

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический
университет»

Факультет «Магистратура»

Ю.А. Брусенцов, И.С. Филатов, И.Г. Проценко

**МАТЕРИАЛЫ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

Утверждено Методическим советом ТГТУ
в качестве лабораторного практикума для студентов
магистратуры, обучающихся по направлению 150100.68
«Материаловедение и технологии материалов» и 211000.68
«Конструирование и технология электронных средств»



Тамбов
2013

Рецензент
д.т.н., профессор В.М. Червяков

Материалы твердотельной электроники: Лаб. практик.
/Сост.: Ю.А. Брусенцов, И.С. Филатов, И.Г. Проценко,
Тамбов: ТГТУ, 2013. – 32 с.

Утверждено Методическим советом ТГТУ
(протокол № ____ от _____)

Изучение р-п перехода

Цель работы: изучение р-п-перехода, ознакомление с работой полупроводникового диода, получение вольт-амперной характеристики диода.

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

Теоретические сведения

Развитие полупроводниковой электроники обусловлено использованием контакта двух примесных полупроводников с различным типом проводимости. Такой контакт называют электронно-дырочным переходом или р-п-переходом. На практике р-п-переход получают введением в примесный полупроводник дополнительной легирующей примеси.

Рассмотрим схематически образование р-п-перехода при соприкосновении двух полупроводников с различным типом электропроводности (рис. 1.1).

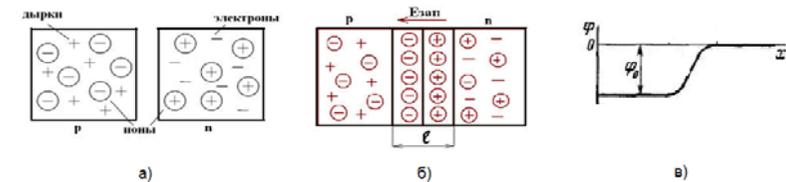


Рис. 1.1 Образование р-п перехода

До соприкосновения в обоих полупроводниках электроны, дырки и неподвижные ионы были распределены равномерно (рис. 1.1 а). При соприкосновении полупроводников в пограничном слое происходит рекомбинация (воссоединение) электронов и дырок.

Свободные электроны из зоны полупроводника n-типа занимают свободные уровни в валентной зоне полупроводника р-типа. В результате вблизи границы двух полупроводников образуется слой, лишённый подвижных носителей заряда и поэтому обладающий высоким электрическим сопротивлением, так называемый запирающий слой (рис 1.1, б). Толщина запирающего слоя обычно не превышает нескольких микрометров.

Расширению запирающего слоя препятствуют неподвижные ионы донорных и акцепторных примесей, которые образуют на границе полупроводников двойной электрический слой. Этот слой определяет контактную разность потенциалов (потенциальный барьер) φ_0 на границе полупроводников (рис. 1.1, в). Возникшая разность

потенциалов создаёт в запирающем слое электрическое поле, препятствующее как переходу электронов из полупроводника n-типа в полупроводник p-типа, так и переходу дырок в полупроводник n-типа. В то же время электроны могут свободно двигаться из полупроводника p-типа в полупроводник n-типа, точно так же, как дырки из полупроводника n-типа в полупроводник p-типа.

Таким образом, контактная разность потенциалов препятствует движению основных носителей заряда и не препятствует движению неосновных носителей заряда. Однако при движении через p–n-переход неосновных носителей заряда (так называемый дрейфовый ток $I_{др}$) происходит снижение контактной разности потенциалов ϕ_0 . Это позволяет некоторой части основных носителей, обладающих достаточной энергией, преодолеть потенциальный барьер, вызванный контактной разностью потенциалов ϕ_0 . Появляется диффузионный ток $I_{диф}$, который направлен навстречу дрейфовому току $I_{др}$, т.е. возникает динамическое равновесие, при котором:

$$I_{др} = I_{диф}.$$

Если к p–n-переходу приложить внешнее напряжение, которое создаёт в запирающем слое электрическое поле напряжённостью $E_{вн}$, совпадающее по направлению с полем неподвижных ионов напряжённостью $E_{зап}$ (рис. 1.2), то это приведёт лишь к расширению запирающего слоя, так как отведёт от контактной зоны и положительные и отрицательные носители заряда (дырки и электроны).

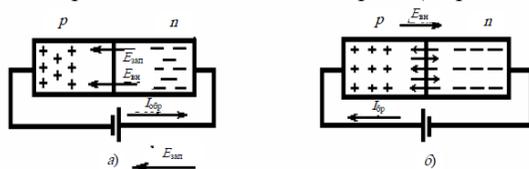


Рис. 1.2 Электронно-дырочный переход во внешнем электрическом поле:

а - при приложении обратного напряжения; б- при приложении прямого напряжения

При этом сопротивление p–n-перехода велико, ток через него мал – он обусловлен движением неосновных носителей заряда. В этом случае ток называют обратным, а p–n-переход – закрытым.

Таким образом, p–n-переход обладает несимметричной вольт-амперной характеристикой (рисунок 1.3).

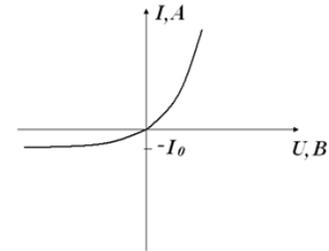


Рис. 1.3 Вольт – амперная характеристика полупроводникового диода

При прямом включении через него проходит большой прямой ток, при обратном включении – незначительный обратный ток. Важно отметить, что так как прямой ток р–n-перехода практически определяется собственной электропроводностью проводника, то он сильно зависит от температуры. Поэтому и величина прямого тока р–n-перехода резко изменяется при изменении температуры среды, окружающей полупроводниковый кристалл.

Порядок выполнения работы

1. Соберите экспериментальную установку (рис. 1.4).

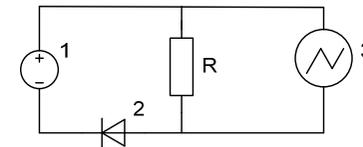


Рис. 1.4 Экспериментальная установка:

1 - источник питания; 2 - изучаемый полупроводниковый диод; 3 - осциллограф

2. Включи измерительную установку 1 в присутствии преподавателя или лаборанта.
3. Включить осциллограф 3. Используя инструкцию по эксплуатации, получить устойчивое изображение вольт-амперной характеристики (рисунок 1.3).
4. Измерить U и привести напряжение на входе Y к величине тока I , протекающего через диод. Результаты занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1 Экспериментальные данные

$I, \text{ mA}$					
$U, \text{ B}$					

5. Построить вольт-амперную характеристику изучаемого диода.

Содержания отчета

1. Название, цель работы, приборы и принадлежности.
2. Схемы экспериментальной установки.

3. Порядок выполнения работы.
4. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое р–п-переход?
2. Что такое контактная разность потенциалов?
3. Методы получения р–п-переходов.
4. Что такое барьер Шоттки?
5. Выпрямляющие свойства р–п-перехода.
6. Что такое инжекция неосновных носителей зарядов?
7. Что такое пробой р–п-перехода?

Литература: [1].

Лабораторная работа №2

Определение световых и электрических характеристик светодиода и фототранзистора

Цель работы: исследовать световые характеристики полупроводникового светоизлучателя, характеристики полупроводникового сопротивления.

Приборы и принадлежности: светоизлучающий диод АЛ 307 БМ, лазерный светодиод, фототранзистор, фотоэкспонетр Фотон-1, омметр, источник постоянного тока.

Теоретические сведения

Бинарные полупроводники используют не только в качестве основы для транзисторов и микросхем, но также и в несколько необычной роли – в качестве светоизлучающих элементов. Наиболее используемым является арсенид галлия, легированный различными компонентами, – алюминием, фосфором, индием и др.

Принцип работы светодиода основан на излучательной рекомбинации носителей заряда в активной области гетерогенной структуры при пропускании через нее тока. Носители заряда – электроны и дырки – проникают в активный слой из прилегающих пассивных слоев вследствие подачи напряжения на р–п-структуру и затем испытывают спонтанную рекомбинацию, сопровождающуюся излучением света. Длина волны излучения связана с шириной запрещенной зоны активного слоя законом сохранения энергии. Внешний вид наиболее распространенного светодиода представлен на рисунке 2.1.

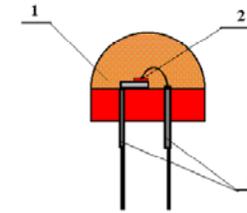


Рис. 2.1 Светодиод АЛ 307 БМ

1 – активная среда; 2 – полупроводниковый излучающий элемент; 3 – выводы

В электронике светодиоды используются как правило в качестве индикаторов, но также они используются и в качестве излучателей для особых устройств – оптопар.

Основным элементом оптопары является *фотоприемник*, изготавливаемый обычно из полупроводникового материала. В основе работы фотоприемника лежит явление внутреннего фотоэффекта, при котором в результате поглощения фотонов с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны, происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости (генерация электронно-дырочных пар). При наличии электрического потенциала с появлением электронно-дырочных пар от воздействия оптического сигнала появляется электрический ток, обусловленный движением электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Эффективная регистрация генерируемых в полупроводнике электронно-дырочных пар обеспечивается путем разделения носителей заряда.

Для этого используется конструкция с *p-n*-переходом, которая называется фотодиодом. Из фотоприемников получили распространение лавинные фотодиоды, фототранзисторы.

Оптической средой может служить воздух, вакуум или оптоволоконные линии. При этом светоизлучатель может быть размещен как в непосредственной близости от фотоприемника (датчики перемещения, фотодатчики в видеомониторах и компьютерах), так и удален на значительное расстояние (оптоволоконные линии передачи данных и связи).

Достоинства транзисторной оптопары в том, транзистор выполняет функции усилителя. Аналог оптопары в традиционной электронике – импульсный трансформатор.

В исследуемой оптопаре применен светодиод АЛ 307 Б. Оптической средой является воздух. В качестве фотоприемника используется транзистор МП-25 с открытым кристаллом. На светодиод подается напряжение питания $U_{\text{пит}}$, с фототранзистора снимается напряжение коммутации $U_{\text{ком}}$, зависящее от свойств оптической среды и от яркости свечения светодиода.

Сопротивление фототранзистора и режим его работы зависят от освещенности его кристалла. Если база не освещена, то фототранзистор работает в режиме усилителя. При освещении базовой области попадающие на нее фотоны выбивают электроны, переход становится проводящим и в коллекторной цепи протекает ток (так называемый **фототок**). Величина фототока зависит от освещенности базы.

Порядок выполнения работы

1. Соберите установку для определения яркости свечения светодиода (рис. 2.2).

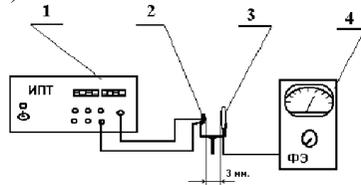


Рис. 2.2 Установка для определения характеристики свечения светодиода:

1 – источник постоянного тока; 2 – светодиод; 3 – фотозлемент;

4 – экспонометр

2. Включите источник постоянного тока и, изменяя напряжение от 1,4 до 2,1В, по экспонометру получить значения яркости свечения. Результаты занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 Экспериментальные данные

$U_{\text{пит}}, \text{В}$				
$E, \text{лк}$				

3. Построить график зависимости яркости свечения от напряжения питания.

4. Произвести замену светоизлучающего диода на лазерный УФ полупроводниковый диод в экспериментальной установке (рис. 2.2).

5. Включите источник постоянного тока, изменяя напряжение от 1 до 4В, по экспонометру получить значение яркости свечения. Результаты занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 Экспериментальные данные

$U_{\text{пит}}, \text{В}$				
$E, \text{лк}$				

6. Построить график зависимости яркости свечения от напряжения питания. Произвести сравнительный анализ характеристик ИК и УФ излучающий приборов.

7. Собрать установку для определения свойств транзисторной оптопары (рис. 2.3).

6. Построить график зависимости яркости свечения от напряжения питания. Произвести сравнительный анализ характеристик ИК и УФ излучающий приборов.

7. Собрать установку для определения свойств транзисторной оптопары (рис. 2.3).

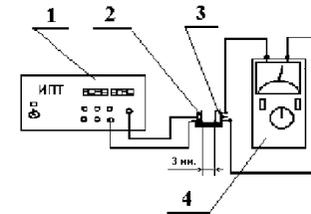


Рис. 2.2 Установка для определения сопротивления фототранзистора:

1 – источник постоянного тока; 2 – светодиод; 3 – фототранзистор; 4 – омметр

8. Включить источник постоянного тока и, изменяя напряжение от 1,4 до 2,1В, по омметру получить значения сопротивления фототранзистора. Полученные данные заносятся в табл. 2.3.

Таблица 2.3 Экспериментальные данные

$U_{пит}$, В				
R , кОм				

9. Построить график зависимости сопротивления фототранзистора от его освещенности.

Содержание отчета

1. Описание и схемы установок для определения свойств светоизлучателя и фотоприемника.
2. Таблица и график зависимости яркости свечения светодиода от напряжения питания светодиода.
3. Таблица и график зависимости сопротивления фототранзистора от напряжения питания светодиода.
4. График зависимости сопротивления фототранзистора от яркости свечения светодиода.

Контрольные вопросы

1. Применение оптопар, их достоинства и недостатки.
2. Источники света в оптоэлектронных устройствах.
3. Фотоприемники, их свойства и особенности.
4. Способы управления фототоком транзистора оптопары.

Литература: [2].

**Изучение влияния строения диэлектрика на его
поляризуемость**

Цель работы: выяснить влияние строения диэлектрика на его проводимость при переменном токе.

Приборы и принадлежности: генератор высокой частоты, двухлучевой осциллограф, высокочастотный измеритель ёмкости, набор диэлектриков.

Теоретические сведения

При не слишком высоких температурах, а также в отсутствие действия сильных электрических полей, в диэлектриках, в отличие от проводников, отсутствуют свободные носители электрического тока.

Молекулы диэлектрика электрически нейтральны и содержат равное число положительных и отрицательных зарядов, тем не менее, они обладают электрическими свойствами. В молекулу диэлектрика можно рассматривать как диполь, имеющий дипольный электрический момент, равный:

$$p_e = ql,$$

где q - абсолютная величина суммарного положительного, а также суммарного отрицательного зарядов, расположенных, соответственно, в центрах тяжести этих зарядов; l - расстояние между центрами, тяжести положительных и отрицательных зарядов.

Диэлектрик называется неполярным, если электроны атомов в его молекулах расположены симметрично относительно ядер (H_2 , O_2 и др.). В таких молекулах центры тяжести положительных и отрицательных зарядов совпадают в отсутствие внешнего электрического поля и дипольный момент p_e молекулы равен нулю. Если неполярный диэлектрик помещен во внешнее электрическое поле, то происходит деформация электронных оболочек в атомах (молекулах) и центры тяжести положительных и отрицательных зарядов смещаются друг относительно друга. В молекуле (атоме) диэлектрика возникает индуцированный (наведенный) дипольный электрический момент, пропорциональный напряженности E электрического поля:

$$p_e = \epsilon_0 a E,$$

$$p_e = a E,$$

где a - коэффициент поляризуемости (поляризуемость) молекулы (атома);

$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная в СИ.

Поляризуемость молекулы зависит только от объема молекулы. Существенно, что коэффициент поляризуемости не зависит от температуры. Тепловое движение молекул неполярных диэлектриков не сказывается на возникновении индуцированных дипольных

моментов. Молекулы с такими дипольными моментами подобны квазиупругим (индуцированным) диполям.

Полярным диэлектриком называется такой диэлектрик, молекулы которого имеют электроны, расположенные несимметрично относительно своих ядер (H_2O , HCl и др.). В таких молекулах центры тяжести положительных и отрицательных зарядов не совпадают, находясь, практически, на постоянном расстоянии друг от друга. Молекулы полярных диэлектриков по своим электрическим свойствам подобны жестким диполям, у которых имеется постоянный дипольный момент:

$$p_e = \text{const.}$$

Жесткий диполь, помещенный в однородное внешнее электростатическое поле, испытывает действие пары сил с моментом M равным:

$$M = [p_e E].$$

Момент пары сил направлен перпендикулярно к плоскости, проходящей через векторы p_e и E , причем момент M стремится повернуть диполь так, чтобы векторы p_e и E были параллельны друг другу.

В реальных молекулах полярных диэлектриков помимо поворота осей диполей вдоль поля происходит деформация молекул, и в них создается некоторый индуцированный дипольный момент.

Если полярный диэлектрик не находится во внешнем электрическом поле, то в результате хаотического теплового движения молекул векторы их дипольных моментов ориентированы хаотически. Поэтому в любом физически бесконечно малом объеме ΔV сумма дипольных моментов всех молекул равна нулю. (При этом $\Delta V \gg v_0$, где v_0 - объем одной молекулы, и в объеме ΔV содержится весьма большое число молекул).

В неполярном диэлектрике, не находящемся во внешнем электрическом поле, вообще не могут возникнуть дипольные индуцированные моменты молекул. При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле происходит поляризация диэлектрика, состоящая в том, что в любом элементарном объеме ΔV возникает суммарный дипольный момент молекул, отличный от нуля. Диэлектрик, который находится в таком состоянии, называется поляризованным (поляризованный диэлектрик). В зависимости от строения молекул (атомов) диэлектрика различается три типа поляризации:

а) ориентационная поляризация в полярных диэлектриках. Внешнее электрическое поле стремится ориентировать моменты жестких диполей вдоль направления электрического поля. Этому препятствует

хаотическое тепловое движение молекул, стремящееся произвольно «разбросать» диполи. В итоге совместного действия поля и теплового движения возникает преимущественная ориентация дипольных электрических моментов вдоль поля, возрастающая с увеличением напряженности электрического поля и с уменьшением температуры;

б) электронная (деформационная) поляризация в неполярных диэлектриках. Под действием внешнего электрического поля в молекулах диэлектриков этого типа наводятся индуцированные дипольные моменты, направленные вдоль поля. Тепловое движение молекул не оказывает влияния на электронную поляризацию.

в) ионная поляризация в твердых диэлектриках, имеющих ионные кристаллические решетки. Внешнее электрическое поле вызывает смещения всех положительных ионов в направлении напряженности E , а всех отрицательных ионов - в противоположную сторону.

Количественной мерой поляризации диэлектрика является вектор поляризации \vec{P}_e . Вектором поляризации называется отношение электрического дипольного момента малого объема ΔV диэлектрика к величине этого объема:

$$\vec{P}_e = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{P}_{ei},$$

где \vec{P}_{ei} - электрический дипольный момент i -й молекулы; n - общее число молекул в объеме ΔV .

Этот объем должен быть настолько малым, чтобы внутри него электрическое поле можно было считать однородным. Одновременно число n молекул в объеме ΔV должно быть достаточно велико для того, чтобы можно было применять статистические методы исследования.

Когда диэлектрик используется в цепи переменного тока, он оказывает определенное противодействие току, которое называется емкостным сопротивлением. Емкостное сопротивление, подобно индуктивному сопротивлению, противодействует протеканию тока, но только в цепи переменного тока. Оно измеряется в омах и зависит от частоты переменного тока и от поляризуемости диэлектрика. Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте (f) и емкости (C). Это емкостное сопротивление может быть рассчитано при помощи формулы:

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}.$$

Обычно диэлектрики в виде конденсаторов комбинируются с резисторами и другими компонентами в различные последовательные и параллельные цепи для создания фильтров, фазовращателей, и цепей связи. Напряжение синусоидальной формы прикладывается к

резистору и конденсатору, включенным последовательно. Полное противодействие протеканию тока в этой цепи является комбинацией емкостного сопротивления и активного сопротивления. Резисторы и конденсаторы функционируют различным образом, и поскольку конденсатор порождает сдвиг фаз в цепи на 90 градусов, то нельзя непосредственно складывать сопротивление резистора и емкостное сопротивление, чтобы подсчитать общее сопротивление протеканию тока, которое называется полным сопротивлением или импедансом. Для получения полного сопротивления используется приведенная ниже формула:

$$Z = \sqrt{(R)^2 + (X_c)^2} .$$

В последовательной цепи один и тот же ток протекает через все компоненты. Это означает, что ток через конденсатор имеет ту же величину, что и через резистор, причем эта величина равна току, потребляемого от источника напряжения. Так как значение тока общее для всех компонентов, мы можем использовать закон Ома и умножить величину тока на величину сопротивления, емкостного сопротивления и полного сопротивления, чтобы вычислить напряжения в цепи. Тогда:

$$IR = V_r ;$$

$$IX_c = V_c ;$$

$$IZ = V_s .$$

Согласно закону Кирхгофа сумма падения напряжения на компонентах последовательной цепи равна напряжению источника питания. Следовательно, при суммировании напряжения на резисторе и напряжение на конденсаторе, мы должны получить напряжение источника питания. Однако, напряжения не совпадают по фазе друг с другом, по этой причине напряжения не могут складываться друг с другом непосредственно. Напряжение источника питания можно определить следующим образом:

$$V_s = \sqrt{(V_R)^2 + (V_c)^2} .$$

Таким образом, используя аналитическое выражение для напряжения источника питания можно рассчитать потери, вносимые диэлектриком при прохождении через него электрического сигнала. Изучение влияния строения диэлектриков на его поляризуемость проводится на измерительной установке, представленной на рисунке 3.1.

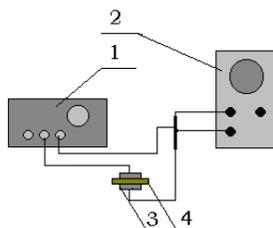


Рис. 3.1. экспериментальная установка определения поляризуемости диэлектрика:

1 – генератор низких частот; 2 – двухканальный осциллограф; 3 – измеритель емкости;
4 – анализируемый диэлектрик

Порядок выполнения работы

1. Включите измерительную установку в присутствии преподавателя или лаборанта.

2. Двухканальный осциллограф подключите к генератору низкой частоты. На первый вход осциллографа подайте сигнал с генератора, выполняющего роль опорного сигнала. Откалибруйте осциллограф по амплитуде и синхронизируйте его по частоте.

3. Подключите к устройству для измерения параметров диэлектрика измеритель ёмкости, при этом полярный диэлектрик должен находиться между пластинами. Измерьте ёмкость получившегося конденсатора.

4. Подключите вход устройства для измерения параметров диэлектрика к выходу генератора, а выход устройства – ко второму входу осциллографа. Откалибруйте по амплитуде сигнал с устройства и рассчитайте потери, вносимые диэлектриком при прохождении через него сигнала.

5. Рассчитайте сдвиг фаз между сигналами, для чего:

а) подсчитайте количество делений между двумя смежными или тремя последовательными положительными пиками синусоидальных сигналов (t_1);

б) рассчитайте смещение во времени сигнал (t) путем умножением количества делений на настройку скорости горизонтальной развертки осциллографа;

в) вычислите сдвиг фаз в градусах по следующей формуле:

$$\omega = 360 t_1/t.$$

6. Поместите в зажимы устройства неполярный диэлектрик. Измерьте ёмкость получившегося конденсатора.

7. Подключите вход устройства для измерения параметров диэлектрика к выходу генератора, а выход устройства – ко второму входу осциллографа. Откалибруйте по амплитуде сигнал с устройства и рассчитайте потери, вносимые неполярным диэлектриком при

прохождении через него сигнала. Сравните эти потери с потерями полярного диэлектрика.

8. Рассчитайте сдвиг фаз между сигналами и сравните данные с показателями для полярного диэлектрика.

9. Прделайте измерения на различных частотах, результаты занесите в таблицу 3.1. Проанализируйте изменение проводимости и смещения фаз в зависимости от частоты.

Таблица 2.1. Экспериментальные данные

№	Наименование диэлектрика	V_s	C, Φ	t	t_1	$\omega, ^\circ$
1						
2						
3						

Содержание отчёта

1. Название, цель работы, приборы и принадлежности.
2. Схема измерительной установки.
3. Порядок выполнения работы, таблицы результатов измерений и вычислений.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Классификация диэлектриков по поляризуемости.
2. Применение диэлектрических материалов в электротехнике и радиотехнике.
3. Процесс поляризации диэлектрика.
4. Параметры, влияющие на поляризуемость диэлектрика.

Литература: [3].

Лабораторная работа №3

Исследование электропроводности твердых диэлектриков

Цель работы: освоить методику экспериментального определения удельных объемного и поверхностного сопротивлений диэлектриков и изучить влияние температуры на их электропроводность.

Приборы и принадлежности: установка для измерения электросопротивления диэлектриков; набор диэлектриков.

Методические указания

Через диэлектрик, помещенный в постоянное электрическое поле, протекает электрический ток, который складывается из двух составляющих: тока поляризации и тока сквозной проводимости.

Поляризацией называют состояние диэлектрика, характеризующееся наличием электрического момента у любого элемента его объема.

Различают поляризацию, возникающую под действием внешнего электрического поля, и спонтанную (самопроизвольную), существующую в отсутствие поля. В некоторых случаях поляризация диэлектриков появляется под действием механических напряжений.

Поляризационные процессы смещения любых зарядов в веществе, протекая во времени до момента установления и получения равновесного состояния, обуславливают появление поляризационных токов (токов смещения) в диэлектрике. У большинства диэлектриков эти токи настолько кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. При замедленных видах поляризации, наблюдаемых у многих технических диэлектриков, токи смещения могут существовать в течение нескольких десятков секунд и более. Эти токи называют токами абсорбции $J_{аб}$.

Токи сквозной проводимости обусловлены наличием в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов – электронов, ионов. Полная плотность тока в диэлектрике, называемого током утечки, представляет собой сумму плотностей токов абсорбционного и сквозного:

$$J_{ум} = J_{аб} + J_{скв}.$$

После завершения процессов поляризации через диэлектрик проходит только сквозной ток. Проводимость диэлектрика при постоянном напряжении определяется по сквозному току. При переменном напряжении активная проводимость определяется не только сквозным током, но и активными составляющими поляризационных токов.

В соответствии с законом Ома, сопротивление диэлектрика, находящегося под действием постоянного электрического поля, определяется:

$$R_S = \frac{U}{J_{скв}},$$

где $J_{скв}$ – сквозной установившийся ток, А; U – приложенное напряжение, В.

За величину $J_{скв}$ принимают установившийся ток после завершения поляризации при постоянном напряжении.

У твердых изоляционных материалов различают объемное R_V и поверхностное R_S электросопротивления. Полное электросопротивление диэлектрика определяется:

$$R_{\pi} = \frac{R_V \cdot R_S}{R_V + R_S}.$$

Для сравнительной оценки объемной и поверхностной электропроводности разных диэлектрических материалов используют удельное объемное ρ_V удельное поверхностное ρ_S сопротивления.

Удельное объемное сопротивление ρ_V численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, если ток проходит через две противоположные грани этого куба.

В случае плоского образца материала при однородном поле удельное объемное сопротивление рассчитывают по формуле:

$$\rho_V = R_V \frac{S}{h},$$

где R_V – объемное сопротивление, Ом; S – площадь электрода, м; h – толщина образца, м.

Если в приборе электроды круглые и разного диаметра, то за S принимается площадь меньшего электрода, диаметром d . Тогда формула определения удельного объемного электросопротивления:

$$\rho_V = R_V \frac{\pi d^2}{4h}.$$

Удельное поверхностное сопротивление ρ_S численно равно сопротивлению квадрата материала со стороной в 1 м, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата (ρ_S выражают в Ом):

$$\rho_S = R_S \frac{a}{l},$$

где R_S – поверхностное сопротивление образца материала между параллельно поставленными электродами; a – длина электродов, м; l – расстояние между электродами, м.

В приборах обычно применяют два круглых и один кольцевой (охранный) электрода. В таком случае для расчета удельного поверхностного сопротивления пользуются формулой:

$$\rho_S = R_S \frac{\pi(d + D)}{d - D},$$

где D – диаметр внутреннего электрода, см; d – внутренний диаметр кольцевого («охранного») электрода, см.

Величина объемного и поверхностного удельного сопротивления зависит от многих факторов: от температуры, плотности, строения молекул диэлектрика величины и длительности приложенного

напряжения. При длительной работе под напряжением сквозной ток через диэлектрик с течением времени может уменьшаться или увеличиваться. Уменьшение сквозного тока со временем говорит о том, что электропроводность материала была обусловлена ионами посторонних примесей и уменьшалась за счет электрической очистки образца. Увеличение тока со временем свидетельствует об участии в нем зарядов, которые являются структурными элементами самого материала и о протекающем в диэлектрике необратимом процессе старения под напряжением, способном привести к разрушению – пробоем диэлектрика.

Как правило, удельное объемное и поверхностное сопротивления неполярных диэлектриков гораздо больше, чем у полярных. С увеличением температуры и влажности они снижаются у неполярных диэлектриков незначительно, тогда как у полярных очень сильно. Величина приложенного напряжения для твердых и жидких диэлектриков имеет значение лишь при напряженностях поля превышающих 104...105 В/см. При этом у них наблюдается отклонение от линейного закона и переход к экспоненциальной зависимости. С увеличением времени приложения напряжения электросопротивление диэлектриков уменьшается в результате ускоренного процесса старения.

Поверхностное удельное электросопротивление зависит еще от чистоты обработки поверхности диэлектриков, так как чем чище обработка поверхности, тем меньше она адсорбирует влаги и токопроводящих примесей.

Измерение удельных объемного и поверхностного электросопротивлений проводится на установке (рис. 4.1).

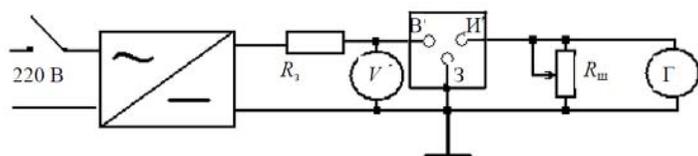


Рис. 4.1. Электрическая схема установки для измерения объемного и поверхностного сопротивления:

Г – гальванометр; R_1 – защитное сопротивление; $R_{ш}$ – шунт гальванометра; R_x – клеммы для присоединения высоковольтного «В»; измерительного «И» и охранного (заземляющего) «З» электродов, образца

Для измерения электросопротивлений плоского образца применяется устройство, состоящее из трех электродов (рис. 3.2, а, б).

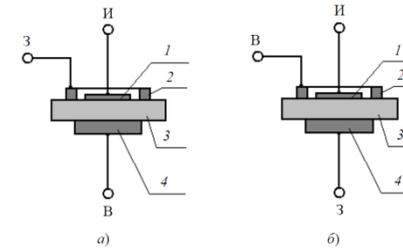


Рис. 4.2. Схема включения для измерения:

а – объемного электросопротивления; *б* – поверхностного электросопротивления

В схеме (рис. 4.2, *а*) «охранный» электрод позволяет отвести ток поверхностной утечки на землю и создать равномерное поле в образце. В схеме (рис. 4.2, *б*) «охранный» электрод отводит ток объемной проводимости на землю, минуя гальванометр.

Порядок выполнения работы

1. Включи измерительную установку в присутствии преподавателя или лаборанта.
2. Установить испытуемый диэлектрик между электродами. Подключить измерительную камеру согласно схеме рис. 4.2, *а*. Чтобы не повредить гальванометр, поставить шунт в положение «О», чтобы ток через гальванометр не проходил.
3. Включить установку в присутствии преподавателя или лаборанта. Работу проводить в резиновых перчатках, стоя на изолирующем коврике.
4. Включить выпрямитель, увеличивая плавно напряжение до 500 или 1000 В (указывается преподавателем).
5. Изменяя положение шунта, добиться удобной для отчета величины показания гальванометра.
6. Произвести отсчет показания гальванометра через одну минуту после подачи на образец напряжения. После снятия отсчета шунт немедленно поставить в положение «О».
7. Подсчитать силу тока, протекающего через гальванометр по формуле:

$$J_V = \frac{a \cdot C_d}{n},$$

где a – отклонение гальванометра, мм; C_d – динамическая постоянная гальванометра, А/мм; n – коэффициент шунтирования.

8. Подсчитать объемное электрическое сопротивление диэлектрика:

$$R_V = \frac{U}{J_V} = \frac{U n}{a \cdot C_d}.$$

9. Определить удельную объемную проводимость по формуле:

$$\gamma_V = \frac{1}{R_V} \cdot \frac{1}{F} = \frac{a \cdot C_d \cdot h}{U_n \cdot F},$$

где h – толщина диэлектрика, см; F – площадь измерительного электрода, см².

Повторить измерения и вычисления согласно пунктам 4-7 для различных образцов диэлектриков. Данные занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 Экспериментальные данные

№	Наименование материала	U, В	α , мм	n	F, см ²	H, см	C _д , А/мм	γ_V , 1/Ом·см	ρ_V , Ом·см
1									
2									
3									

10. Для определения удельной поверхностной проводимости подключить измерительную камеру согласно схемы (рис. 4.2, б).

Порядок определения γ_S такой же как при определении γ_V .

Поверхностное сопротивление R_S определяется по формуле:

$$R_S = \frac{U}{J_S}.$$

11. Подсчитать величину удельного поверхностного сопротивления:

$$\rho_S = R_S \frac{S}{l}.$$

Для электродов 1 и 4 длина пути утечки тока по поверхности диэлектрика равна ширине зазора между электродами, т.е.:

$$l = \frac{d - D}{2}.$$

Условное сечение S равно длине средней окружности диаметром

$\frac{d + D}{2}$ тогда:

$$\rho_S = R_S \frac{\pi(d + D)}{d - D},$$

12. Подсчитать величину удельной поверхностной проводимости по формуле:

$$\gamma_S = \frac{a \cdot C_d \cdot (d - D)}{\pi \cdot U_n \cdot (d + D)}.$$

Данные измерений и геометрические размеры занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2. Экспериментальные данные

№	Наименование материала	U, В	α , мм	n	D_2 , см ²	d, см	C_{λ} , А/мм	γ_s , 1/Ом·см	ρ_s , Ом·см
1									
2									
3									

Содержание отчёта

1. Название, цель работы, приборы и принадлежности.
2. Электрическая схема установки для измерения объемного и поверхностного сопротивления и схемы подключения электродов для измерения γ_v и γ_s .
3. Порядок выполнения работы и таблицы результатов измерений и вычислений.

Контрольные вопросы

1. Какие виды электропроводности наблюдаются в твердых диэлектриках?
2. Какие факторы влияют на объемную удельную проводимость?
3. Почему принято определять сопротивление на постоянном напряжении?

Литература: [3]

Лабораторная работа №5

Влияние геометрических параметров кварцевой пластины на частотную характеристику кварцевого резонатора

Цель работы: ознакомиться с устройством, технологией изготовления и принципом работы кварцевых резонаторов, получить амплитудно - частотную характеристику резонаторов, пластины которых имеют различные геометрические размеры.

Приборы и принадлежности: двулучевой осциллограф, низкочастотные кварцевые резонаторы, генератор низкой частоты.

Методические указания

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

Кварц является ярко выраженным пьезоэлектриком из - за того, что у кристалла отсутствуют плоскости и центр симметрии. Кристаллическая структура кварца представляет собой каркас из кремнезёмных тетраэдров (рис. 5.1).

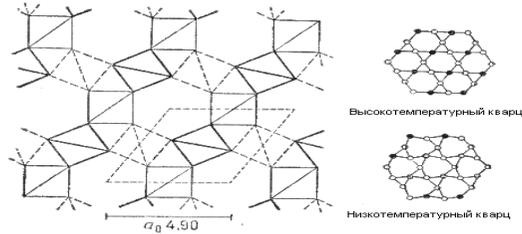


Рис. 5.1. Структура кристаллов кварца

Кремнезёмные тетраэдры расположены винтообразно с правым или левым ходом по отношению к главной оси кристалла, поэтому различают правые и левые структурно - морфологические формы кристаллов, которые различаются внешне по симметрии расположения некоторых граней (рис. 5.2).

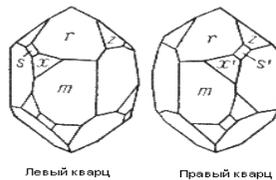


Рис. 5.2. структурно - морфологические формы кристаллов кварца

Обладая высокой температурной стабильностью и низкой долговременной нестабильностью частоты ($10^{-6} \dots 10^{-7}$), кварцевые резонаторы применяются в генераторах опорных частот, в управляемых по частоте генераторах, а также в селективных устройствах: фильтрах, частотных дискриминаторах и т. д.

Резонаторы для низкочастотной аппаратуры имеют вид, представленный на рисунке 5.3.

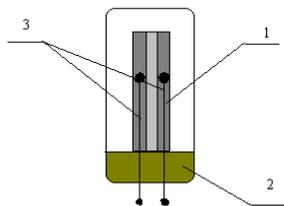


Рис. 5.3. Кварцевый резонатор для низкочастотной аппаратуры:

1 – пластина с нанесёнными контактами, 2 – электрические проводники, 3 – стеклянный корпус

Кварцевая пластина 1 закреплена в стеклянном корпусе 2. Сигнал подводится по проводникам 3. Пластины резонатора показаны на рисунке 5.4.

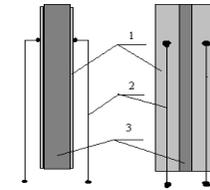


Рис. 5.4. Пластина низкочастотного кварцевого резонатора:
1 - контакты, 2 – выводы, 3 -кварцевая пластина

На основание пластины 3 нанесены контактные площадки 1, к которым припаяны проводники. Электрический сигнал подводится к паре контактов, которые расположены на одной стороне пластины (первая пара контактов). Из – за пьезоэлектрических свойств кварца пластина колеблется, и это в свою очередь приводит к возникновению разности потенциалов на пластинах, расположенных на обратной стороне пластины (вторая пара контактов).

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

Порядок выполнения работы

1. Собрать лабораторную установку для получения амплитудно – частотных характеристик резонатора (рис. 5.5).

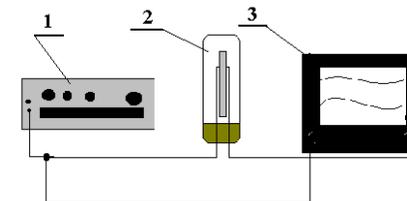


Рис. 5.5. Установка для снятия амплитудно – частотной характеристики резонатора:
1 – генератор, 2 – резонатор, 3 – двулучевой осциллограф

С выхода генератора 1 сигнал подаётся на вход “1” двулучевого осциллографа 3. На вход “2” осциллографа подаётся сигнал,

прошедший через кварцевый резонатор 2. При неизменной амплитуде сигнала (на входе “1”) с изменением частоты изменяется амплитуда сигнала на входе “2”. Это фиксируется на экране осциллографа. На частоте резонанса амплитуда сигнала на входе “2” значительно превышает первоначальную. Дальнейшее увеличение частоты приводит к уменьшению амплитуды.

2. Включи измерительную установку в присутствии преподавателя или лаборанта. Включить осциллограф и генератор и прогреть их в течение 2 - 3 минут.

3. Изменяя частоту колебаний, подаваемых на вход резонатора, определить резонансную частоту этого резонатора. Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1. Экспериментальные данные

Частота F, КГц					
Амплитуда U, В					

4. Построить график зависимости амплитуды колебаний на выходе резонатора от частоты

Содержание отчёта

1. Название, цель работы, приборы и принадлежности.
2. Схема экспериментальной установки для снятия амплитудно – частотной характеристики резонатора с пояснениями к принципу её работы.
3. Таблица зависимости амплитуды от частоты с отмеченной резонансной частотой.
4. График зависимости амплитуды от частоты.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

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

Литература: [4]

Лабораторная работа №6

Изучение строения и свойств оксидных терморезисторов

Цель работы: изучить структуру оксидных терморезисторов; построить зависимость их электропроводности от температуры; определить энергию активации и коэффициента температурной чувствительности полупроводника; оценить величину постоянной

времени тепловой инерции терморезисторов; построение динамических вольтамперных характеристик терморезисторов.

Приборы и принадлежности: мост постоянного тока Ш-34, печь нагревательная, потенциометр КВП, термопара, терморезисторы ММТ-1, СТ 4-15, КМТ-1.

Теоретические сведения

Понятие «термистор» относится к материалам, проводимость которых при нагреве сильно изменяется. Различают материалы, в которых с ростом температуры сопротивление падает. При нагревании величина сопротивления терморезисторов убывает, а позисторов возрастает в сотни и тысячи раз. В справочниках значение α_R приводится для температуры 20 °С. Значения α_R терморезисторов для любой температуры в диапазоне 20...150 °С можно определить по формуле:

$$\alpha_R = - \frac{B}{T^2} \cdot$$

Удельное электрическое сопротивление терморезисторов уменьшается с ростом температуры как в классических полупроводниках, что описывается уравнением:

$$\rho(T) = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right),$$

где $B < 0$ – коэффициент температурной чувствительности, определяющийся энергией активации процесса электропроводности; A – коэффициент, зависящий от технологии их изготовления.

На рисунке 6.1 приведен график зависимости сопротивления терморезистора от температуры.

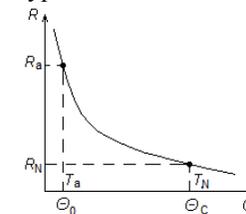
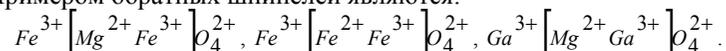


Рис. 6.1 Зависимость сопротивления оксидного терморезистора от температуры

Наряду с легированным германием, кремнием, полупроводниковыми стеклами, подавляющее число терморезисторов изготавливается во всех странах на основе оксидов переходных металлов, состав которых описывается формулой XY_2Z_4 , где X – чаще всего ион двухвалентного

металла (Zn^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+}), Y – трехвалентный металл (Al^{3+} , Mn^{3+} , Cr^{3+}), а Z – анион O_2 .

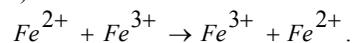
Элементарная ячейка шпинели состоит из 8-ми формульных единиц, то есть $X_8Y_{16}O_{32}$. В состав ячейки входят 32 кислородных иона, образующих ГЦК-подрешетку, в порах которой располагаются катионы. В ГЦК решетке существует два вида пустот – октаэдрические (32 в элементарной ячейке шпинели) и тетраэдрические (64 поры). В прямых шпинелях в тетра-порах располагаются двухвалентные катионы X (занято 8 из 64 позиций), а 16 из 32 окто-пор занимают трехвалентные катионы Y . Формула прямой шпинели – $X Y_2 O_4$ (или $X[Y_2]O_4$), где скобки [] показывают окто-пору. В шпинелях другого типа в окта-порах часть позиций занята двухвалентным металлом. Такие шпинели называют обратными и записывают в виде $Y[XY] O_4$. Примером обратных шпинелей являются:



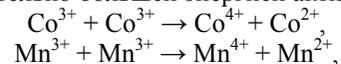
Электропроводность оксидных полупроводников нельзя объяснить с точки зрения зонной теории, используемой для классических полупроводников. В оксидных материалах действует ионная связь, в которой электроны локализованы на отдельных атомах (ионах). Процесс электропроводности состоит в перескакивании электронов от одного катиона к другому (прыжковый механизм).

Несмотря на то, что такие металлы как Fe, Mn, Co, Ni расположены в периодической системе рядом, электропроводность их оксидов сильно отличается. Так, для Fe_3O_4 при 20 °C значения σ составляет $200 \text{ Ом}^{-1} \times \text{см}^{-1}$, $Co_3O_4 - 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \times \text{см}^{-1}$, $Mn_3O_4 - 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \times \text{см}^{-1}$, а для стехиометрической закиси никеля NiO достигает $10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \times \text{см}^{-1}$. Разница в проводимости Fe_3O_4 и Mn_3O_4 связывается с характером распределения катионов по окта- и тетра-кристаллографическим позициям.

В окиси железа $Fe^{3+} [Fe^{2+} Fe^{3+}] O_4^{2-}$ в октаэдрических позициях располагаются разновалентные катионы железа, электронный обмен между которыми облегчен и протекает с незначительной энергией активации ($\Delta E = 0,05 \text{ эВ}$):



В окислах типа $Co^{2+} [Co_2^{3+}] O_4^{2-}$ и $Mn^{2+} [Mn_2^{3+}] O_4^{2-}$ между одноименными катионами окта-пор электронный обмен затруднен и сопровождается значительно большей энергией активации:



поэтому для них характерно большое сопротивление и малое значение ТКС.

Свойства терморезисторов можно описать рядом характеристик:

- а) номинальное сопротивление R_N при номинальной рабочей температуре T_N ;
- б) температурная характеристика;
- в) вольтамперная характеристика;
- г) термическая постоянная времени;
- д) переходный процесс нагрева термистора;
- е) технологический разброс характеристик сопротивления, временная стабильность.

Описываемая уравнением $R(T) = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right)$, температурная

характеристика согласуется с измерениями тем точнее, чем меньше их диапазон, что связано с температурной зависимостью коэффициента A . Для более широких диапазонов температуры T часто необходимо более точное аналитическое выражение. При этом целесообразно принять для коэффициента B квадратичную зависимость:

$$B(T) = B_a \left[1 - b(T - T_a) + c(T - T_a)^2 \right]$$

Здесь B_a – значение коэффициента B для рабочей температуры T_a ; b и c – коэффициенты.

На практике удобно выразить эту величину в виде:

$$B_a = B_N \left[1 + b(T_a - T_N) \right] = \frac{T_a T_N}{T_a - T_N} \ln \frac{R_a}{R_n},$$

где B_N соответствует номинальной рабочей точке.

Постоянная $B = \Delta \mathcal{E} / k$ носит название *коэффициент температурной чувствительности* и приводится в паспортных данных на терморезистор. Экспериментально коэффициент температурной чувствительности определяют по формуле:

$$B = \frac{T_a T_N}{T_a - T_N} \ln \frac{R_a}{R_n},$$

где T_a и T_N – исходная и конечная температуры рабочего температурного диапазона, R_a и R_N – сопротивления терморезистора при температуре соответственно T_a и T_N .

Из уравнения $R(T) = R_N \exp\left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right) \right]$ можно определить

наклон $R(T)$ -характеристики: $dR(T)/dT = -BR(T)/T^2$. Откуда с учетом

выражения для температурного коэффициента сопротивления:

$$\alpha(T) = \frac{1}{R(T)} \cdot \frac{dR(T)}{dT}.$$

В результате получаем: $\alpha = -B / T^2$.

Терморезистор характеризуется определенной тепловой инерцией, зависящей от химических свойств полупроводника и конструкции элемента. Тепловая инерция оценивается *постоянной времени* τ – временем, за которое разность между собственной температурой тела и температурой среды уменьшается в e раз. Если терморезистор, имеющий температуру θ_0 , поместить в среду с температурой $\theta_c \neq \theta_0$, то его температура будет изменяться с течением времени по показательному закону:

$$\Theta(t) = \Theta_C - (\Theta_C - \Theta_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

На рисунке 6.2 (а) показан процесс изменения температуры терморезистора при его остывании. С остыванием терморезистора сопротивление его увеличивается (рис. 6.2 б). Знание зависимостей $R(\theta)$ (рис. 6.2 а) и $R(t)$ (рис. 6.2 б) позволяет, задаваясь значениями R и определяя по кривым, представленным на рисунках 6.1 и 6.2 (б), соответствующие им значения θ и t , построить зависимость $\theta(t)$ и определить τ .

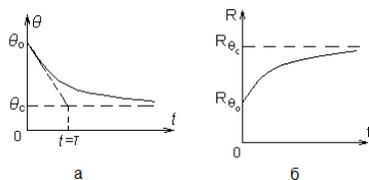


Рисунок 6.2 Процесс изменения температуры терморезистора:

а – процесс изменения температуры во времени; б – изменение сопротивления, при остывании терморезистора

Различают *статическую* и *динамическую* вольтамперные характеристики (ВАХ) терморезистора. При снятии статической ВАХ ток фиксируется после длительной выдержки терморезистора при каждом значении напряжения.

Терморезистор обладает одной статической и семейством динамических ВАХ, соответствующих ряду фиксированных длительностей Δt импульсов напряжения. ВАХ терморезистора являются нелинейными.

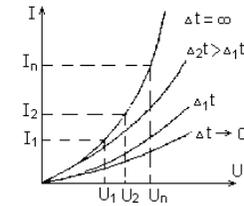


Рисунок 6.3 Динамические ВАХ терморезистора

При длительности импульса $\Delta t \rightarrow 0$ терморезистор не успевает нагреться и сопротивление его практически не изменяется с ростом напряжения. При длительности $\Delta t > 0$ терморезистор нагревается, и ВАХ становится существенно нелинейной. Чем больше длительность импульса, тем больше ток при одной и той же величине напряжения.

Порядок выполнения работы

1. Выданные преподавателем терморезисторы (один – системы NiMn2O4, другой – CuMn2O) установить в зажимы электроконтактного устройства для измерения электросопротивления и поместить их в масляную ванну-термостат нагревательной печи (рис. 6.4).

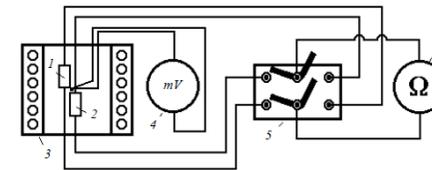


Рисунок 6.4 Схема установки для изучения параметров терморезисторов:
1,2 – образцы; 3 – печь; 4 – потенциометр; 5 – ключ; 6 – омметр

2. Включить потенциометр КВП и измерить начальную температуру образцов после одной минуты выдержки в термостате.
3. Включить мост Щ-34 и измерить начальное сопротивление обоих терморезисторов, переключая цепь измерения с помощью ключа 5.
4. Включить питание электропечи 3.
5. Снять зависимость сопротивления терморезисторов от температуры в диапазоне 20...100 °С с шагом температуры 10 °С. Данные занести в таблицу

Таблица 6.1. Экспериментальные данные

T, °C	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R, Ом									

6. Построить график температурной характеристики терморезисторов $R = f(T)$.

7. Определить номинальное электросопротивление R_N , коэффициент температурной чувствительности B , температурный коэффициент

сопротивления и энергию активации процесса электропроводности $\Delta E = Bk$.

8. Определить тепловую постоянную времени терморезистора, для этого измерив сопротивление терморезистора при $90\text{ }^\circ\text{C}$, быстро извлечь его из термостата. Момент извлечения принять за $t = 0$. Отключить термостат. Фиксируя время, измерять сопротивление терморезистора при его остывании с помощью потенциометра до тех пор, пока оно не увеличится примерно в три раза. Данные измерений занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2. Экспериментальные данные

$t, \text{с}$	0	10	20	30	40	50	60	70
$R, \text{Ом}$								

9. Построение динамической вольтамперной характеристики. Собрать электрическую схему измерительной установки, показанной на рисунке 6.5.

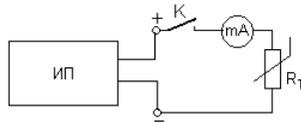


Рисунок 6.5 Измерительная установка по снятию ВАХ оксидного терморезистора

Установить напряжение на выходе источника питания равное 5В. Замкнув ключ К, записать показания миллиамперметра в начальный момент времени и далее через каждые 10 секунд. Через 60 с ключ разомкнуть. Перед следующим измерением выдержать паузу для охлаждения терморезистора. Повторить измерения для напряжений 10-30 В. Длительность паузы с ростом напряжения следует увеличивать. Результаты опыта занести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3. Экспериментальные данные

U, В	i (мА) через Δt с				Примечание
	$t = 0$	10	20	30	
5					Тип резистора

Содержания отчета

1. Название, цель работы, приборы и принадлежности. Схемы измерительной и экспериментальной установок.
2. Порядок выполнения работы.
3. График температурной характеристики терморезисторов $R = f(T)$, расчет значений α , R_N , B , ΔE для каждого значения показаний терморезистора.
4. Графическую зависимость $\alpha = f(\theta)$.
5. Определить постоянную времени τ тепловой инерции терморезистора.

6. Построить динамическая вольтамперная характеристика терморезистора.
8. Сделать соответствующие выводы.

Контрольные вопросы

1. Структура и механизм электропроводности оксидных терморезисторов.
2. Рабочие характеристики оксидных терморезисторов.
3. Требования, предъявляемые к электрофизическим и физико-химическим свойствам терморезисторов.
4. Что такое коэффициент температурной чувствительности, как его можно определить экспериментально?
5. Почему терморезисторы обладают отрицательным температурным коэффициентом сопротивления?
6. Что такое постоянная времени терморезистора, отчего зависит ее величина?
7. Как практически можно определить постоянную времени терморезистора?

Литература: [5]

Лабораторная работа №7

Влияние пластической деформации на магнитные свойства магнитомягких материалов

Цель работы: изучить влияние частоты на потери в магнитомягких материалах (электротехническая сталь), а также воздействие пластической деформации (изгиб и сжатие) на магнитные свойства пермаллоев.

Приборы и принадлежности: образцы электротехнической стали и пермаллоя различных марок, измерительные приборы, микрометр, минипресс.

Методические указания

Все магнитные материалы подразделяются на:

- 1) магнитомягкие,
- 2) магнитотвердые.

Магнитотвердые материалы характеризуются высокой коэрцитивной силой ($H_c \geq 4$ кА/м) и применяются для изготовления постоянных магнитов. В радиотехнике гораздо шире применяются *магнитомягкие материалы*. Они характеризуются высокой магнитной проницаемостью, небольшой коэрцитивной силой ($H_c < 4$ кА/м) и малыми потерями на гистерезис. Их можно разделить на 3 группы:

1) металлические магнитные материалы (железо и его сплавы) – применяются в основном в звуковом диапазоне частот. Наиболее высокочастотный металлический магнитный материал – пермаллой;

2) магнитодиэлектрики;

3) ферриты.

Все магнитомягкие материалы имеют узкую петлю гистерезиса (они обладают малым запасом магнитной энергии и легко перемагничиваются), магнитная проницаемость в слабых и сильных полях велика. Из магнитомягких материалов изготавливают сердечники дросселей и трансформаторов электронных узлов.

Электротехнические стали (сплав железа и кремния (до 4,8 %)) имеют петлю гистерезиса с большим значением индукции и высокую магнитную проницаемость (до 100 000 и более) на низких частотах. Стали выпускаются в виде тонкого листа и лент толщиной от 0,05 до 1 мм.

Потери в магнитомягких материалах зависят от частоты f , толщины d , удельного сопротивления ρ и могут быть выражены формулой вида

$$P_{\Sigma} = \frac{f^2 \cdot d^2}{\rho}$$

Таким образом, на относительно высоких частотах (более 10 КГц) стали применять нельзя из-за резко возрастающих потерь на вихревые токи.

Увеличение удельного сопротивления достигается легированием стали кремнием, который снижает потери на гистерезис, увеличивает μ в слабых и средних полях, снижает магнитострикцию, т.е. изменение размеров сердечника под воздействием магнитного поля, увеличивает твердость, прочность на растяжение, однако придает стали хрупкость. У сталей $\mu = 6000 \dots 8000$ (может достигать 200 000). Электротехнические стали очень чувствительны к механическим воздействиям. Поэтому после механической обработки (резки, штамповки) их подвергают отжигу.

Железоникелевые сплавы (пермаллои) обладают большой индукцией и высокой магнитной проницаемостью в слабых полях, т.е. узкой и крутой петлей гистерезиса. Их используют в малогабаритных трансформаторах и импульсных устройствах, в сердечниках магнитных головок аппаратуры магнитной записи и т.д.

Пермаллои подразделяют на:

1) высоконикелевый пермаллой (никеля до 80 %) – он имеет большое значение μ и ρ , поэтому имеет малые потери на вихревые токи. Это – тонкий пермаллой марок 79НМ и 80НХС;

2) низколегированный пермаллой (никеля до 50 %) имеет меньше μ , но сопротивление еще выше. Марки такого пермаллоя – 45Н и 50Н,

имеют большую максимальную индукцию $\mu_{\max} = 18\,000$ и применяется для изготовления магнитопроводов малогабаритных трансформаторов, дросселей.

С предприятий пермаллои выходят в виде полос, сматываемых в рулоны. Все магнитомягкие материалы, и особенно пермаллои, очень чувствительны к механическим воздействиям. При наклепе, возникающем в результате транспортировки и изготовления из пермалловых лент изделий, резко ухудшаются магнитные свойства. Изменение магнитных свойств можно определить при помощи измерительной установки.

Порядок выполнения работы

1. Собрать измерительную установку для определения коэрцитивной силы магнитомягких материалов (рис. 7.1).
2. Измерить микрометром начальную толщину пластины H_0 .
3. Установить образец на подающую пластину.

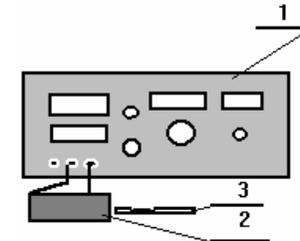


Рис. 7.1 Установка для измерения магнитных свойств:

1 – высокочастотный измеритель индуктивности; 2 – измерительная катушка; 3 – подающая пластина

4. Ввести пластину с образцом в катушку и добиться наибольшей частоты звукового сигнала путем перемещения пластины внутри катушки.

5. Сбалансировать измеритель индуктивности и записать полученное значение L_0 .

6. Поместить пластину под мини-пресс и дать нагрузку 20 кг (рис. 7.2).

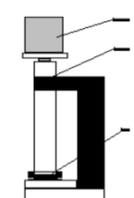


Рис. 7.2 Мини – пресс для нагружения пермалловой пластины:

1 – нагрузка; 2 – мини – пресс; 3 – пермалловая пластина

7. Измерить толщину пластины после нагружения H_d , рассчитать степень деформации ε по формуле $\varepsilon = (H_0 - H_d) / H_d$.

8. Измерить индуктивность катушки с внесенным деформированным образцом, записать значение индуктивности L . Опыт повторить три раза.

9. Поместить пластину под мини-пресс и дать нагрузку 30 кг, повторить действия согласно пунктам 7, 8.

10. Рассчитать среднее значение индуктивности каждого ε_i .

11. Определить значение магнитной проницаемости для каждого ε_i по формуле $\mu = AL$, где $A = 2,25 \times 10^6$, Гн⁻¹ – постоянная измерительной установки.

12. Записать полученные результаты в таблице 7.1.

Таблица 7.1 Экспериментальные данные

№	H_0 , мм	H_d , мм	ε	L_1 , Гн	L_2 , Гн	L_3 , Гн	\bar{L} , Гн	μ
1								
2								
3								

13) Построить графическую зависимость магнитной проницаемости μ от степени пластической деформации ε пермаллоя.

Содержание отчёта

1. Название, цель работы, приборы и принадлежности.
2. Схема измерительной установки для определения характеристик пермаллоя.
3. Порядок выполнения работы, таблицы результатов измерений и вычислений.
4. графическая зависимость магнитной проницаемости от степени пластической деформации пермаллоя.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Классификация магнитных материалов.
2. Применение магнитомягких материалов в радиоэлектронике.
3. Типы магнитомягких материалов.

Литература: [6]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Епифанов, Г.И. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ЭВА / Г.И. Епифанов, Ю.А. Мома. – М.: Советское радио, 1979. – 352 с.
2. Щука, А.А. Функциональная электроника : учебник для вузов. – М. : МИРЭА, 1998.
3. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – СПб. : Лань, 2001. – 368 с.
4. Кравченко, А.Ф. Физические основы функциональной электроники: учебное пособие. – Новосибирск : Изд-во Новосиб. ун-та, 2000.
5. Шефтель, И.Т. Терморезисторы / И.Т. Шефтель. – М. : Наука, 1973. – 415 с.
6. Электротехнические и конструкционные материалы / под ред. В.А. Филикова. – М. : Высш. шк., 2000. – 280 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Изучение p-n перехода
2. Определение световых и электрических характеристик светодиода и фототранзистора
3. Изучение влияния строения диэлектрика на его поляризуемость
4. Исследование электропроводности твердых диэлектриков
5. Влияние геометрических параметров кварцевой пластины на частотную характеристику кварцевого резонатора
6. Изучение строения и свойств оксидных терморезисторов
7. Влияние пластической деформации на магнитные свойства магнитомягких материалов