Однако в этом отношении пробой может проявлять себя в разных системах изоляции по-разному. В твёрдой изоляции, как правило, канал пробоя сохраняет высокую проводимость после выключения, приведшего к пробую напряжения, явление протекает необратимо. В жидких и газообразных диэлектриках вследствие высокой подвижности их частиц электрическое сопротивление канала пробоя восстанавливается вызвавшего его напряжения практически мгновенно.

Пробивное напряжение обозначается $U_{пр}$ и измеряется чаще всего в киловольтах. Электрическая прочность определяется пробивным напряжением отнесенным к толщине диэлектрика в месте пробоя:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \quad (5.1)$$

где h – толщина диэлектрика.

Удобные для практических целей численные значения электрической прочности диэлектриков получаются, если пробивное напряжение выражать в киловольтах, а толщину диэлектрика – в миллиметрах. Тогда электрическая прочность будет в киловольтах на миллиметр. Для сохранения численных значений и перехода к единицам системы СИ используют единицу МВ/м:

$$1 \text{ МВ/м} = 1 \text{ кВ/мм} = 10^6 \text{ В/м}.$$

Пробой газа обуславливается явлением ударной и фотонной ионизации. Пробой жидких диэлектриков происходит в результате ионизационных и тепловых процессов. Одним из главных факторов, способствующих пробую жидкостей, является наличие в них посторонних примесей. Пробой твердых тел может вызываться

как электрическим, так и тепловым процессами, возникающими под действием поля.

Тепловой пробой является следствием уменьшения активного сопротивления диэлектрика под влиянием нагрева в электрическом поле, что приводит к росту активного тока и дальнейшему увеличению нагрева диэлектрика вплоть до его термического разрушения.

При длительном действии напряжения пробой может быть вызван электрохимическими процессами, происходящими в диэлектрике под воздействием электрического поля.

Из изложенного следует, что пробой газов – явление чисто электрическое. Поэтому все численные результаты экспериментов по пробоев газов относятся к максимальным (амплитудным) значениям.

При повышении напряжения между электродами внезапно возникает искра, которая затем переходит в дугу, если источник напряжения имеет достаточную мощность.

Зависимость электрической прочности воздуха (амплитудные значения) от расстояния между электродами показана на рис. 5.1

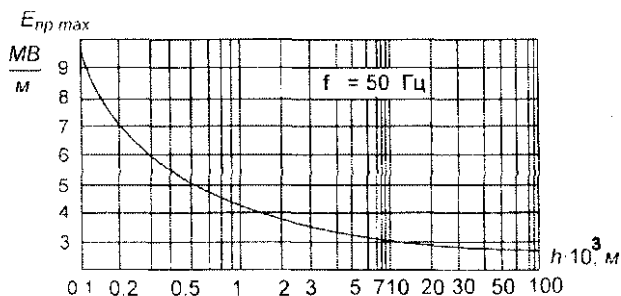


Рис. 5.1. Зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в случае однородного поля

5.4. Используемое оборудование

Минимодуль «Пробой газообразного диэлектрика» с различными воздушными промежутками; Прибор «МЕГАОММЕТР Е6-24»; Защищенные соединительные проводники.

5.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Подавая на исследуемый образец напряжение от 500 В до 2500 В визуально наблюдать возникновение искры между электродами при пробое.
2. По полученному напряжению пробоя определить электрическую прочность воздуха.
3. Проверить результаты со справочными данными.

5.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.
2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.
3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);
4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;
5. Согласно рисунку 5.2 выполнить электрические соединения модулей для изучения пробоя в твёрдых диэлектриках. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** Исследуемый образец выдается преподавателем (*в работе исследуются 2 образца с фиксированным расстоянием между электродами*). Образцы подключаются к соответствующим гнездам на мегаомметре защищёнными проводниками. **При использовании мегаомметра необходимо соблюдать особые меры предосторожности.** На выводах прибора присутствует высокое напряжение до 2500В. Во избежание поражения электрическим током во время работы прибор не следует держать в руках. Использовать мегаомметр разрешается только лицам имеющим допуск к работе с аппаратурой, функционирующей под напряжением выше 1000В (лаборант, техник), в противном случае категорически запрещается выполнять данную лабораторную работу.

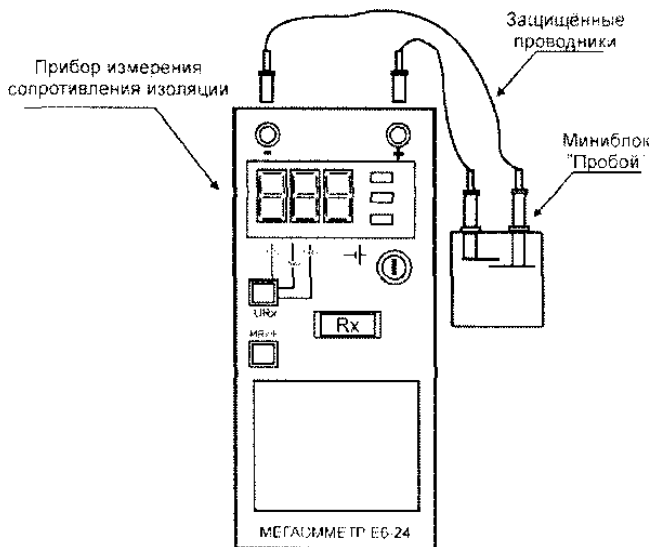


Рис. 5.2. Схема соединений прибора измерения сопротивления изоляции и минимодуля «Пробой газообразного диэлектрика»

6. Включить мегаомметр. Установить испытательное напряжение 500 В нажатием кнопки «URr». Для осуществления измерения сопротивления и электрической прочности воздуха необходимо нажать и удерживать кнопку «Lx» пока не установится значение сопротивления. Трёхразрядный семисегментный индикатор отображает значение сопротивления испытуемого образца, а расположенные правее светодиодные индикаторы – единицу измерения «G» – ГОм (10^9 Ом), «M» – МОм (10^6 Ом).

7. Символ «П» на индикаторе означает, что при данном испытательном напряжении пробой диэлектрика не произошел. Увеличить испытательное напряжение до 1000В и повторить измерения по п.3. Если пробой не произошел увеличить напряжение до 2500В. Заносить в табл. 5.1 значение напряжения, при котором произошел пробой.

Визуально наблюдать возникновение искры между электродами при пробое.

Результат заносить в табл. 5.1

Таблица 5.1

№ п.п.	U , В	h , мм	$E_{пр}$, МВ/м	$\langle E_{пр} \rangle$, МВ/м
1 -ый образец				
...				

8. Повторить измерения по пунктам 6-7 для разных выданных образцов. Результаты заносить в табл. 5.1. Рассчитать электрическую прочность $E_{пр}$ для всех исследованных образцов по формуле (5.1). Толщина воздушного слоя h указана на минимодуле.

9. Рассчитать среднее значение $\langle E_{пр} \rangle$ и сравнить его со справочным.

10. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

5.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.
2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.
3. Результаты измерений.
4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).
5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление их расхождений с точностью измерений.
6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:
 - а) основные численные результаты работы;
 - б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

5.8. Контрольные вопросы

1. Опишите механизмы и назовите условия пробоя диэлектриков?
2. Почему значение напряжения пробоя не характеризует электрическую прочность диэлектрика.

3. У каких диэлектриков наибольшая электрическая прочность, у каких наименьшая (твердых, жидких или газообразных)? Объяснить, чем вызвано это явление.

4. Как влияет давление газа на его электрическую прочность?

5. Как внешне проявляется процесс пробоя в газообразных диэлектриках?

ПРОВОДНИКИ

К проводникам электрического тока относятся как твердые тела, так и жидкости, а при соответствующих условиях и газы. Важнейшими практически применяемыми в электротехнике твердыми проводниковыми материалами являются металлы и их сплавы.

Из металлических проводниковых материалов могут быть выделены *металлы высокой проводимости*, имеющие удельное сопротивление ρ при нормальной температуре не более 0,05 мкОм м, и *сплавы высокого сопротивления*, имеющие ρ при нормальной температуре не менее 0,3 мкОм м. Металлы высокой проводимости используются для проводов, токопроводящих жил кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов и т. п. Металлы и сплавы высокого сопротивления применяются для изготовления резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т. п.

К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Для большинства металлов температура плавления высока, только ртуть, имеющая температуру плавления около минус 39 °С, может быть использована в качестве жидкого металлического проводника при нормальной температуре. Другие металлы являются жидкими проводниками при повышенных температурах.

Механизм прохождения тока в металлах – как в твердом, так и в жидком состоянии – обусловлен движением (дрейфом) свободных электронов под воздействием электрического поля; поэтому металлы называют *проводниками с электронной электропроводностью* или *проводниками первого рода*. *Проводниками второго рода*, или *электролитами*, являются растворы (в частности, водные) кислот, щелочей и солей. Прохождение тока через эти вещества связано с переносом вместе с электрическими зарядами ионов в соответствии с законами Фарадея, вследствие чего состав электролита постепенно изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза. Ионные кристаллы в расплавленном состоянии также являются

проводниками второго рода. Примером могут служить соляные закалочные ванны с электронагревом.

Общие представления о зонной теории электропроводности твердых тел были даны в ведении.

Классическая электронная теория металлов представляет твердый проводник в виде системы, состоящей из узлов кристаллической ионной решетки, внутри которой находится электронный газ из коллективизированных (свободных) электронов. В свободное состояние от каждого атома металла переходит от одного до двух электронов. К электронному газу применялись представления и законы статистики обычных газов. При изучении хаотического (теплого) и направленного под действием силы электрического поля движения электронов был выведен закон Ома. При столкновениях электронов с узлами кристаллической решетки энергия, накопленная при ускорении электронов в электрическом поле, передается металлической основе проводника, вследствие чего он нагревается. Рассмотрение этого вопроса привело к выводу закона Джоуля–Ленца. Таким образом, электронная теория металлов дала возможность аналитически описать и объяснить найденные ранее экспериментальным путем основные законы электропроводности и потерь электрической энергии в металлах.

Выявленные противоречия некоторых выводов теории с опытными данными удалось преодолеть, рассматривая некоторые положения с позиций квантовой механики. В квантовой механике принимается, что электронный газ в металлах при обычных температурах находится в состоянии вырождения. В этом состоянии энергия электронного газа почти не зависит от температуры, т. е. тепловое движение почти не изменяет энергию электронов. Представляя металл как систему, в которой положительные ионы скрепляются посредством свободно движущихся электронов, легко понять природу всех основных свойств металлов: пластичности, ковкости, хорошей теплопроводности и высокой электропроводности.

К важнейшим параметрам, характеризующим свойства проводниковых материалов, относятся: 1) удельная проводимость γ или обратная ей величина – удельное сопротивление ρ , 2) температурный коэффициент удельного сопротивления TK_ρ или α_ρ , 3) коэффициент теплопроводности γ_τ , 4) контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС), 5) работа выхода электронов из металла, 6) предел прочности при растяжении σ_p и относительное удлинение перед разрывом $\Delta l/l$.

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

6.1. Цель работы

6.2. Задачи работы

Определить удельные сопротивления исследуемых образцов и сравнить со справочными данными.

6.3. Краткие теоретические сведения

С позиции классической электронной теории металлы рассматриваются как система, состоящая из положительных ионов, образующих узлы кристаллической решетки, и свободных (коллективизированных) электронов – *электронов проводимости*, заполняющих остальное пространство решетки.

Электрический ток в металлических проводниках обусловлен упорядоченным движением – дрейфом электронов проводимости под действием внешнего электрического поля.

Количественно это явление описывается законом Ома. Согласно закону Ома в дифференциальной форме плотность тока пропорциональна напряженности поля:

$$j = \gamma E,$$

где j — плотность электрического тока, A/m^2 ; E — напряженность поля, V/m ; γ — коэффициент пропорциональности, представляющий удельную электропроводность, Cm/m .

На основании классической электронной теории удельная электропроводность у металлов определяется выражением:

$$\gamma = ena = \frac{e^2 n \lambda}{2m v}, \quad (6.1)$$

где e — заряд электрона, $Kл = A \cdot c$; n — концентрация электронов проводимости, m^{-3} ; a — подвижность электронов, обусловленная действием электрического поля, $m^2/(B \cdot c)$, ($a = v_{ср.др}/E = eE\tau/E2m = e\lambda/2mv$); λ — средняя длина свободного пробега электрона между двумя столк-

новениями с решеткой в ускоряющем поле напряженностью E , m ; m – масса электрона, кг; v – средняя скорость теплового движения электронов в металле, м/с; τ – время между двумя столкновениями, с; $v_{\text{ср.др}}$ – среднее значение дрейфовой скорости, м/с.

У всех металлов величину средней скорости v теплового движения можно считать постоянной. Концентрация n электронов проводимости, как и скорость v , мало зависит от природы металла. Поэтому удельная электропроводность γ металлических проводников зависит в основном от средней длины свободного пробега электрона λ , величина которой существенно влияет на подвижность a электронов: чем меньше λ , тем меньше a . Величина λ , в свою очередь зависит от степени деформации кристаллической решетки металлического проводника. У идеального металлического проводника при температуре, равной 0 К, электроны проводимости не будут сталкиваться с узлами кристаллической решетки, поэтому длина свободного пробега электрона λ и, следовательно, электропроводность γ должны быть бесконечно большими, а удельное сопротивление ρ равно нулю.

Зависимость удельной проводимости ρ от концентрации n свободных зарядов легко получить, используя закон Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R} \quad (6.2)$$

где I – сила тока протекающего по участку цепи; R – сопротивление участка цепи; U – напряжение на концах участка цепи.

Сопротивление проводника простейшим способом определяют, используя закон Ома для участка электрической цепи. Для этого нужно измерить вольтметром разность потенциалов U на концах проводника и амперметром силу тока I в проводнике и поделить одно на другое. Этот метод измерений (по току и напряжению) называют техническим. Однако при таком способе измерения вносятся систематические ошибки, величина которых зависит от сопротивлений измерительных приборов и величины измеряемых сопротивлений.

Действительно, при включении приборов по схеме на рис. 6.1 показания вольтметра соответствуют напряжению на сопротивлении ($U_V = U$), но показания амперметра соответствуют не току через сопротивление, а сумме токов через проводник и вольтметр:

$$I_A = I_V + I \quad (6.3)$$

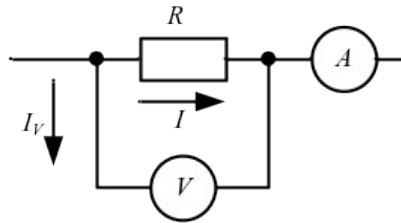


Рис. 6.1. Схема электрическая принципиальная измерения сопротивления вольтметром и амперметром

При включении по схеме на рис. 6.2 показания амперметра соответствуют току через сопротивление ($I_A = I$), но вольтметр показывает не напряжение на сопротивлении, а суммарное напряжение на сопротивлении и амперметре:

$$U_V = IR + IR_A \quad (6.4)$$

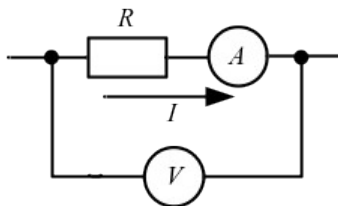


Рис. 6.2. Схема электрическая принципиальная измерения сопротивления вольтметром и амперметром

Из выражений (6.3) и (6.4) следует, что для уменьшения погрешностей, вносимых при подключении приборов, сопротивление амперметра должно быть малым, а сопротивление вольтметра – большим. Данный метод лежит в основе работы омметров. Прибор прикладывает известную разность потенциалов к измеряемому сопротивлению и измеряет протекающий ток.

Мостовые схемы измерения сопротивлений позволяют избавиться от ошибок, вносимых электроизмерительными приборами, так как здесь эти приборы используются не для измерения силы тока и напряжения, идущих в дальнейшие расчеты, а только в качестве чувствительных индикаторов, работающих либо в режиме постоянного показания, либо, чаще, в режиме отсутствия тока (нуль-метод).

Схема моста Уитстона составлена из сопротивлений R_x, R_1, R_2, R_3 , образующих плечи моста (рис. 6.3). В одну из диагоналей мостовой

схемы CD включается чувствительный измеритель тока – миллиамперметр. К другой диагонали AB подключается источник питания с сопротивлением R_d . В плечи моста AC и DB включаются известные сопротивления R_2 и R_3 . В плечо AD включается измеряемое сопротивление R_x , а в плечо CB – магазин сопротивлений. Магазин сопротивлений представляет собой набор достаточно точных переменных сопротивлений. Процесс измерения по этой схеме заключается в подборе такого сопротивления магазина, при котором миллиамперметр в диагонали CD показывает отсутствие тока.

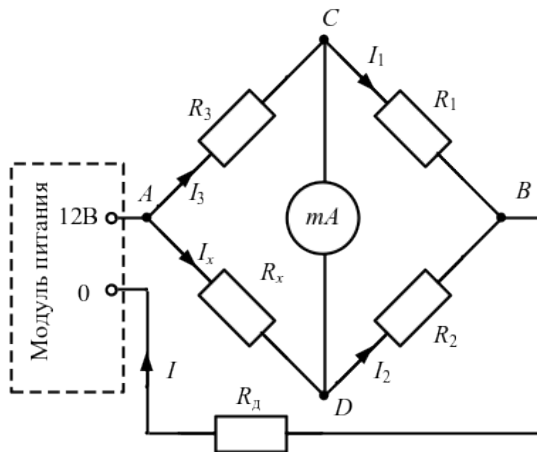


Рис. 6.3. Схема моста Уитстона

При произвольном соотношении сопротивлений через все плечи моста и через гальванометр идут токи. Изменяя сопротивление магазина, добиваются такого состояния, при котором потенциалы точек C и D будут одинаковыми, и ток через миллиамперметр станет равным нулю. Это состояние схемы называется равновесием моста.

В состоянии равновесия разность потенциалов между точками A и C равна разности потенциалов между точками A и D , а $\varphi_C - \varphi_B = \varphi_D - \varphi_B$. В соответствии с законом Ома для пассивного участка электрической цепи разность потенциалов на концах участка равна падению напряжения на участке – произведению силы тока на сопротивление этого участка цепи: $\varphi_1 - \varphi_2 = IR$. Приравняв падения напряжения на сопротивлениях R_x и R_3 , R_1 и R_2 , получим следующие выражения:

$$I_3 R_3 = I_x R_x \quad (6.5)$$

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad (6.6)$$

Эти равенства справедливы только тогда, когда мост находится в состоянии равновесия. Так как ток в диагонали CD при этом равен нулю, то ток I_1 протекающий по сопротивлению R_1 , равен току I_3 , протекающему по сопротивлению R_3 , а ток I_x , протекающий по сопротивлению R_x , равен току I_2 , протекающему по магазину сопротивлений R_2 . Разделив уравнение (6.5) на уравнение (6.6), получим условие равновесия моста Уитстона:

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_x}{R_2} \quad (6.7)$$

Из него следует, что если установить ток в гальванометре равным нулю, то неизвестное сопротивление R_x определяется по остальным трем сопротивлениям:

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_1} \quad (6.8)$$

Активное сопротивление зависит от формы и размеров проводника:

$$R = \int_0^l \rho \frac{dl}{S} \quad (6.9)$$

Для однородного проводника с поперечным сечением S и длиной l :

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (6.10)$$

6.4. Используемое оборудование

Модуль «Измеритель RLC », «Модуль питания», образцы исследуемых проводников, соединительные проводники.

6.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Измерить сопротивления проводников R и вычислить удельное сопротивление материалов ρ .
2. Сравнить полученные результаты со справочными.

6.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.

2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.

3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);

4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;

5. Подать питание на комплект включением автоматического выключателя и УЗО «Модуля питания и измерений». Установить соединительные проводники в гнезда RLC -метра, как указано на рисунке 1.9, выбрать режим измерения сопротивления, нажимая кнопку $L/C/R$; диапазон измерения выбирается автоматически при измерении. Измерить сопротивление проволоки. Измерить сопротивление проволоки на участке различной длины (от 0,1 м до 0,5 м) с шагом 0,05–0,15 м (рис. 6.4). Так как проволока не имеет собственной изоляции, необходимо расположить её таким образом, чтобы она не соприкасалась сама с собой и другими металлическими предметами. Измеренное сопротивление и длину участка заносить в табл. 6.1.

Таблица 6.1

$l_1, \text{ м}$								
$R_1, \text{ Ом}$								
$l_2, \text{ м}$								
$R_2, \text{ Ом}$								
...								
$l_n, \text{ м}$								
$R_n, \text{ Ом}$								

В табл. l_i – длина измеренного участка i -ой проволоки, R_i – сопротивление участка длиной l_i i -ой проволоки/

6. Повторить измерения в соответствии с пунктом 2 с другой проволокой.

7. Построить график зависимости $R(l)$. При построении графика учесть, что прямая не будет проходить через точку (0,0) так как RLC -метр и его щупы имеют собственное сопротивление. По графику

определить коэффициент α , как тангенс угла наклона графика. Значение коэффициента заносить в табл. 6.2.

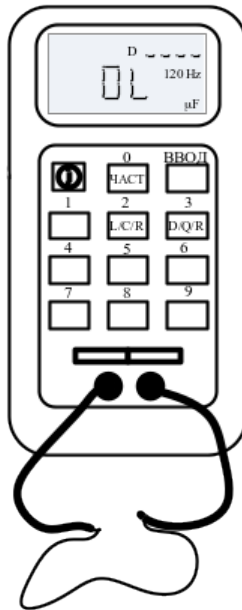


Рис. 6.4. Измерение сопротивления проволоки RLC -метром

6. Повторить измерения в соответствии с пунктом 2 с другой проволокой.

7. Построить график зависимости $R(l)$. При построении графика учесть, что прямая не будет проходить через точку $(0,0)$ так как RLC -метр и его щупы имеют собственное сопротивление. По графику определить коэффициент α , как тангенс угла наклона графика. Значение коэффициента заносить в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Исследуемая проволока	α	d	S	ρ
1				
2				
...				
n				

Из формулы (6.10) видно, что

$$\alpha = \frac{\rho}{S},$$

таким образом, найдем удельное сопротивление

$$\rho = \alpha S.$$

Площадь сечения S рассчитать, как площадь круга:

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

где d – диаметр исследуемой проволоки (указан на ярлыке).

Заполнить табл. 6.2, значения рассчитывать по вышеприведенным формулам.

8. Сравнить полученные значение ρ с табличными значениями, указать источник справочной информации. По полученным результатам сделайте вывод о материале, из которого изготовлена каждая исследованная проволока.

9. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

6.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.
2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.
3. Результаты измерений.
4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).
5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление их расхождений с точностью измерений.
6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:
 - а) основные численные результаты работы;
 - б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

6.8. Контрольные вопросы

1. Опишите механизм проводимости электрического тока в проводнике.
2. Как влияют геометрические размеры проводника на его сопротивление?
3. Приведите формулу для расчета сопротивления проводника.
4. Назовите методы измерений сопротивления проводника.
5. Какие методы измерения сопротивления из рассмотренных в теоретической части являются более точными?
6. Какой метод измерения сопротивления лежит в основе работы цифрового омметра?

Лабораторная работа № 7

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

7.1. Цель работы

Изучить зависимость сопротивления проводника от температуры. Научиться определять температурный коэффициент сопротивления.

7.2. Задачи работы

1. Для исследуемых образцов определить температурные коэффициенты сопротивления TK_R .

7.3. Краткие теоретические сведения

Концентрация n электронов проводимости в металлических проводниках от температуры не зависит, однако от температуры зависит их подвижность a . С увеличением температуры возрастают тепловые колебания узлов кристаллической решетки и создаются большие препятствия на пути дрейфа электронов, что приводит к снижению их подвижности a ; в результате удельная электропроводность γ уменьшается (см. формулу (6.1)), а обратная ей величина удельное сопротивление $\rho = 1 / \gamma$ растет.

Величина, на которую изменится удельное сопротивление проводника при изменении его температуры на 1 К, называется *темпе-*

ратурным коэффициентом удельного сопротивления TK_ρ (α_ρ). Дифференциальное выражение TK_ρ , K^{-1} , имеет вид:

$$TK_\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}.$$

На практике пользуются средним значением $TK_{\rho, \text{ср}}$, K^{-1} , для определенного интервала температур:

$$TK_{\rho, \text{ср}} = \alpha_{\rho, \text{ср}} = \frac{1}{\rho_1} \frac{\rho_2 - \rho_1}{T_2 - T_1},$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления проводника при температурах T_1 и T_2 соответственно, при этом $T_2 > T_1$.

Таким образом, сопротивление проводника R при температуре t находится по формуле

$$R = R_0 (1 + \alpha_{\rho, \text{ср}} (t - t_0)), \quad (7.1)$$

где R_0 – сопротивление проводника при температуре $t_0 = 20^\circ \text{C}$.

Из (7.1.) следует, что зависимость $R(t)$ имеет вид:

$$R = R_0 + \alpha_1 t$$

где $\alpha_1 = R_0 \alpha_{\rho, \text{ср}}$ – угловой коэффициент графика.

Из графика зависимости $R(t)$ (рис. 7.1) определяются коэффициенты α_1 и R_0 .

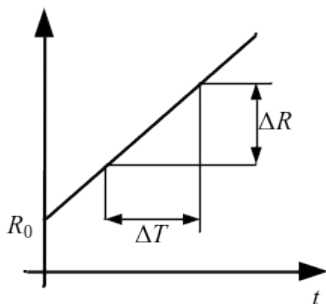


Рис. 7.1. График зависимости $R(t)$

Коэффициент α_1 находится как тангенс угла наклона графика:

$$a_1 = \frac{\Delta R}{\Delta T}.$$

Коэффициент α находится из выражения:

$$\alpha_{p,cp} = \frac{\alpha_1}{R_0}.$$

где R_0 - значение R при $t = 20$, определяется из графика.

В данной лабораторной работе исследуется ТКС проводников (сплав меди и сплав вольфрама), проволочного и угольного резисторов.

7.4. Используемое оборудование

«Модуль питания», модуль «Магнитомягкие материалы и тепловой коэффициент сопротивления / емкости», модуль «Мультиметры», «Измеритель RLC », минимодули «ТКС проводников» и «ТКС резисторов», соединительные проводники.

7.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Для исследуемых образцов построить графики зависимости сопротивления проводников от температуры.
2. Определить температурные коэффициенты сопротивления TK_R .
3. Сравнить результаты со справочными данными.

7.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.
2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.
3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);
4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;
5. Согласно рис. 7.2 выполнить электрические соединения модулей. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**

В качестве источника питания для нагрева использовать нерегулируемый выход «+15В» модуля питания. Установить мини модуль «ТКС проводников» в соответствующие гнезда модуля «Магнитомягкие материалы и тепловой коэффициент сопротивления / емкости» (мини модуль выделен пунктирной линией), располагать его так, как указано на рис. 7.2.

В качестве омметра $P1$ использовать RLC -метр, выбрать режим измерения сопротивления, нажимая кнопку $L/C/R$; диапазон измерения выбирается автоматически при измерении.

После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО «Модуля питания».

Включить мультиметр. На мультиметре установить режим измерения температуры «°C» на индикаторе будет отображена комнатная температура. Подключить термопару с вилкой к входу «TEMP» мультиметра и, в случае если показания температуры на мультиметре ниже комнатных, изменить полярность подключения выводов термопары.

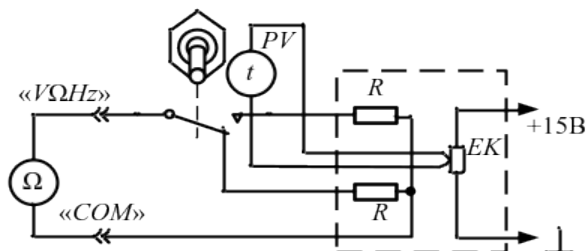


Рис. 7.2. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения ТКС проводников

6. Измерить сопротивление проводников при комнатной температуре. Полученные значения заносить в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Температура	Сопротивление проводника R , Ом
-------------	-----------------------------------

№	$T, ^\circ\text{C}$	Нагревание				Охлаждение				Среднее сопротивление			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	20												
	25												
	...												

7. Контролировать показания термометра и омметра, и через каждые 5-10 °С одновременно заносить значения сопротивлений проводников и температуры в табл. 7.1. Для переключения между проводниками использовать тумблер SA1. Верхнее положение тумблера соответствует угольному резистору минимодуля «Резисторы» и сплаву вольфрама минимодуля «ТКС проводников», нижнее положение тумблера - проволочному резистору и сплаву меди соответственно. Измерения проводить до 100 °С. Если скорость нагрева высока, снизить напряжение регулятором модуля питания, повернув его против часовой стрелки на угол 30°-50°. **НЕ ДОПУСКАЕТСЯ НАГРЕВАТЬ ОБРАЗЦЫ ВЫШЕ 100°С**

8. Вынуть штырь из гнезда «+15В» модуля питания (разрешается выполнять при включенном питании комплекта) и провести измерения в тех же температурных точках при охлаждении образцов. Полученные значения заносить в табл. 7.1. Так как охлаждение ниже 40 °С происходит значительно медленнее, допускается не охлаждать ниже 30 – 40 °С (по указанию преподавателя).

9. Заменить минимодуль «ТКС проводников» на «ТКС резисторов» и повторить измерения в соответствии с пунктами 3-5.

10. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

11. По данным табл. 7.1 построить графики зависимостей сопротивлений проводников $\langle R \rangle$ от температуры. За начало координат принять точку 0 °С. Выбранные масштабы должны обеспечить угол наклона графиков не менее 40°.

12. По графикам определить сопротивление проводников при температуре 0 °С значение углового коэффициента α_1 . Сравнить полученное значение ТКС со справочными данными для материала проводников.

13. Сделать вывод о различии ТКС технически чистых металлов и проводников, используемых для изготовления резисторов. Сопоставить полученные результаты с теоретическими положениями.

7.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.
2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.
3. Результаты измерений.
4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).
5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление их расхождений с точностью измерений.
6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:
 - а) основные численные результаты работы;
 - б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

7.8. Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное отличие проводников, и диэлектриков?
2. Проводники с каким ТКС используются для изготовления резисторов?
3. Приведите определение ТКС проводника? Единицы его измерения.
4. Приведите определение положительного и отрицательного ТКС?
5. Описать метод определения температурного коэффициента сопротивления.

Лабораторная работа № 8

КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

8.1. Цель работы

Изучить явления, возникающие при контакте двух проводников, измерить термоэдс.

8.2. Задачи работы

Определить удельную термоэдс исследуемой термопары медь-хромель.

8.3. Краткие теоретические сведения

При соприкосновении двух различных металлов между ними возникает контактная разность потенциалов. Это явление открыл итальянский физик А. Вольта в 1797 г. Согласно квантовой теории, основной причиной появления разности потенциалов на контакте является различная энергия Ферми у сопрягаемых металлов.

Пусть в изолированном состоянии электронный газ в металлах A и B характеризуется энергиями Ферми W_F^A и W_F^B отсчитываемыми от дна зоны проводимости (рис. 8.1, a). Термодинамические работы выхода электронов равны соответственно A_A и A_B . Кинетическая энергия электронов, находящихся на уровне Ферми, в различных металлах различна. Поэтому при контактировании материалов возникает более интенсивный переход электронов из области с большим значением энергии W_F в область, где энергия меньше, т. е. из металла B в металл A . Действительно, электроны стремятся занять состояние с минимальной энергией. Невероятно, чтобы в одном из металлов оставались свободными состояния с низкой энергией, в то время как в другом металле заполнены состояния с более высокой энергией. Фактически переход электронов из металла B в металл A есть переход электронов в данной системе на более низкие энергетические уровни. В результате такого процесса металл B заряжается положительно, а металл A – отрицательно; между ними возникает разность потенциалов, препятствующая дальнейшему переходу носителей заряда. Равновесие наступит тогда, когда работа электрона по преодолению сил возникшего поля станет равной разности энергий электронов, переходящих через контакт (см. рис. 8.1,б):

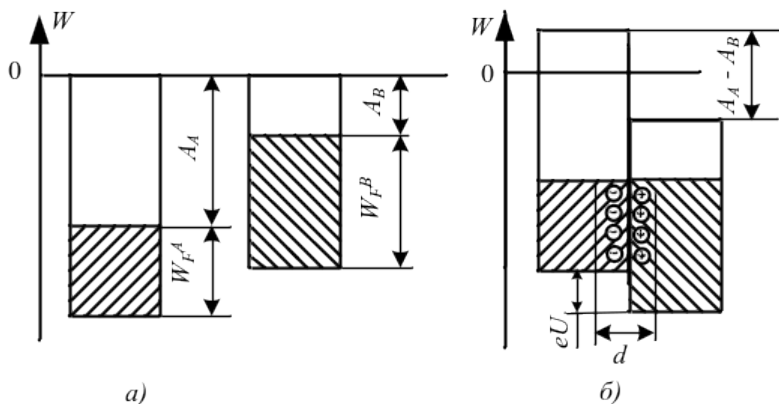


Рис. 8.1. Механизм формирования термо-ЭДС в проводниках:
 а) электронного газа в материалах A и B ; б) энергия контакта материалов.

$$U = W_F^A - W_F^B, \quad (8.1)$$

где e – заряд электрона ($-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Таким образом, внутренняя контактная разность потенциалов определяется как разность энергий Ферми, отсчитываемых от дна зоны проводимости, для изолированных металлов A и B .

Наличие контактного поля обеспечивает равенство потоков электронов из одного металла в другой в состоянии равновесия. Так как скорости хаотического движения электронов весьма велики, равновесие устанавливается очень быстро – за время $\sim 10^{16}$ с. В условиях установившегося равновесия уровень Ферми в обоих металлах должен быть одинаков: энергетические уровни в металле, зарядившемся отрицательно, поднимутся, а в металле, зарядившемся положительно, опустятся. Благодаря заряду областей выравнивание уровней может произойти при переходе небольшого количества электронов. Двойной электрический слой d , существующий в области контакта, очень тонок (порядка периода решетки) и не влияет на прохождение электрического тока через контакт. Так как энергия Ферми в металлах имеет значение порядка нескольких электрон-вольт, то контактная разность потенциалов между двумя металлами может составлять от десятых долей до нескольких вольт.

Термоэлемент, составленный из двух различных проводников, образующих замкнутую цепь, называют термопарой (рис. 8.2). При

различной температуре контактов в замкнутой цепи возникает ток, называемый термоэлектрическим. Если цепь разорвать в произвольном месте, то на концах разомкнутой цепи появится разность потенциалов, называемая термоэлектродвижущей силой. По имени первооткрывателя это явление получило название эффекта Зеебска. Как показывает опыт, в относительно небольшом температурном интервале термоэдс пропорциональна разности температур контактов (спаев):

$$U \approx \alpha_T (T_2 - T_1) \quad (8.2)$$

где α_T – относительная дифференциальная или удельная термоэдс.

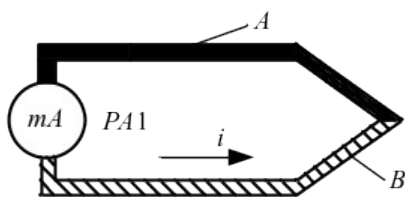


Рис. 8.2. Схематичное изображение термопары

Значение α_T зависит от природы соприкасающихся проводников и температуры. Термоэдс в контуре складывается из трех составляющих. Первая из них обусловлена температурной зависимостью контактной разности потенциалов. В металлах с увеличением температуры уровень Ферми, хотя и слабо, но смещается вниз по энергетической шкале. Поэтому на холодном конце проводника он должен располагаться выше, чем на горячем. Следствием смещения уровня Ферми и является возникновение контактной составляющей термоэдс.

Вторая составляющая термоэдс обусловлена диффузией носителей заряда от горячих спаев к холодным. Средняя энергия электронов в металле, хотя и немного, но все же изменяется с температурой. Электроны, сосредоточенные на горячем конце, обладают несколько большей кинетической энергией и большей скоростью движения по сравнению с носителями холодного конца. Поэтому они в большем числе диффундируют в направлении температурного градиента, чем в обратном. Диффузионный поток, унося отрицательный заряд из горячего конца в холодный, создает между ними разность потенциалов.

Третья составляющая термоэдс возникает в контуре вследствие увлечения электронов квантами тепловой энергии (фононами). Их поток также распространяется к холодному концу. Все составляющие термоэдс определяются небольшой концентрацией электронов, расположенных на энергетических уровнях, близких к уровню Ферми, и отстоящих от него на величину порядка kT . Поэтому удельная термоэдс для металлов оказывается очень небольшой. Квантовая теория дает следующее выражение для удельной термоэдс одновалентных металлов:

$$\alpha_T \approx \pi^2 \frac{k}{e} \frac{kT}{W_F} \quad (8.3)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ – заряд электрона.

При комнатной температуре отношение kT/W_F имеет значение порядка 10^{-3} . Поэтому α_T должна составлять несколько мкВ/К.

Существенно большее значение удельной термоэдс можно получить при использовании металлических сплавов, которые имеют сложную зонную структуру.

Металлические термопары широко используются для точного измерения температуры. В процессе измерений необходимо стабилизировать температуру одного из спаев.

В реальных условиях полностью исключить перепады температуры практически невозможно. Поэтому в электрических цепях могут возникать паразитные термоэдс. Для уменьшения их влияния в цепях электроизмерительных приборов следует подбирать контактирующие материалы с малыми значениями α_T .

8.4. Используемое оборудование

«Модуль питания», модуль «Магнитомягкие материалы и тепловой коэффициент сопротивления / емкости», модуль «Мультиметры», «ТКС проводников», соединительные проводники.

8.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Измерить термоэдс U и разность температур горячего спая t_h и свободных концов t_c .
2. На основании формулы (8.2) вычислить удельную термоэдс исследуемой термопары.

8.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.

2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.

3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);

4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;

5. Согласно рисунку 1.12 выполнить электрические соединения модулей. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**

В качестве нагревателя использовать минимодуль «ТКС проводников» (он оснащен двумя термопарами).

В качестве источника питания для нагрева «15В» использовать нерегулируемый выход модуля питания «15В».

В качестве термометра $P1$ использовать мультиметр в режиме измерения температуры « C^0 ».

В качестве вольтметра $PV1$ использовать мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 200 мВ. Для подключения исследуемой термопары к вольтметру необходимо использовать щупы с зажимами. Подключить «+» термопары к гнезду « $V\Omega Hz$ » мультиметра $P1$, а «-» к гнезду « COM ».

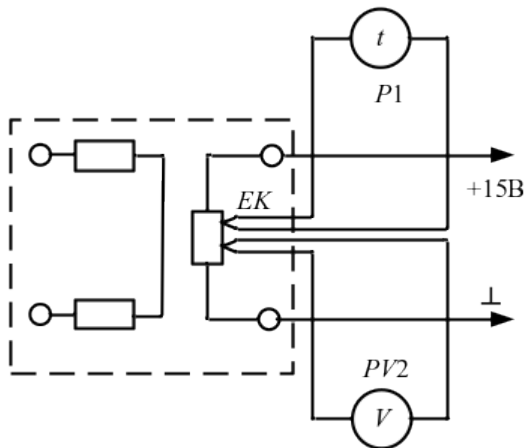


Рис. 8.3. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения термоэдс

После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО «Модуля питания».

Включить мультиметры. Если термопара не соединена с гнездами мультиметра $P1$, на его индикаторе будет отображаться комнатная температура (комнатная температура равна температуре свободных концов t_c). Соединить термопару с гнездом «TEMP» мультиметра $P1$ и, в случае если показания температуры на мультиметре ниже комнатной, изменить полярность подключения выводов термопары (перевернуть вилку). Заносить значение температуры в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Температура свободных концов t_c, C^0				
№п.п.	$t_r, ^0C$	U, B	$t_r - t_c, ^0C$	α_r
1				
2				
....				

6. Измерить температуру рабочего спая t_r мультиметром $P1$ и термоэдс U мультиметром $PV1$. Значения заносить в табл. 8.1.

7. Заносить показания мультиметров в табл. 8.1 через 5 – 10С°.

Не нагревать минимодуль более 100С°.

8. Рассчитать разность температур рабочего спая и свободных концов термопары, для каждого пункта табл. 8.1.

9. Построить график зависимости $U(t_r - t_c)$. По графику определить относительную удельную термоэдс α_r , как тангенс угла наклона графика, и сравнить со справочным значением для данной термопары.

10. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

8.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.

2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.

3. Результаты измерений.

4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).

5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:

– сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;

– сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;

– сопоставление их расхождений с точностью измерений.

6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:

а) основные численные результаты работы;

б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

8.8. Контрольные вопросы

1. В каких условиях возможно появление термоэдс в замкнутой цепи?

2. Назовите основные механизмы возникновения термоэдс.

3. Приведите определение рабочего спая термопары?

4. Каков физический смысл относительной удельной термоэдс?

ПОЛУПРОВОДНИКИ

Большая группа материалов с электронной n и дырочной p проводимостью, удельное сопротивление ρ которых при температуре 20 °С больше, чем у проводников, но меньше, чем у диэлектриков, относится к полупроводникам. С точки зрения зонной теории твердого тела, к полупроводникам относятся те материалы, ширина запрещенной зоны (33) которых имеет величину в пределах от 0,05 до 3 эВ.

Электрофизические характеристики полупроводниковых материалов зависят не только от их природы, но и от интенсивности внешнего энергетического воздействия, природы и концентрации легирующей примеси – примеси, которую специально вводят в полупроводниковый материал для создания определенного типа и величины электропроводности. Полупроводниковый материал, ис-

пользуемый для изготовления приборов, должен иметь очень высокую степень чистоты.

Управляемость удельной электропроводностью полупроводниковых материалов посредством температуры, света, электрического поля, механического напряжения положена в основу принципа действия соответствующих приборов: терморезисторов, фоторезисторов, нелинейных резисторов (вариаторов), тензорезисторов и т.д.

Наличие двух или более взаимно связанных *p-n*-переходов образуют управляемые системы – кристаллические транзисторы и тиристоры. Полупроводниковые системы широко используют для преобразования различных видов энергии в электрическую и наоборот.

Величина и тип электропроводности полупроводников зависят от природы и концентрации примеси, в том числе специально введенной (легирующей).

Концентрация легирующей примеси обычно незначительна, например у *Ge* она составляет один атом на 10^{10} – 10^{12} атомов полупроводника. В этой связи все полупроводники можно разбить на две группы: собственные и примесные.

Собственные полупроводники не содержат легирующие примеси; к ним относятся высокой степени чистоты простые полупроводники: кремний *Si*, германий *Ge*, селен *Se*, теллур *Te* и др. и многие полупроводниковые химические соединения: арсенид галлия *GaAs*, антимоноид индия *InSb*, арсенид индия *InAs* и др.

Примесные полупроводники всегда содержат донорную или акцепторную примесь. В производстве полупроводниковых приборов примесные полупроводники используют чаще, поскольку в них свободные носители заряда образуются при более низких температурах (чем в собственных полупроводниках), которые отвечают рабочему интервалу температур полупроводникового прибора.

Электропроводность собственных полупроводников. В собственных полупроводниках при достаточности тепловой энергии решетки или в результате внешнего энергетического воздействия электрон(ы) перейдет(ут) из валентной зоны (ВЗ) в зону проводимости (ЗП) и станет(ут) свободным(и). Необходимая для этого перехода энергия определяется шириной запрещенной зоны (ЗЗ) – ΔW полупроводника. При комнатной температуре эта энергия может возникать вследствие флуктуации тепловых колебаний решетки (средней тепловой энергии решетки для такого перехода недостаточно). С уходом электрона в ЗП в валентной зоне остается свободным энергетический уровень, называемый **дыркой**, а сама ВЗ

становится не полностью заполненной (рис. __, *a*). Электрон имеет отрицательный заряд, дырку принято считать положительно заряженной частицей, численно равной заряду электрона.

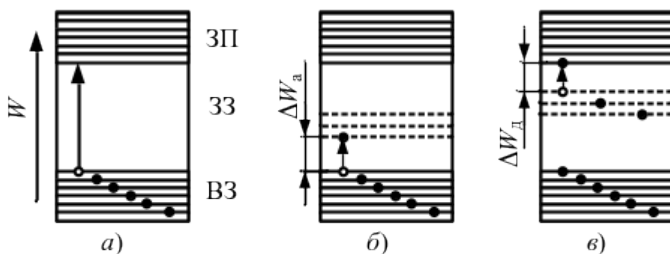


Рис. ____. Энергетические диаграммы полупроводников:
a – полупроводник без лигирующей примеси; *б* – полупроводник (*p*-типа) с акцепторной примесью; *в* – полупроводник (*n*-типа) с донорной примесью; ΔW_a – энергия активации (образования) дырок в ВЗ полупроводника за счет перехода электронов на уровни акцепторной примеси; ΔW_d – энергия активации электронов – энергия, необходимая для перехода электронов с уровней донорной примеси в ЗП полупроводника

Таким образом, в кристалле образуется пара свободных носителей заряда — электрон в ЗП и дырка в ВЗ, которые и создают собственную электропроводность полупроводника, тип которой электронно-дырочный.

В отсутствие внешнего электрического поля электрон и дырка совершают тепловые хаотические движения в пределах кристалла, а под действием поля осуществляют дополнительно направленное движение – дрейф, обуславливая тем самым электрический ток. Если концентрации свободных электронов и дырок равны между собой, то подвижность у них различна. В результате более низких значений эффективной массы и инерционности при движении в поле кристаллической решетки свободные электроны более подвижны, чем дырки. Поэтому собственная электропроводность полупроводников имеет слабо преобладающий электронный тип.

Электропроводность примесных полупроводников. В примесных полупроводниках атомы примеси либо поставляют электроны в ЗП полупроводника, либо принимают их с уровней ВЗ. Эти переходы электронов осуществляются при существенно меньших затратах энергии, которые требуются электронам для преодоления потенциального барьера в виде ЗЗ полупроводника. Поэтому эти виды

переходов в примесных полупроводниках являются основными, доминирующими над переходом электронов из ВЗ в ЗП.

Атомы примеси, размещаясь в запрещенной зоне полупроводника, создают в пределах этой зоны дискретные энергетические уровни либо у нижнего ее края вблизи к ВЗ, либо – у верхнего, вблизи к ЗП (см. рис. __, б, в). Вследствие своей малой концентрации атомы примеси располагаются в решетке полупроводника на очень больших расстояниях друг от друга, поэтому между собой не взаимодействуют.

Лабораторная работа № 9

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

9.1. Цель работы

Изучить зависимость сопротивления полупроводника от температуры. Научиться определять энергию активации полупроводников в джоулях по зависимости $\ln\rho$ от обратной температуры $1/T$.

9.2. Задачи работы

1. Для исследуемых образцов определить температурные коэффициенты сопротивления TK_R .
2. Вычислить энергию активации полупроводников для исследуемых образцов.

9.3. Краткие теоретические сведения

При температуре 0 К и в отсутствие другого энергетического воздействия все валентные электроны **полупроводника** находятся на энергетических уровнях ВЗ. В этом состоянии полупроводник подобен диэлектрику и его проводимость равна нулю. Для переброса электронов из ВЗ в ЗП нужна дополнительная энергия для преодоления потенциального барьера в виде ЗЗ. При температуре большей 0 К и дальнейшем ее повышении электроны под действием тепловой энергии начнут переходить в ЗП; в результате образуются пары свободных носителей заряда – электроны в ЗП, а дырки – в ВЗ. Этот процесс называют *тепловой генерацией* свободных носителей заряда. В ЗП (благодаря наличию свободных уровней) электроны под

действием приложенного электрического поля будут перемещаться с уровня на уровень, образуя электрический ток. Аналогично в ВЗ дырки образуют электрический ток. Одновременно с тепловой генерацией свободных носителей заряда существует и обратный процесс, когда свободный электрон возвращается в незаполненную ВЗ. Этот процесс называется *рекомбинацией* электрона с дыркой. При заданной температуре между этими процессами осуществляется термодинамическое равновесие, в результате чего в ЗП устанавливается некоторая, вполне определенная концентрация свободных электронов, а в ВЗ – дырок проводимости.

В примесных полупроводниках переходы электронов из ВЗ полупроводника на уровни акцепторной примеси и с локальных уровней донорной примеси в ЗП полупроводника осуществляются при более низких затратах энергии, чем переход электронов из ВЗ собственного полупроводника в его ЗП, т.е. $\Delta W > \Delta W_a$ (ΔW_d). Поэтому электропроводность примесных полупроводников начинает проявляться при более низких температурах, чем электропроводность собственных полупроводников.

Вероятность переходов носителей заряда на свободные уровни энергии и, следовательно, величина электропроводности сильно возрастают с ростом температуры. Зависимость удельной электропроводности γ от температуры в общем виде выражается экспоненциальной функцией:

$$\gamma = A e^{-\frac{\Delta W}{2kT}},$$

где A – постоянная величина; ΔW – ширина ЗЗ, эВ; k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – абсолютная температура.

Для полупроводников с одним типом носителей заряда удельная электропроводность γ , См/м, определяется тем же выражением:

$$\gamma = n q a, \tag{9.1}$$

где n – концентрация свободных носителей заряда, м^{-3} ; q – величина заряда каждого из них, Кл; a – их подвижность – отношение дрейфовой скорости V свободных носителей заряда к напряженности E электрического поля, вызвавшего дрейфовую скорость ($a = V/E$, $[(\text{м}/\text{с})/(\text{В}/\text{м}) = \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})]$). Поскольку подвижность a носителя заряда имеет тот же знак, что и его заряд q , удельная электропроводность γ , получаемая из формулы (9.1), всегда будет положительной независимо от знака заряда.

В широком интервале температуры концентрация свободных носителей заряда n и их подвижность a изменяются по различным законам. Поэтому зависимость удельной электропроводности примесных полупроводников от обратной температуры в широком интервале имеет сложный характер. В общем виде эта зависимость представлена на рис. 9.1, на котором видны области примесной электропроводности $\gamma_{пр}$ (участок AB) и собственной $\gamma_{соб}$ (участок $B\Gamma$). При этом $\gamma = \gamma_{соб} + \gamma_{пр}$.

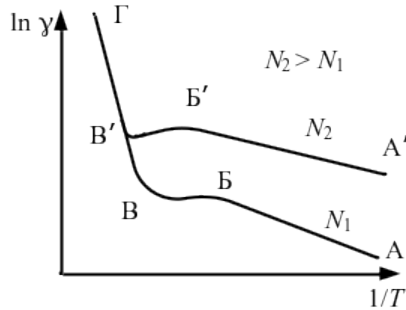


Рис. 9.1. Температурная зависимость удельной электропроводности γ примесного полупроводника с различной концентрацией N примеси: AB и $A'B'$ – участки, характеризующие примесную электропроводность; $B\Gamma$ – участок, характеризующий собственную электропроводность; BB и $B'B'$ – области насыщения.

Собственную электропроводность и примесную можно определить с помощью следующих уравнений:

$$\gamma_{соб} = Ae^{-\frac{\Delta W_{соб}}{2kT}}, \quad (9.2)$$

$$\gamma_{пр} = Ae^{-\frac{\Delta W_{пр}}{2kT}}, \quad (9.3)$$

где A – постоянная величина; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. Уравнение (9.3) справедливо, пока не наступит полная ионизация примеси.

Таким образом, собственная и примесная электропроводности полупроводниковых материалов с ростом температуры возрастают, т.е. они обладают отрицательным коэффициентом сопротивления.

Прологарифмировав уравнения (9.2) и (9.3), получим:

$$\ln \gamma_{\text{собр}} = \ln A - \frac{\Delta W_{\text{собр}}}{2kT},$$

$$\ln \gamma_{\text{пр}} = \ln A - \frac{\Delta W_{\text{пр}}}{2kT}.$$

Из выражений (9.3, 9.3) получаем выражение для удельного сопротивления полупроводника

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \rho_0 e^{\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (9.4)$$

Прологарифмировав уравнение (9.4), получим:

$$\ln \rho = \ln \rho_0 + \frac{\Delta W}{2kT}.$$

Полученная зависимость $\ln R$ от $1/T$ является линейной, и график зависимости $\ln R$ от обратной температуры T^{-1} будет представлять собой некоторую прямую, угловой коэффициент которой $\alpha_2 = \frac{\Delta W}{2k}$

пропорционален энергии активации соответствующего участка температурной зависимости. Следовательно, найдя из графика угловой коэффициент, можно вычислить энергию активации.

$$\Delta W = 2k\alpha_2. \quad (9.5)$$

9.4. Используемое оборудование

«Модуль питания», модуль «Магнитомягкие материалы и тепловой коэффициент сопротивления / емкости», модуль «Мультиметры», «Измеритель RLC », минимодуль «ТКС полупроводников», соединительные проводники.

9.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. На основании экспериментальных данных построить графики зависимости $\ln R(1/T)$ для исследуемых образцов.
2. По графикам определить температурные коэффициенты сопротивления TK_R .
3. Вычислить энергию активации полупроводников для исследуемых образцов.

9.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.

2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.

3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);

4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;

5. Изучить теоретический материал достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы.

6. Согласно рис. 9.2 выполнить электрические соединения модулей. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**

В качестве источника питания для нагрева использовать нерегулируемый выход модуля питания «15В».

Установить минимодуль «Полупроводники» в соответствующие гнезда модуля «Магнитомягкие материалы и тепловой коэффициент сопротивления / емкости» (минимодуль выделен пунктирной линией), располагать его так, как указано на рис. 9.2.

В качестве омметра PR использовать RLC -метр, выбрать режим измерения сопротивления, нажимая кнопку $L/C/R$; диапазон измерения выбирается автоматически при измерении.

В качестве термометра $P1$ использовать мультиметр 1 (далее мультиметр $P1$). Установить режим измерения температуры «°C».

После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО «Модуля питания». Включить мультиметры. Если термопара не соединена с гнездами мультиметра $P1$ на его индикаторе будет отображена комнатная температура. Подключить термопару к входу «TEMP» мультиметра и, если показания температуры ниже комнатной, изменить полярность подключения (перевернуть вилку термопары).

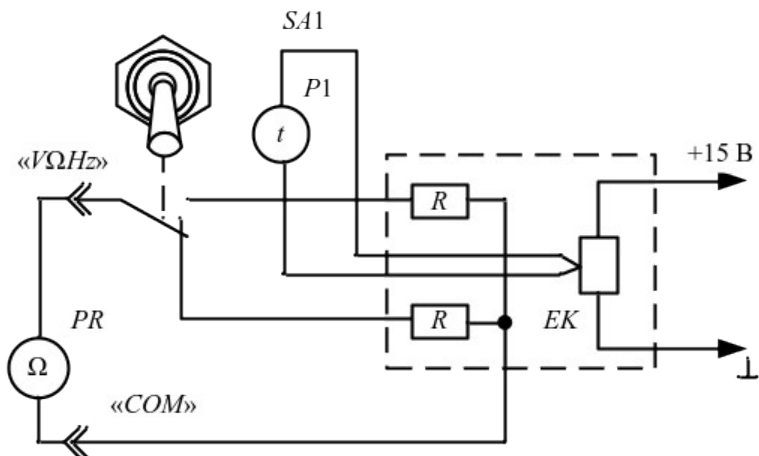


Рисунок 9.2. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения ТКС полупроводников

7. Для измерения сопротивления первого полупроводника переключить тумблер *SAL* в верхнее положение, для измерения сопротивления второго полупроводника - в нижнее. Полученные значения заносить в табл. 9.1.

Таблица 9.1

№ п.п.	Температура. °C	Сопротивление полупроводников <i>R</i> , Ом					
		Нагревание		Охлаждение		Среднее сопротивление $\langle R \rangle$	
		1	2	1	2	1	2
	20						
	25						
	⋮						
	100°						

8. Наблюдать за показаниями термометра и омметра, и через каждые 5 °C одновременно заносить значения сопротивлений полупроводников и температуры в табл. 9.1. Для переключения между проводниками использовать тумблер *SAL*. Измерения проводить до

100°C. НЕ ДОПУСКАЕТСЯ НАГРЕВАТЬ ОБРАЗЦЫ ВЫШЕ 100°C.

9. Отключить питание и провести измерения в тех же температурных точках при охлаждении образцов. Полученные значения заносить в табл. 9.1. Так как охлаждение ниже 40 °C происходит медленно, допускается не охлаждать ниже 30 – 40 °C (по указанию преподавателя).

10. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплекс в полной комплектности и исправности преподавателю или лаборанту.

11. По данным опыта (табл. 9.1.) построить графики зависимостей $\langle R_1 \rangle(t)$, $\langle R_4 \rangle(t)$. Точку пересечения осей графика выбирать таким образом, чтобы кривая графика занимала максимальную область построения.

12. По результатам измерения (табл. 9.1.) вычислить абсолютную температуру T , обратную температуру T^{-1} и $\ln(R)$ для каждого образца, заносить полученные значения в табл. 9.2.

$$T = t + 273,$$

где t - температура в °C.

Таблица 9.2

№ опыта	T, К	T^{-1} , К ⁻¹	$\ln(R_1)$	$\ln(R_2)$
1				
2				
...				

13. Построить графики зависимости $\ln R_1(T^{-1})$, $\ln R_2(T^{-1})$ и найти коэффициент α_2 , как тангенс угла наклона графика. Вычислить энергию активации полупроводников в джоулях по (9.5).

14. Сделать обобщающий вывод о характере температурной зависимости сопротивления полупроводников. Сопоставить полученные результаты с теоретическими.

15. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

9.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.

2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.

3. Результаты измерений.
4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).
5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление их расхождений с точностью измерений.
6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:
 - а) основные численные результаты работы;
 - б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

9.8. Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное отличие полупроводников и проводников?
2. Приведите определение терморезистора?
3. Какие материалы используются для изготовления терморезисторов?
4. Как зависит ТКС терморезистора от температуры?
5. Описать метод определения температурного коэффициента сопротивления используемый в данной лабораторной работе.

Лабораторная работа № 10

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ

10.1. Цель работы

Изучить явление фотопроводимости полупроводников.

10.2. Задачи работы

1. Определить параметры полупроводника, применяемого для изготовления фоторезистора.
2. По осциллограмме тока определить значение времени жизни носителей заряда в полупроводнике.

10.3. Краткие теоретические сведения

10.4. Используемое оборудование

10.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. На основании экспериментальных данных натурального логарифма изменения тока через полупроводник $\ln(\Delta i)$ от натурального логарифма светового потока $\ln(E)$.
2. Вычислить параметры полупроводника (коэффициент β и показатель степени x), применяемого для изготовления фоторезистора.
3. По осциллограмме тока определить значение времени жизни носителей заряда в полупроводнике.

10.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.
2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.
3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);
4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;

10.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.
2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.

3. Результаты измерений.
4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).
5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление их расхождений с точностью измерений.
6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:
 - а) основные численные результаты работы;
 - б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

10.8. Контрольные вопросы

Лабораторная работа № 11

КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И БАРЬЕРНЫЙ ФОТОЭФФЕКТ

11.1. Цель работы

Изучить явления, возникающие при контакте полупроводников, измерить фотоэдс и фототок при различной освещенности и определить параметры полупроводника примененного для изготовления фотодиода.

11.2. Задачи работы

1. Построить график зависимости тока насыщения светодиода i_c от светового потока E , облучаемого фотодиод.
2. Построить график зависимости фотоэдс U_{BL} от светового потока E .

11.3. Краткие теоретические сведения

Контакты полупроводника с металлом или с другим полупроводником обладают иногда выпрямляющими свойствами, т. е. значительно эффективнее пропускают ток в одном направлении, чем в обратном. Это происходит потому, что в приконтактной области изменяется концентрация или даже тип носителей заряда, т. е. образуется пространственный заряд, обеспечивающий контактную разность потенциалов, необходимую для выравнивания (в состоянии равновесия) уровней Ферми по обе стороны контакта.

В отличие от металлов, в полупроводниках эта область оказывается достаточно широкой, чтобы при малой концентрации носителей обеспечить нужный перепад потенциала. Если знак контактной разности потенциалов таков, что концентрация носителей в приконтактной области становится меньше, чем в объеме полупроводника, то приконтактный слой определяет сопротивление всей системы. Внешняя разность потенциалов дополнительно уменьшает число носителей в приконтактной области, если она добавляется к контактной разности потенциалов или, наоборот, увеличивает их концентрацию, если знак её противоположен. Таким образом, сопротивление контакта для токов в прямом и обратном направлениях существенно различаются, что и обеспечивает выпрямляющие свойства контакта.

Такие контакты явились первыми полупроводниковыми приборами (выпрямители, детекторы), однако развитие полупроводниковой электроники началось лишь после того, как были созданы *p-n* переходы - контакты областей полупроводника с разным типом проводимости внутри единого полупроводникового кристалла. Контактная разность потенциалов в этом случае близка к ширине запрещенной зоны, так как уровень Ферми (уровень W_F на рис. 11.1) в *n*-области лежит вблизи дна зоны проводимости W_C (рис. 11.1), а в *p*-области - вблизи валентной зоны W_V (рис. 11.1). Уменьшающая её внешняя разность потенциалов вызывает диффузионные потоки электронов в *p*-область и дырок в *n*-область (инжекцию неосновных носителей тока). В обратном направлении *p-n* переход практически не пропускает ток, т.к. оба типа носителей оттягиваются от области перехода. В полупроводниках с большой длиной диффузии, таких, как *Ge* и *Si*, инжектированные одним *p-n* -переходом неравновесные носители могут достигать другого, близко расположенного *p-n* перехода, и существенно определять ток через него. Возможно изменение тока через *p-n* переход, при создании вблизи него неравновесных носителей каким-либо другим способом, например освещением. Первая из этих возможностей управления током *p-n*

перехода (инжекция) является физической основой действия транзистора, а вторая (фотоэДС) - фотодиода и солнечных батарей.

На рис. 11.1 приведены зонные диаграммы, иллюстрирующие этапы формирования электронно-дырочного перехода.

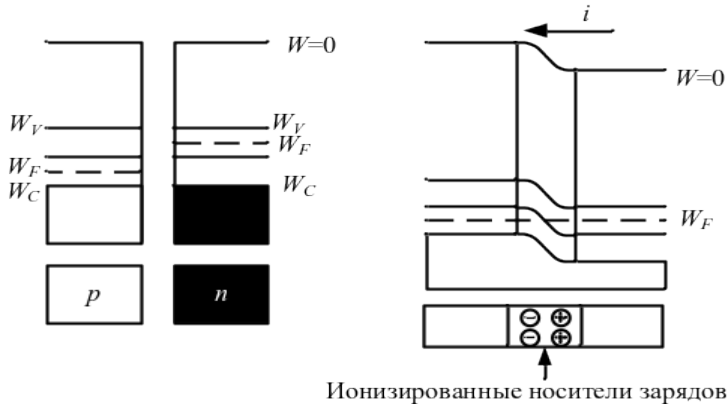


Рис. 11.1. Зонные диаграммы

Границу, где уровень Ферми пересекает середину запрещенной зоны, называют физическим p - n переходом.

Вольтамперная характеристика p - n перехода (диода) с приложенным внешним напряжением U будет иметь следующий вид:

$$i = i_c (e^{\beta U} - 1),$$

где β – коэффициент, характеризующий свойства p - n перехода; i_c – плотность тока насыщения.

На рис. 11.2 изображена вольтамперная характеристика p - n перехода:

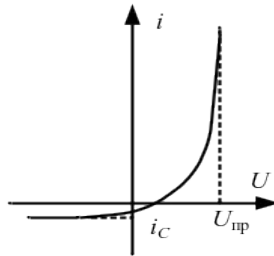


Рис. 11.2. Вольтамперная характеристика p - n перехода

На рис. 11.2 $U_{\text{пр}}$ – максимальное падение напряжения на диоде, при пропускании через него тока в прямом направлении; i_c – ток насыщения, максимальный ток проходящий через диод, при пропускании через него обратного тока.

Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с генерацией ЭДС при воздействии излучения на область p - n перехода, называются фотоэлементами. Фотоэлементы служат преобразователями световой энергии в электрическую. Некоторой разновидностью фотоэлементов являются солнечные элементы, предназначенные для преобразования солнечных лучей в электрическую энергию. Совокупность электрически соединенных фотоэлементов называется солнечной батареей.

В фотодиодах на основе p - n - переходов используется эффект разделения на границе электронно-дырочного перехода созданных оптическим излучением неосновных неравновесных носителей. На рис. 11.3 схематически изображен фотодиод и схема его включения.

Вольтамперная характеристика для активного режима работы (приложено внешнее напряжение) имеет вид:

$$i = i_{\phi} + i_c (e^{bU} - 1) \quad (11.1)$$

Рассмотрим два частных случая уравнения (1.38).

1. Режим холостого хода (разомкнутая цепь). Ток во внешней цепи отсутствует ($i = 0$), а напряжение на выводах фотоэлемента будет максимальным и равным ЭДС фотоэлемента. Он определяется, по непосредственно подключенному вольтметру к выходам фотодиода.

2. Режим короткого замыкания. При этом напряжение на выводах фотодиода отсутствует, а сила тока равна силе фототока.

Основными характеристиками фотодиодов является зависимость фототока и фотоэдс от светового потока, падающего на

элемент.

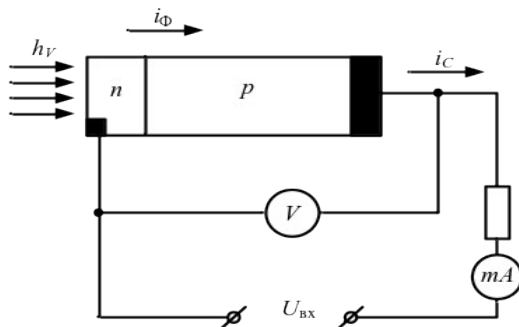


Рис. 11.3. Схема функциональная включения фотодиода

Световая характеристика представляет собой зависимость величины фототока i_{Φ} от светового потока E , падающего на фотоэлемент. Количество электронно-дырочных пар, образующихся в фотоэлементе при освещении, пропорционально количеству фотонов, падающих на фотоэлемент. Поэтому фототок будет пропорционален величине светового потока:

$$i_{\Phi} = KE, \quad (11.2)$$

где K – коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров фотоэлемента.

Подставив выражение (11.1) в (1.40) получим зависимость силы тока в цепи фотодиода от светового потока E и напряжения на фотодиоде U .

$$i = KE + i_c (e^{\beta U} - 1). \quad (11.3)$$

При неизменном напряжении U на фотодиоде зависимость тока от светового потока будет иметь линейный характер.

11.4. Используемое оборудование

«Модуль питания», модуль «Барьерный эффект. Фотопроводимость», «Функциональный генератор», модуль «Мультиметры», USB – осциллограф, минимодуль, соединительные проводники.

11.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Снять семейство ВАХ фотодиода при различной освещенности.
2. По экспериментальным данным построить график зависимости тока насыщения светодиода i_c от светового потока E , облучаемого фотодиод.
3. Сделать вывод об изменении ВАХ фотодиода при облучении его светом различной интенсивности.
4. По экспериментальным данным построить график зависимости фотоэдс U_{BL} от светового потока E .

11.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.
 2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.
 3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);
 4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;
 5. Согласно рис. 11.4 выполнить электрические соединения модулей для изучения характеристик фотодиода. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** Монтаж схемы производить на модуле «Барьерный эффект. Фотопроводимость».
- R_{A1} – мультиметр в режиме измерения постоянного тока до 20 мА.

$$R_{дт} = 2 \text{ кОм.}$$

Установить напряжения питания светодиода в минимальное положение, повернув ручку регулирования напряжения соответствующего канала модуля питания против часовой стрелки до упора.

В качестве источника треугольного импульсного сигнала использовать модуль «Функциональный генератор».

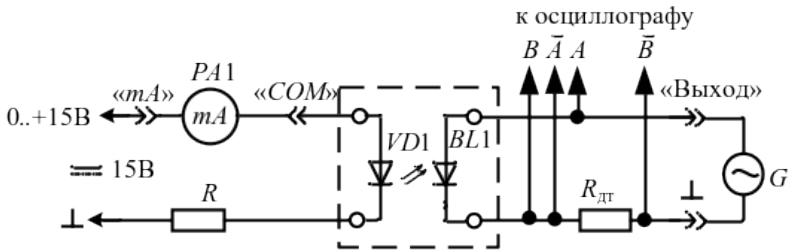


Рис. 11.4. Схема электрическая соединений типowego комплекта для снятия семейства ВАХ фотодиода

6. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лабо-рантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО «Модуля питания».

Включить мультиметр. Включить модуль «Функциональный генератор» тумблером «Питание». Установить треугольную форму сигнала, максимальную амплитуду (удерживать кнопку увеличения амплитуды 10 сек) и частоту 100Гц.

Запустить на компьютере программу «DiSco». Включить отображение канала *A* и канала *B* нажатием соответствующих кнопок. Перейти в режим «XY». Установить развертку 10 мкс. Для снятия U_C необходимо установить усиление каналов на 0,5 В/э.

7 Определить по осциллограмме напряжение U_C , соответствующее току насыщения i_C (III квадрант вольтамперной характеристики, рисунок 11.2).

Заносить в табл. 11.1 значение напряжения U_C и тока светодиода i_{VD} (определяется по миллиамперметру *PA*).

Таблица 11.1

№п.п.	i_{VD}	U_C	i_C	E
1				
2				
...				

8. Снять семейство ВАХ, для этого:

а) увеличивать силу тока в цепи светодиода регулятором напряжения модуля питания до максимально возможного с шагом 1-3 мА;

б) остановить USB-осциллограф нажатием кнопки «Сброс»;

в) в меню «Файл» выбрать пункт «Сохранить как растровый рисунок» сохранить под определенным именем (имя файла должно содержать значение тока в цепи светодиода i_{VD} , при котором была снята данная ВАХ);

г) приложить осциллограммы петель гистерезиса к отчету о лабораторной работе.

9. Отключить питание комплекта автоматом модуля питания.

10. На каждой ВАХ определить напряжение U_C , соответствующее току насыщения i_C насыщения, значение заносить в табл. 11.1.

11. Для каждого пункта измерений рассчитать силу тока насыщения i_C и световой поток E , полученные значения заносить в табл. 11.1.

Величина тока насыщения пропорциональна напряжению на датчике тока $R_{дт}$ (канал B осциллографа), и может быть найдена из закона Ома для участка цепи.

$$i_C = \frac{U_C}{R_{дт}},$$

где $R_{дт}$ – сопротивление датчика тока.

Световой поток светодиода рассчитывается по формуле:

$$E = \frac{k_{VD} i_{VD}}{r^2},$$

где k_{VD} - коэффициент зависящий от светодиода ($k_{VD} = 60$ Кд/А), r – расстояние от источника света до приемника ($r = 8$ мм).

12. Построить график зависимости i_C от светового потока E . По графику определить коэффициент пропорциональности K , как тангенс угла наклона графика $i_C(E)$. По семейству характеристик сделать вывод об изменении ВАХ диода при облучении его светом различной интенсивности (изменение тока насыщения i_C и прямого напряжения $U_{пр}$).

13. Согласно рис. 11.5 выполнить электрические соединения модулей для определения фотоэдс.

$PV1$ – мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 2 В.

$PA1$ – второй мультиметр в режиме измерения постоянного тока с пределом 20 мА.

Установить напряжения питания светодиода в минимальное положение, повернув ручку регулирования напряжения соответствующего канала модуля питания против часовой стрелки до упора.

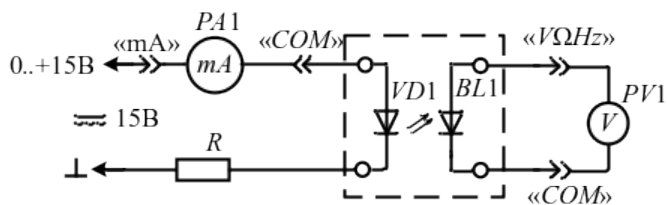


Рис. 11.5. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения фотоэдс

14. Увеличивать силу тока в цепи светодиода регулятором напряжения модуля питания до максимально возможного с шагом 1-3 мА, заносить в табл. 11.2 значения тока протекающего через светодиод i_{VD} (по мультиметру $PA1$) и напряжение на фотодиоде (по вольтметру $PV1$). Отключить питание комплекта автоматом модуля питания.

Таблица 11.2

№п.п.	i_{VD}	U_{BL}	E
1			
2			
...			

15. Построить график зависимости фотоэдс U_{BL} от светового потока E .

16. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

11.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.
2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.
3. Результаты измерений.
4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).
5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:

- сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
- сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
- сопоставление их расхождений с точностью измерений.

6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:

- а) основные численные результаты работы;
- б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

11.8. Контрольные вопросы

1. Приведите определение p - n перехода?
2. Приведите определение тока насыщения?
3. Повлияет ли увеличение концентрации свободных носителей заряда в области p - n перехода на значении тока насыщения, если да то как?
4. Опишите особенности режима холостого хода и короткого замыкания фотодиода?
5. Почему зависимость фототока от светового потока отклоняется от линейной при больших потоках

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Основные типы магнитного состояния вещества. Все вещества в природе считаются магнетиками, так как они обладают определенными магнитными свойствами и соответствующим образом взаимодействуют с внешним магнитным полем. В течение длительного времени магнетики классифицировали по внешним признакам, прежде всего по их магнитной восприимчивости $k_m = M / H$, где M – намагниченность (векторная сумма магнитных моментов атомов, находящихся в единице объема материала); H – напряженность магнитного поля.

В зависимости от значения M характера ее зависимости от H и температуры выделили следующие основные типы магнетиков (магнитных явлений): *диамагнетики* (диамагнетизм), *парамагнетики* (парамагнетизм), *ферромагнетики* (ферромагнетизм). Позже в самостоятельные группы выделили еще две группы материалов: *антиферромагнетики* (антиферромагнетизм) и *ферримагнетики* (ферримагнетизм). Однако при этом формальный классификационный

признак k_m оказывается несостоятельным. Дело в том, что магнитные свойства вещества, представляющего собой сложную динамическую систему атомов, состоящую из большого числа ядер и электронов, определяются внутри- и межатомными взаимодействиями элементарных носителей магнетизма: частиц, диполей, квадрупольей и т. д. Только изучение видов связей и значений энергии взаимодействий между микроносителями магнетизма позволяет объяснить различные типы магнитного состояния вещества.

Диамагнитный эффект является результатом воздействия внешнего магнитного поля на молекулярные токи и проявляется в том, что возникает магнитный момент, направленный в сторону, обратную внешнему полю. Следовательно, диамагнитная восприимчивость отрицательна; по значению она весьма мала ($k_m \ll 10^{-5}$) и в большинстве случаев не зависит от температуры и напряженности поля. Диамагнетизм существует во всех веществах, независимо от структуры их атомов и видов связи, т. е. в жидком, твердом и газообразном состояниях. Однако в «чистом виде» он проявляется только в тех веществах (диамагнетиках), в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов. Для веществ, в которых собственный суммарный магнитный момент атомных образований не равен нулю, на диамагнетизм накладывается значительно больший его по значению некомпенсированный момент электронов. В этом случае наблюдаются другие типы магнитного состояния, подавляющие диамагнетизм.

Парамагнитный эффект возникает в веществах с наличием некомпенсированных магнитных моментов и отсутствием магнитного атомного порядка. Это проявляется в том, что в отсутствие внешнего поля векторы магнитных моментов под действием тепловой энергии располагаются равновероятно, в результате чего магнитный момент парамагнетика равен нулю. Под действием внешнего поля возникает направление преимущественной ориентации магнитных моментов, совпадающее с направлением поля, т. е. появляется положительная намагниченность ($k_m > 0$). Для большинства парамагнетиков k_m сильно зависит от температуры.

Ферромагнитный эффект состоит в том, что при температуре не выше точки Кюри (особой для каждого ферромагнетика) даже в отсутствие внешнего магнитного поля энергетически выгодно существование *ферромагнитного атомного порядка*. Этому порядку соответствует параллельное расположение спинов. Следовательно, даже в отсутствие внешнего магнитного поля ферромагнетик

находится в состоянии технического насыщения (*самопроизвольного или спонтанного намагничивания*). Магнитная восприимчивость у ферромагнетиков имеет очень большое положительное значение и существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

Антиферромагнитный эффект характеризуется наличием антиферромагнитного атомного порядка, заключающегося в том, что в отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты одинаковых соседних атомов или ионов вследствие взаимодействия ориентированы антипараллельно, так что результирующий магнитный момент равен нулю. При воздействии внешнего поля магнитные моменты стремятся установиться вдоль него, и антиферромагнетик обладает малой положительной k_m , значение которой зависит от температуры.

Ферримагнитный эффект представляет собой нескомпенсированный антиферромагнетизм (*ферримагнитный атомный порядок*).

При температуре выше точки Кюри у ферромагнетиков и точки Нееля у антиферромагнетиков и ферримагнетиков атомный магнитный порядок разрушается, и вещества переходят в парамагнитное состояние.

Диамагнетики и парамагнетики иногда объединяют под названием *слабромагнитных веществ*, не обладающих атомным магнитным порядком, а ферромагнетики и ферримагнетики — под названием *сильномагнитных веществ*, обладающих атомным магнитным порядком; для антиферромагнетиков характерен атомный магнитный порядок, но количественно этот эффект весьма мал.

К сильномагнитным веществам относятся не только чистые ферромагнитные элементы, но и ряд металлических сплавов, твердых растворов, полупроводниковых и диэлектрических соединений. Магнитный порядок в этих разнообразных типах веществ обусловлен наличием в их химическом составе компонентов из числа переходных элементов и обменным взаимодействием между элементарными носителями магнетизма, энергия которого превышает среднюю энергию теплового движения. Типы обменных взаимодействий и механизм их действия зависят от строения вещества, параметров его микроструктуры, природы химической связи. Так, для металлов и их сплавов, у которых магнитный момент обусловлен не полностью застроенным третьим слоем электронной оболочки, имеет место прямое обменное взаимодействие за счет перекрытия электронов, принадлежащих соседним атомам в решетке, поскольку расстояние

между атомами в данной решетке мало. В веществах, атомы которых расположены на значительном расстоянии друг от друга, прямое обменное взаимодействие мало и возникают различные виды косвенных взаимодействий. Например, у редкоземельных металлов имеет место косвенный обмен через электроны проводимости. Для ряда кристаллических химических соединений, у которых магнитоактивные носители атомных магнитных моментов разделены между собой магнитонейтральными ионами, осуществляется косвенное обменное взаимодействие между магнитными ионами через возбужденные немагнитные промежуточные ионы.

Для электротехники особое место среди магнитных материалов занимают ферромагнетики, они используются для производства трансформаторов, дросселей, постоянных магнитов.

Общие сведения о ферромагнетизме. К ферромагнетикам относятся: железо, никель, кобальт, их соединения и сплавы, а также некоторые сплавы марганца, серебра, алюминия и др. При относительно низких температурах ферромагнитными являются некоторые редкоземельные элементы (гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий и тулий).

Все ферромагнетики характеризуются:

- кристаллическим строением;
- большим положительным значением магнитной восприимчивости (магнитной проницаемости), а также существенной и нелинейной ее зависимостью от напряженности поля и температуры;
- способностью намагничиваться до насыщения при обычных температурах даже в слабых полях;
- гистерезисом — зависимостью магнитных свойств от предшествующего магнитного состояния («магнитной предыстории»);
- точкой Кюри, т. е. температурой, выше которой материал теряет ферромагнитные свойства.

Лабораторная работа № 12

СНЯТИЕ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА

12.1. Цель работы

Исследовать характеристики намагничивания ферромагнетика в постоянном магнитном поле.

12.2. Задачи работы

1. Построить и изучить основную кривую намагничивания ферромагнетика.
2. Построить график зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

12.3. Краткие теоретические сведения

12.4. Используемое оборудование

12.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Изменяя ток намагничивающей обмотки, следовательно и напряженность магнитного поля в образце, измерить величины тока первичной обмотки и напряжения на конденсаторе.
2. Вычислить значения B , H и μ и по полученным данным построить графики зависимости магнитной индукции и магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.
3. Сделать выводы.

12.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.
2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.
3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);
4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;

12.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.
2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.
3. Результаты измерений.
4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).
5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление их расхождений с точностью измерений.
6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:
 - а) основные численные результаты работы;
 - б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

12.8. Контрольные вопросы

Лабораторная работа № 13

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА С ПОМОЩЬЮ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

13.1. Цель работы

Исследовать характеристики намагничивания ферромагнетика при работе его в переменном магнитном поле. Изучить явление гистерезиса.

13.2. Задачи работы

1. Определить параметры предельной петли гистерезиса (остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c , индукция насыщения B_s).

2. Снять семейство частных петель гистерезиса и построить основную кривую намагничивания.

13.3. Краткие теоретические сведения

13.4. Используемое оборудование

13.5. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Снять предельную петлю гистерезиса и измерить координаты (напряжения) точек петли, соответствующие величинам коэрцитивной силы, остаточной индукции и индукции насыщения.

2. Рассчитать величины коэрцитивной силы, остаточной индукции и индукции насыщения. Определить удельную энергию перемагничивания ферромагнетика.

3. Снять и сохранить осциллограммы для семейства частных петель гистерезиса и построить основную кривую намагничивания.

13.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.

2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.

3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);

4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;

Далее как в методичке

13.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.
2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.
3. Результаты измерений.
4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).
5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление их расхождений с точностью измерений.
6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:
 - а) основные численные результаты работы;
 - б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

13.8. Контрольные вопросы

Лабораторная работа № 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ

14.1. Цель работы

Исследовать зависимость магнитных свойств ферромагнетика от температуры.

14.2. Задачи работы

- 1.

14.3. Краткие теоретические сведения

14.4. Используемое оборудование

14.5. Задание на выполнение лабораторной работы

14.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.

2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.

3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);

4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;

5. Согласно рис. 14.2 выполнить электрические соединения модулей для определения точки Кюри и магнитного момента атома ферромагнетика. Для отсечения постоянной составляющей переменного тока, в цепь первичной обмотки включен конденсатор. Выходы «А», «В», « \bar{A} », « \bar{B} » соединить с соответствующими входами модуля «USB-осциллограф».

После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО «Модуля питания».

Соединить входы «+15В» и « \perp » с соответствующими выходами нерегулируемого канала модуля питания. Повернуть регулятор питания против часовой стрелки до упора. Запустить программу «DiSco». Включить режим «XY» и установить масштаб 2 В/э для обоих каналов (при данном масштабе усиление сигнала осуществляется схемотехнически, поэтому помехи на осциллограмме минимальны).

Включить модуль «Функциональный генератор», установить форму выходного сигнала « \square », установить частоту 350 Гц

кнопками увеличения и уменьшения частоты. Увеличивая ток I в первичной обмотке с помощью кнопок увеличения и уменьшения амплитуды, получить изображение предельной петли гистерезиса (для которой рост тока не приводит к увеличению площади петли). При необходимости – установить режим сглаживания, если это не изменит форму сигнала (в меню «Аналоговые сигналы» пункты «Сглаживание канала A » и «Сглаживание канала B »).

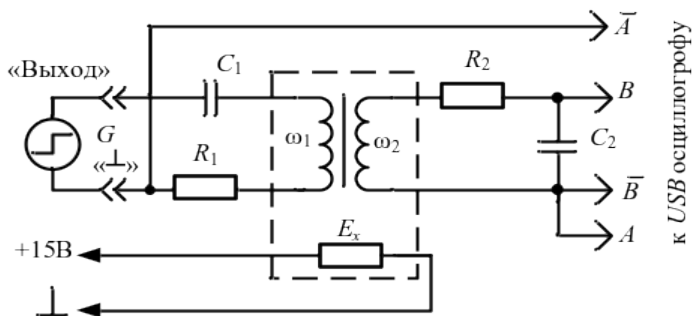


Рис. 14.2. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения точки Кюри ферромагнетиков

6. Измерить температуру и значения положительной и отрицательной ординаты вершин петли, которые соответствуют величине индукции насыщения B_s . Результаты этих измерений заносить в табл. 14.1

Таблица 14.1

№ п.п.	$t, ^\circ\text{C}$	$U_+, \text{В}$	$U_-, \text{В}$	$T, \text{К}$	$U_{\text{ср}}, \text{В}$	$B_s, \text{Тл}$
1						
2						
...						
N						

7. По мере нагревания образца через каждые $10\text{ }^\circ\text{C}$, а со $100\text{ }^\circ\text{C}$ – через $5\text{ }^\circ\text{C}$, проводить измерения ординаты у петли гистерезиса и температуры согласно пункту 6. В силу конструктивных особенностей установки, для повышения точности измерений необходимо

поддерживать предельную петлю перемагничивания, для этого - уменьшать или увеличивать амплитуду выходного сигнала соответствующими кнопками модуля «Функциональный генератор». Измерения продолжать до тех пор, пока петля гистерезиса не превратится в прямую линию или до достижения 130 °С. Выключить питание комплекта. По полученным данным, в соответствии с формулой (14.24), рассчитать значение индукции B_s для каждого значения U . Построить график зависимости $B_s(T)$.

8. По графику $B_s(T)$ найти значение температуры Кюри T_C , определить индукцию в области абсолютного нуля температур $B_s(0)$ (формула 14.25), из формул (14.20) и (14.22) найти магнитный момент одного атома μ_m .

9. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту

14.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.
2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.
3. Результаты измерений.
4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).
5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление их расхождений с точностью измерений.
6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:
 - а) основные численные результаты работы;
 - б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

14.8. Контрольные вопросы

1. Какова физическая природа точки Кюри? Как её определить экспериментально?
2. Приведите определение парамагнитного состояния вещества?
3. Как и почему изменяется индукция насыщения ферромагнетиков при изменении температуры?
4. Приведите выражение для определения магнитного момента атома ферромагнетика.

Лабораторная работа № 15

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТОТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

15.1. Цель работы

Исследование кривой размагничивания магнитотвёрдых материалов, определение удельной энергии постоянного магнита.

15.2. Задачи работы

15.3. Краткие теоретические сведения

Метод измерения. Основными свойствами магнитотвёрдых материалов являются коэффициент возврата μ_{Δ} и удельная магнитная энергия W_{Δ} .

Коэффициент возврата определяется как тангенс угла наклона прямой возврата:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \cdot \Delta H}, \quad (15.1)$$

где: ΔB – изменение магнитной индукции на прямом участке линии возврата; ΔH – изменение напряженности поля; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Измерение индукции производится датчиком на основе эффекта Холла.

Эффект Холла — появление в проводнике (или в полупроводнике) с плотностью тока j , помещенном в магнитное поле B напряжения U в направлении, перпендикулярном векторам j и B . Эффект открыт в 1879 г. американским физиком Э. Г. Холлом, который экспериментально установил следующее выражение для напряжения:

$$U = R \frac{IB}{d}, \quad (15.2)$$

где R — коэффициент пропорциональности (коэффициент Холла), его величина и знак зависят от химического состава проводника, от температуры и заряда носителей тока; I — сила тока в образце; B — индукция магнитного поля; d — толщина образца. Формулу (15.2) запишем в виде:

$$B = k \cdot U, \quad (15.3)$$

где $k = \frac{R \cdot I}{d}$.

Лабораторный индикатор индукции настроен таким образом, что $k = 1$, то есть напряжение 1 В на выходе соответствует индукции 1 Тл.

Закон полного тока для магнитной цепи:

$$H_m h_m = H_\delta \delta, \quad (3.30)$$

где: H_m — напряженность магнитного поля создаваемого постоянным магнитом; h_m — высота магнита; H_δ — индукция в воздушном зазоре; δ — толщина воздушного зазора.

Индукция в воздушном зазоре определяется по формуле:

$$B_\delta = \mu_0 \cdot H_\delta. \quad (15.31)$$

Подставив из формулы (15.30) значение напряженности в воздушном зазоре и выразив H_m , получим:

$$H_m = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0 \cdot h_m}. \quad (15.32)$$

Для лабораторной установки: $\delta_1=2.5$ мм; $\delta_2=4$ мм; $h_m=3$ мм.

Удельную магнитную энергию во внешнем пространстве найдем как площадь под кривой размагничивания, а так как она будет

представлять собой прямоугольный треугольник со сторонами B_A и H_A , энергия будет равна:

$$W_A = \frac{B_A H_A}{2}. \quad (15.33)$$

15.4. Используемое оборудование

Модули «Магнитотвердые материалы и индикатор магнитной индукции», «Мультиметр», «Модуль питания», датчик холла, соединительные проводники.

15.5. Задание на выполнение лабораторной работы

15.6. Программа работы

1. Прочитать методические указания по подготовке и проведению лабораторной работы.
 2. Получить у преподавателя вариант задания исходных данных к работе.
 3. При ознакомлении с рабочим местом проверить наличие необходимых приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу);
 4. Перед сборкой цепи проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены;
 5. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.
 6. Согласно рисунку 3.11 выполнить электрические соединения модулей для исследования магнитного поля. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**
- После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО «Модуля питания».

В качестве источника питания +15 В использовать один из регулируемых каналов модуля питания. **При подключении питания к индикатору индукции необходимо соблюдать полярность.** Установить максимальное выходное напряжение, повернув регулятор по часовой стрелке до упора.

В качестве вольтметра PV использовать мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 2 В. Подключить датчик индукции к разъему $XS1$ модуля «Магнитотвердые материалы и индикатор магнитной индукции».

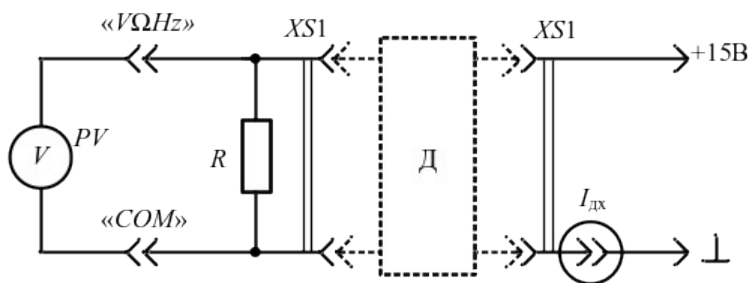


Рис. 15.11. Схема электрическая соединений типового комплекта для получения кривой размагничивания магнитотвердого материала

7. Измерить напряжение Холла в зазорах обоих сердечников, показания заносить в табл. 15.1. Напряжение $U_{2.5}$ – напряжение на датчике в зазоре 2.5 мм; U_4 – напряжение на датчике в зазоре 4 мм. Измерения повторить 5–7 раз.

Таблица 15.1

№ п.п.	$U_{2.5}$, В	U_4 , В
1		
2		
...		
Среднее значение напряжения		
Значение индукции B_s , Тл		
Значение напряженности H_m , кА/м		

8. Рассчитать среднее значения напряжения Холла для обоих зазоров. По формулам (15.29) и (15.32) найти значение магнитной

индукции и напряженность поля в зазорах. Отметить на графике $B(H)$ найденные точки. Так как кривая размагничивания магнитотвердых материалов условно считается прямой, проведем прямую через найденные точки до пересечения с осями, как показано на рис. 15.12.

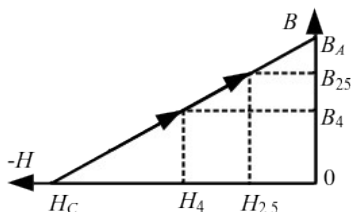


Рис. 15.12. Кривая размагничивания магнитотвердого материала

По графику найти кажущуюся остаточную индукцию B_A и коэрцитивную силу H_C . Определить удельную энергию магнита по формуле (15.31).

9. Чтобы качественно убедиться в характере зависимости индукции магнитного поля от расстояния до поверхности магнита, необходимо измерить индукцию на поверхности магнита, расположенного вне сердечника и, плавно отводя датчик от него, наблюдать за значением напряжения Холла. Значение напряжения и расстояние от поверхности магнита заносить в табл. 15.6. Отключить питание комплекта.

Таблица 15.6

Расстояние от поверхности d , мм	U , мВ	B , мТл
0		
1		
2		
3		
4		
5		

Построить график зависимости индукции B от расстояния до поверхности магнита d .

10. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

15.7. Содержание отчета

1. Название работы. Цель работы.
2. Используемое оборудование и схемы электрических соединений.
3. Результаты измерений.
4. Результаты расчётов и построенные опытные зависимости (графики).
5. Краткие выводы по каждой работе, анализ полученных результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление их расхождений с точностью измерений.
6. Обобщающий вывод по всей лабораторной работе. Вывод включает в себя:
 - а) основные численные результаты работы;
 - б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента.

15.8. Контрольные вопросы

1. Какая часть кривой намагничивания называется прямой возврата, каков её физический смысл?
2. Какова величина магнитной индукции на поверхности замкнутого ферромагнитного сердечника?
3. Метод измерения индукции магнитного поля в данной работе?
4. Изобразите качественно картину магнитного поля создаваемого прямоугольным магнитом?
5. Приведите определение однородного поля?
6. Объясните, почему полюсные наконечники сердечников электромагнитов и постоянных магнитов изготавливаются в форме усеченного конуса?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечень и объем выполнения лабораторных работ, приведенных в Методических указаниях, соответствует рабочей программе дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение». Выполнение и защита лабораторных работ производится студентом в течение семестра (18 часов). Необходимым условием получения допуска к экзамену по дисциплине является оформление отчетов по 8 лабораторным работам (по указанию преподавателя) с последующей их защитой. Темы обязательных к выполнению работ для каждой группы студентов и порядок их выполнения определяются преподавателем в зависимости от излагаемого лекционного материала.

В процессе изучения дисциплины студентами ведущим преподавателем дисциплины могут вноситься некоторые изменения в содержание лабораторных работ, связанные с необходимостью индивидуального подхода к выполнению работы. По решению преподавателя возможно введение элементов научных исследований в содержание лабораторных работ путем замены отдельных разделов работ на индивидуальное задание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесов, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов : Учебн. для вузов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2004. – 519 с.
2. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы : Учебн. для вузов / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – 7-е изд., пераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. Отделение, 1985. – 304 с.
3. Электротехнические и конструкционные материалы : учеб. пособие для студ. сред. проф. образования / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин и др. ; под ред. В.А. Филикова. – 3-е изд., испр. – М. : издательский центр «Академия», 2007. – 280 с.
4. Материаловедение. Технология конструкционных материалов : учеб. пособие для вузов / В.С. Чердниченко. – _____, 2009. –
5. Электротехнический справочник: В 4 т Т 2 Электротехнические изделия и устройства

Учебное издание

Коловский Алексей Владимирович

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Методические указания

Редактор Н. Я. Бодягина

Корректор _____

Компьютерная верстка _____

Подписано в печать __. __.2012. Формат 60×84/16 Бумага тип № 1.

Усл. печ.л. _____. Уч.-изд.л. _____. Тираж 100 экз. Заказ **С 59**

Сибирский федеральный университет; Хакасский технический институт –
филиал ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
655017, Абакан, Щетинкина, 27

Отпечатано в полиграфической лаборатории ХТИ – филиала СФУ
655017, Абакан, Щетинкина, 27