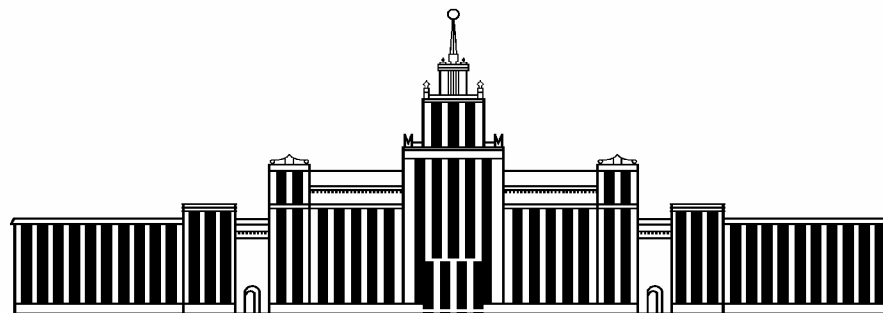

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

537.6/.8(07)

Ш957

А.А. Шульгинов, Д.Г. Кожевников

ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА

Учебное пособие для выполнения
лабораторных работ

Челябинск
2011

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра общей и экспериментальной физики

537.6/.8(07)
Ш957

А.А. Шульгинов, Д.Г. Кожевников

ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА

Учебное пособие для выполнения
лабораторных работ

Под редакцией А.А. Шульгинова

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2011

УДК 537.8(075.8)+539.2(075.8)
Ш957

Одобрено
учебно-методической комиссией
физического факультета

Рецензенты:
д.х.н., проф. А.В. Толчев, А.В. Шушарин

Шульгинов, А.А.
Ш957 Физика твёрдого тела: учебное пособие для выполнения лабораторных работ / А.А. Шульгинов, Д.Г. Кожевников; под ред. А.А. Шульгинова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 69 с.

Учебное пособие написано в соответствии с программой по физике твёрдого тела. Предназначено для подготовки к выполнению лабораторных работ и обработки результатов физического эксперимента. Содержит описание семи лабораторных работ. В каждой работе приводятся сведения по теории, необходимые для экспериментальных исследований. Особое внимание уделяется оценке погрешностей измеряемых величин и правильности оформления отчётов по лабораторным работам.

УДК 537.8(075.8)+539.2(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Главными задачами лабораторных работ являются экспериментальное подтверждение основных законов физики твёрдого тела, закрепление и совершенствование навыков работы с электроизмерительными приборами, обработка и анализ результатов экспериментов, оценка погрешностей измерений.

Основные правила техники безопасности

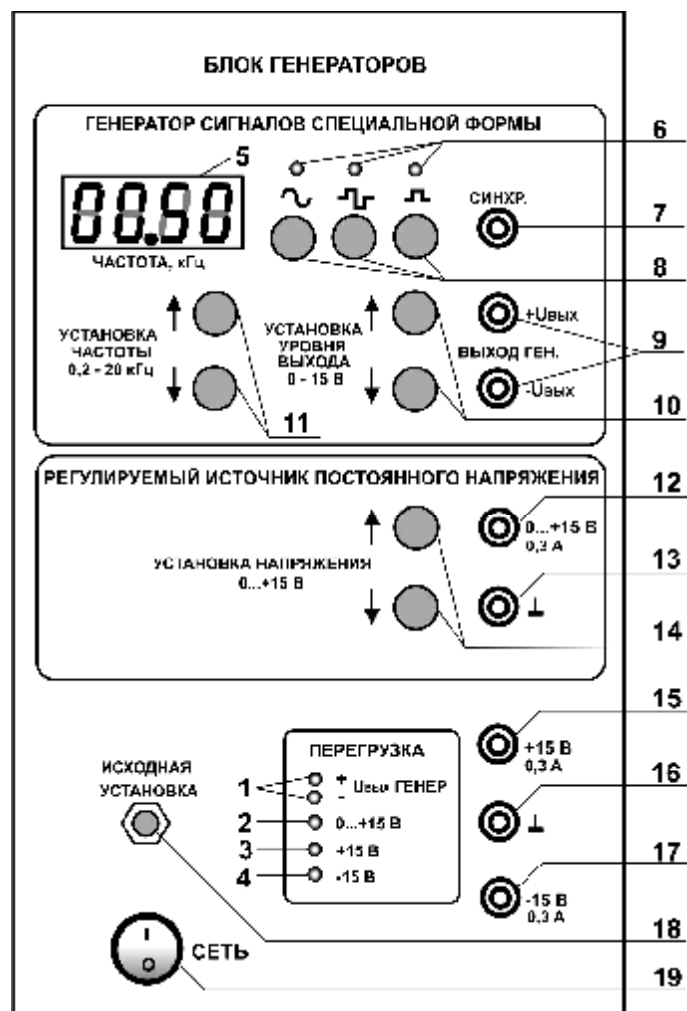
Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ

Для обеспечения безопасности выполнения работ, сохранности оборудования и измерительных приборов необходимо соблюдать следующие правила:

- а Студент имеет право приступить к лабораторной работе только после разрешения преподавателя.
- а Работа выполняется только с предназначенными для неё приборами, пользоваться приборами с других лабораторных работ не разрешается.
- а Перед началом работы оценить диапазон измеряемых величин и установить соответствующие пределы измерений приборов. Если порядок измеряемой величины неизвестен, то приборы установить на максимальный предел измерений.
- а Реостаты, кроме включенных в режим потенциометра, установить на максимальное сопротивление.
- а Выключатели и переключатели перед выполнением работы должны быть разомкнуты.
- а Держать схему под напряжением длительное время нельзя, цепь замыкать только на время измерений.
- а Категорически запрещается прикасаться руками к элементам схемы, если она находится под напряжением. Изменения в схеме можно делать только после выключения питания.
- а После окончания работы и проверки преподавателем полученных результатов отключить питание и рабочее место привести в порядок.

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ»

Комплекс состоит из блока генераторов напряжений, наборного поля, блока мультиметров, блока моделирования полей, набора миниблоков и набора слабопроводящих пластин с электродами.



Общий вид блока генераторов напряжений показан на рис. 1. Блок состоит из генератора сигналов специальной формы, регулируемого источника постоянного напряжения и двух нерегулируемых источников стабилизированного постоянного напряжения.

Рис. 1. Блок генераторов напряжений:

- 1 – индикатор перегрузки генератора сигналов специальной формы;
- 2 – индикатор перегрузки регулируемого источника постоянного напряжения «0 ... 15 В»;
- 3 – индикатор перегрузки стабилизированного напряжения +15 В»;
- 4 – индикатор перегрузки стабилизированного напряжения «15 В»;
- 5 – индикатор частоты;
- 6 – индикатор выбранной формы сигнала;
- 7 – выход синхронизации осциллографа (прямоугольные импульсы «+5 В»);
- 8 – кнопки переключения формы

сигнала:

- синусоидальная;
- биполярные импульсы -15 В», «+15 В»;
- унисполярные импульсы «+10 В»;
- 9 – выходное напряжение генератора сигналов специальной формы;
- 10 – кнопки регулировки амплитуды напряжения генератора сигналов специальной формы;
- 11 – кнопки регулировки частоты;
- 12 – регулируемое напряжение питания : «0...+15 В», максимально допустимый ток 0,3 А;
- 13 – нулевой выход (земля);
- 14 – кнопки регулировки постоянного напряжения;
- 15 – стабилизированное напряжение «+15 В», максимально допустимый ток 0,3 А;

- 16 – нулевой выход (земля);
- 17 – стабилизированное напряжение «–15 В», максимально допустимый ток 0,3 А;
- 18 – кнопка исходной установки блока генераторов:
выход источника постоянного напряжения – 0 В;
выходное напряжение генератора сигналов специальной формы – синусоидальное, частота 500 Гц, амплитуда 0 В;
- 19 – выключатель питания («сети»)

Генератор сигналов специальной формы (ГССФ)

Генератор (рис. 1) предназначен для получения напряжений частотой от 0,2 до 20 кГц различной формы и регулируемой амплитуды. Генератор может выдавать три вида напряжений: синусоидальное (амплитуда –15...+15 В), биполярные импульсы (амплитуда –15...+15 В, длительность импульса равна половине периода), униполярные импульсы (0...+15 В, длительность импульса равна половине периода). Установку формы сигнала осуществляют кнопками 8. Амплитуду выходного напряжения (выход 9) регулируют кнопками 10, а частоту – кнопками 11. Значение частоты отображается на индикаторе 5. Для получения стабильного изображения формы выходного напряжения на осциллографе в генераторе предусмотрены импульсы синхронизации (прямоугольные, заданной частоты, амплитудой +5 В, длительность импульса равна половине периода), которые можно снимать с выхода 7.

Генератор имеет защиту от перегрузки и индикаторы перегрузки 1. В случае срабатывания любого из индикаторов перегрузки необходимо выключить блок из сети и выяснить причину срабатывания: проверить схему, уменьшить регулируемое напряжение.

Регулируемый источник постоянного напряжения (РИПН)

Источник (рис. 1) предназначен для получения стабилизированного постоянного напряжения –15 В, +15 В (необходимого для работы интегратора тока, вакуумной лампы и датчика Холла), и регулируемого постоянного напряжения 0...+15 В, которое регулируют кнопками 14. Генератор имеет защиту от перегрузки и индикаторы перегрузки 2, 3, 4. В случае срабатывания любого из индикаторов перегрузки необходимо выключить блок из сети и выяснить причину срабатывания: проверить схему, уменьшить регулируемое напряжение.

Наборное поле

Наборное поле (рис. 2) предназначено для сборки электрических схем. Линии на наборном поле показывают электрически соединённые гнезда.

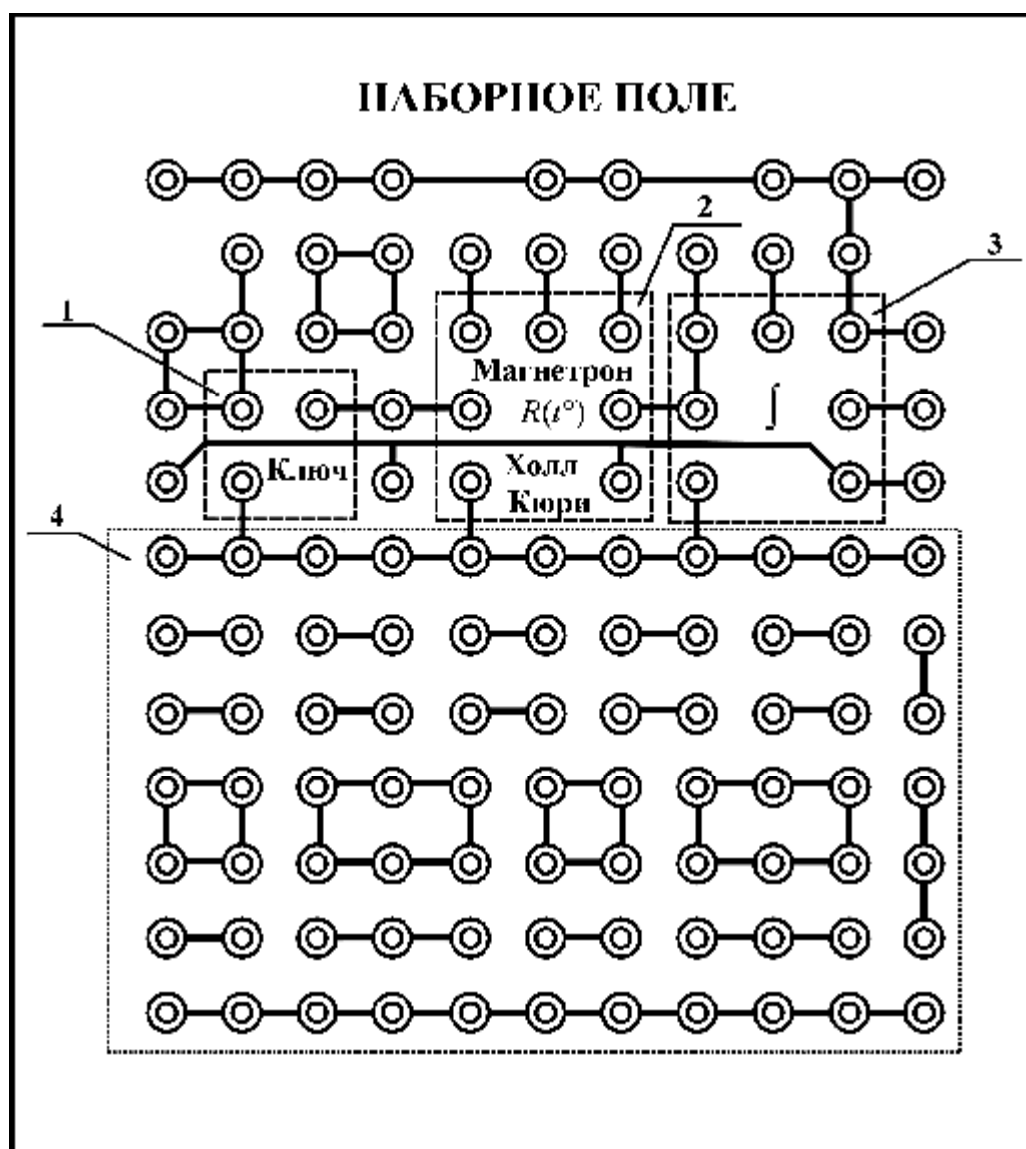


Рис. 2. Наборное поле:

- 1 – место для подключения миниблока «Ключ»;
- 2 – место для подключения миниблоков «Исследование температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника», «Эффект Холла», «Ферромагнетик», «Магнетрон»;
- 3 – место для подключения миниблока «Интегратор тока»;
- 4 – поле для подключения миниблоков

Блок мультиметров

Блок мультиметров состоит из двух мультиметров с источниками питания. Мультиметр предназначен для измерения постоянного и переменного напряжений, постоянного и переменного токов, сопротивления, электроёмкости и температуры. Общий вид мультиметра представлен на рис. 3.

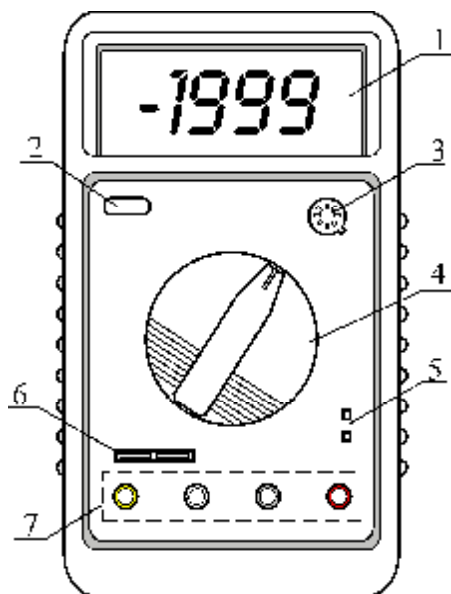


Рис. 3. Общий вид мультиметра:
 1 – дисплей; 2 – выключатель питания; 3 – гнездо для проверки транзисторов; 4 – переключатель режимов (рис. 4); 5 – разъем для подключения термопары; 6 – разъем для подключения конденсатора; 7 – входы для измерения тока, напряжения, сопротивления (рис. 5)

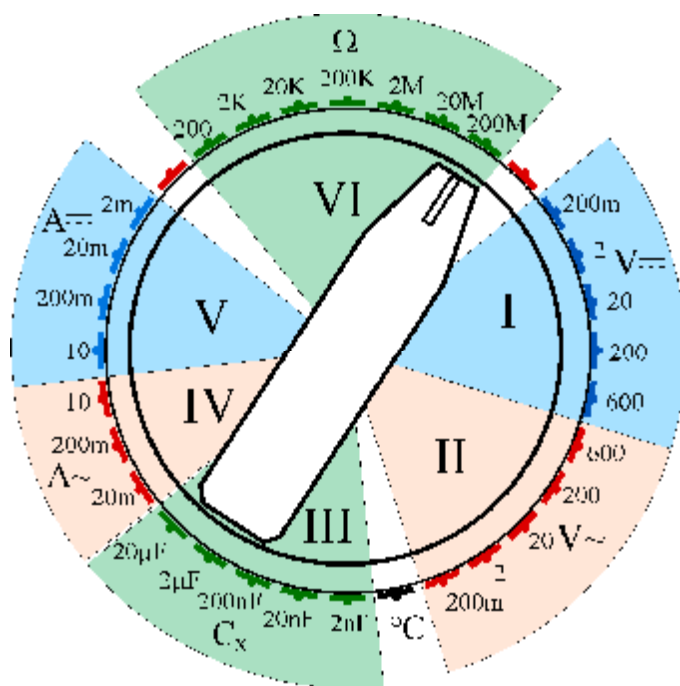


Рис. 4. Переключатель режимов

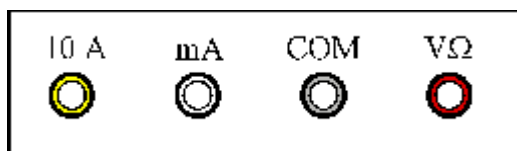


Рис. 5. Измерительные входы мультиметра:
10 A – вход для измерения тока до 10 А;
mA – вход для измерения тока до 200 мА;
COM – общий вход («земля»);
VΩ – вход для измерения напряжения и сопротивления

При использовании прибора необходимо соблюдать следующие правила:
 1. Перед вращением переключателя режимов для выбора измеряемой величины отсоедините провода от схемы.

2. Если значение измеряемой величины неизвестно заранее, установите переключатель режимов в положение, соответствующее наибольшему значению.

3. Появление на дисплее цифры «1» является индикатором перегрузки прибора и указывает на то, что следует увеличить диапазон измерений.

Внимание! Если положение переключателя режимов не изменяют в течение 40 минут, мультиметр автоматически выключается. Для продолжения работы необходимо дважды нажать кнопку 2 (рис. 3).

Измерение напряжения

Подсоедините один провод к входу **COM** (рис. 5), второй к входу **VW**. Установите переключатель режимов (рис. 4) в положение **V $\overline{\sim}$** (область I) для измерения постоянного напряжения или в положение **V $\sim$** (область II) для измерения переменного напряжения с учётом требуемого диапазона измерений. Подсоедините провода к точкам электрической цепи, между которыми измеряется напряжение.

Диапазоны измерения переменного и постоянного напряжения $U = 0,2; 2; 20; 200; 600$ В.

Измерение тока

Подсоедините один провод к входу **COM**, второй к входу **mA** или **10 A** (для измерения больших токов). Установите переключатель режимов в положение **A $\overline{\sim}$** (область V) для измерения постоянного тока или в положение **A $\sim$** (область IV) для измерения переменного тока с учётом требуемого диапазона измерений. Подсоедините провода к точкам электрической цепи, между которыми измеряется ток.

Диапазоны измерения переменного тока $I = 2; 20; 200$ мА; 10 А, постоянного тока $I = 2; 20; 200$ мА; 10 А.

Измерение сопротивления

Подсоедините один провод к входу **COM** второй к входу **VW**. Установите переключатель режимов в положение **W** (область VI) с учётом требуемого диапазона измерений. Подсоедините провода к измеряемому сопротивлению.

Диапазоны измерения сопротивлений $R = 200$ Ом; 2 кОм; 20 кОм; 200 кОм; 2 МОм; 20 МОм; 200 МОм.

Измерение ёмкости

Подсоедините провода к разъёму 6 (рис. 3). Установите переключатель режимов в положение **C $_x$** (область III) с учётом требуемого диапазона измерений.

Диапазон измерения ёмкости $C = 2; 20; 200$ нФ; 2; 20 мкФ. Систематическая погрешность измерений – 4 % от измеренного значения.

Измерение температуры

Установите переключатель режимов в положение $^{\circ}\text{C}$, при этом на дисплее будет показана температура окружающей среды. Вставьте провода от термопары в разъём 5 (рис. 3), при этом следует соблюдать полярность подсоединения («+» провода к «+» прибора). Систематическая погрешность измерений – 2% от измеренного значения.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРИМАГНЕТИКА ОТ НАПРЯЖЁННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Цель работы: построение графика зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряжённости магнитного поля $\mu = f(H)$ и основной кривой намагничивания $B = f(H)$.

По отношению к воздействию магнитного поля все вещества делятся на диамагнетики (вода, стекло, кварц), парамагнетики (воздух, алюминий, вольфрам, платина) и ферромагнетики (железо, никель и их многочисленные сплавы). Диамагнетики ослабляют внешнее магнитное поле, а парамагнетики усиливают его. Ферромагнетики многократно усиливают внешнее магнитное поле, т.е. имеют большую магнитную проницаемость μ . Они входят в более широкий класс веществ, которые называются ферримагнетики или ферриты.

Теория ферримагнетизма

Ферриты – это сложные системы окислов железа с окислами других металлов, чаще всего двухвалентных, это химические соединения типа $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, где Me – атом другого металла (железа, никеля, цинка, марганца и др.). Так как разные вещества имеют разное строение электронных оболочек, то атомные магнитные моменты их отличаются по величине и расположению в пространстве. Получается, что одинаково ориентированные атомные магнитные моменты образуют в кристаллической решётке

вещества магнитную подрешётку. Если в кристалле имеются две магнитные подрешётки с равными и антипараллельными суммарными магнитными моментами, то кристалл антиферромагнетик (рис. 1.1). Магнитные моменты магнитных подрешёток (одна подрешётка образована ионами железа, другая – ионами железа с другой степенью окисления или ионами другого металла) могут быть взаимно не скомпенсированы, тогда кристалл ферримагнетик. Такой кристалл имеет спонтанную намагниченность и доменную структуру. Во внешнем магнитном поле ферримагнетик намагничивается подобно ферромагнетику, но остаточная индукция ферритов значительно ниже, чем ферромагнетиков за счёт компенсации магнитных моментов.

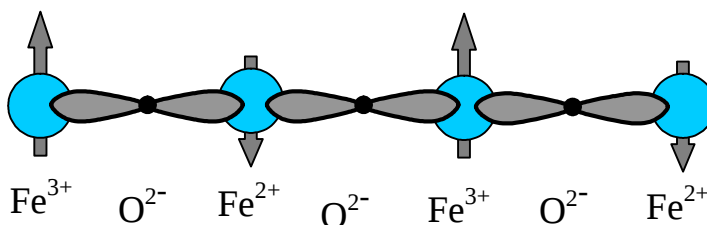


Рис. 1.1. Ферримагнитное упорядочение атомов в кристалле $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

шётка образована ионами железа, другая – ионами железа с другой степенью окисления или ионами другого металла) могут быть взаимно не скомпенсированы, тогда кристалл ферримагнетик. Такой кристалл имеет спонтанную намагниченность и доменную структуру. Во внешнем магнитном поле ферримагнетик намагничивается подобно ферромагнетику, но остаточная индукция ферритов значительно ниже, чем ферромагнетиков за счёт компенсации магнитных моментов.

Зависимость индукции B магнитного поля внутри ферромагнетика от напряжённости намагничивающего поля H является нелинейной (рис. 1.2). Процесс намагничивания до насыщения принято называть **техническим** намагничиванием, а

соответствующий участок графика зависимости $B = f(H)$ – *технической кривой намагничивания*.

Нелинейная зависимость B от H приводит к тому, что магнитная проницаемость ферромагнетиков также зависит от напряжённости магнитного поля H (рис. 1.3)

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (1.1)$$

С увеличением H она сначала быстро возрастает, достигая максимума $\mu_{\max}$, затем уменьшается. Следует заметить, что максимальное значение проницаемости достигается несколько раньше, чем насыщение ферромагнетика.

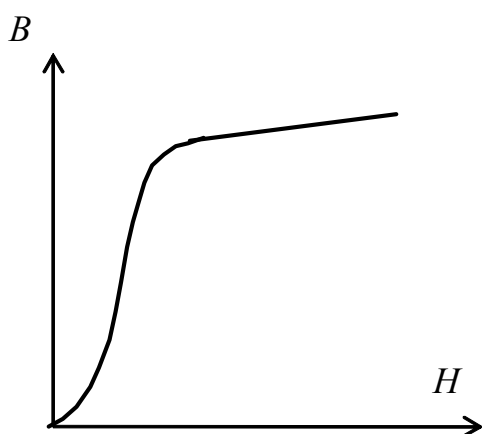


Рис. 1.2. Зависимость индукции магнитного поля ферромагнетика от напряжённости поля

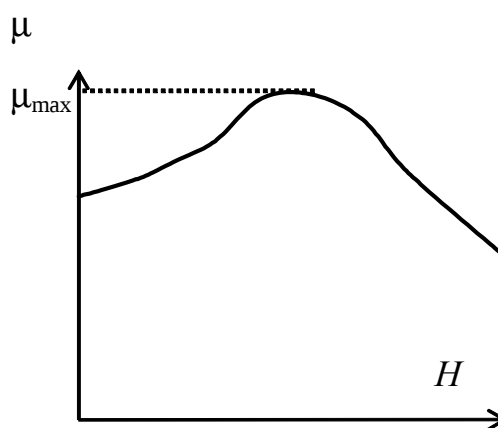


Рис. 1.3. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряжённости поля

В силу своей оксидной природы ферриты обладают большим удельным сопротивлением, то есть вихревые токи в них очень и очень маленькие, значит, потери на вихревые токи в таком материале тоже маленькие, из-за чего ферриты широко применяются в высокочастотной технике.

Ферриты могут быть магнитомягкими и магнитотвердыми – это зависит от Ме:

- магнитотвердые – в качестве Ме используют кобальт и барий;
- магнитомягкие получают при использовании в качестве Ме лития, марганца, никеля и цинка. В лабораторной работе использован марганец-цинковый феррит.

Описание метода исследования

В качестве объекта исследования выбран ферритовый сердечник, на который намотана тороидальная катушка. Индуктивность катушки зависит от магнитной проницаемости μ сердечника

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l} \quad (1.2)$$

и её индуктивное сопротивление переменному току

$$X_L = \omega L, \quad (1.3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); N – число витков, S – площадь поперечного сечения сердечника; a – длина средней осевой линии сердечника; ω – циклическая частота переменного тока.

В данной работе измерение магнитной проницаемости сердечника μ основано, согласно формуле (1.2), на измерениях индуктивности L катушки и её геометрических параметров N , l и S . Для определения индуктивности достаточно измерить индуктивное сопротивление катушки переменному току известной частоты ω . Полное сопротивление катушки переменному току

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \approx \omega L, \quad (1.4)$$

так как на частоте свыше 200 Гц обычно $R \ll X_L$, и активным сопротивлением катушки R можно пренебречь. Убедиться в этом можно, измерив активное сопротивление катушки мультиметром.

Закон Ома позволяет определить величину Z путём измерений тока I и напряжения U на участке цепи, содержащем катушку

$$Z = \frac{U}{I}. \quad (1.5)$$

Расчётная формула для определения магнитной проницаемости, полученная с использованием выражений (1.2), (1.4), (1.5), имеет следующий вид:

$$\mu = \frac{LI}{\mu_0 N^2 S} = \frac{UI}{I \omega \mu_0 N^2 S} = b \frac{U}{I}, \quad (1.6)$$

где $b = \frac{l}{\omega \mu_0 N^2 S}$ – постоянная установки.

Напряжённость магнитного поля, которое создаётся в кольцевом сердечнике при протекании по обмотке тока I , можно рассчитать по формуле

$$H = \frac{NI}{l}. \quad (1.7)$$

Таким образом, каждому значению тока I соответствуют определённая напряжённость магнитного поля H , магнитная проницаемость сердечника μ и индукция магнитного поля B :

$$B = \mu_0 \mu H. \quad (1.8)$$

Определяя величины H , μ и B при различных токах, можно экспериментально установить следующие зависимости:

а) $B = f(H)$ – зависимость магнитной индукции от напряжённости магнитного поля (основная кривая намагничивания ферромагнетика);

б) $\mu = f(H)$ – зависимость магнитной проницаемости сердечника от напряжённости магнитного поля.

Описание установки

Оборудование: миниблоки «Ферримагнетик», «Сопротивление», генератор сигналов специальной формы, мультиметры.

Электрическая схема установки показана на рис. 1.4, монтажная – на рис. 1.5.

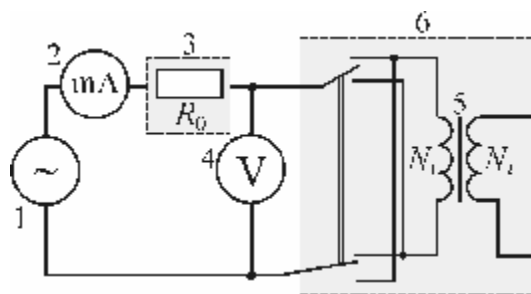


Рис. 1.4. Электрическая схема:

1 – генератор сигналов специальной формы; 2 – мультиметр (режим $A \sim 200 \text{ mA}$, входы COM, A); 3 – блок «Сопротивление», $R_0 = 100 \text{ Ом}$; 4 – мультиметр (режим $V \sim 2 \text{ V}$, входы COM, VW); 5 – кольцевой сердечник с обмотками N_1 и N_2 ; 6 – блок «Ферримагнетик»

На кольцевой сердечник 5, изготовленный из исследуемого ферримагнитного материала, намотаны N_1 проволочных витков. Эта обмотка, по которой пропускают переменный ток частоты более 200 Гц, служит для намагничивания сердечника. По параметрам обмотки определяют напряжённость H намагничивающего поля. Генератор напряжений специальной формы 1 позволяет изменять напряжение U , и ток I в обмотке тороида. Эти величины измеряют соответственно вольтметром 4 и миллиамперметром 2.

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 1.5.

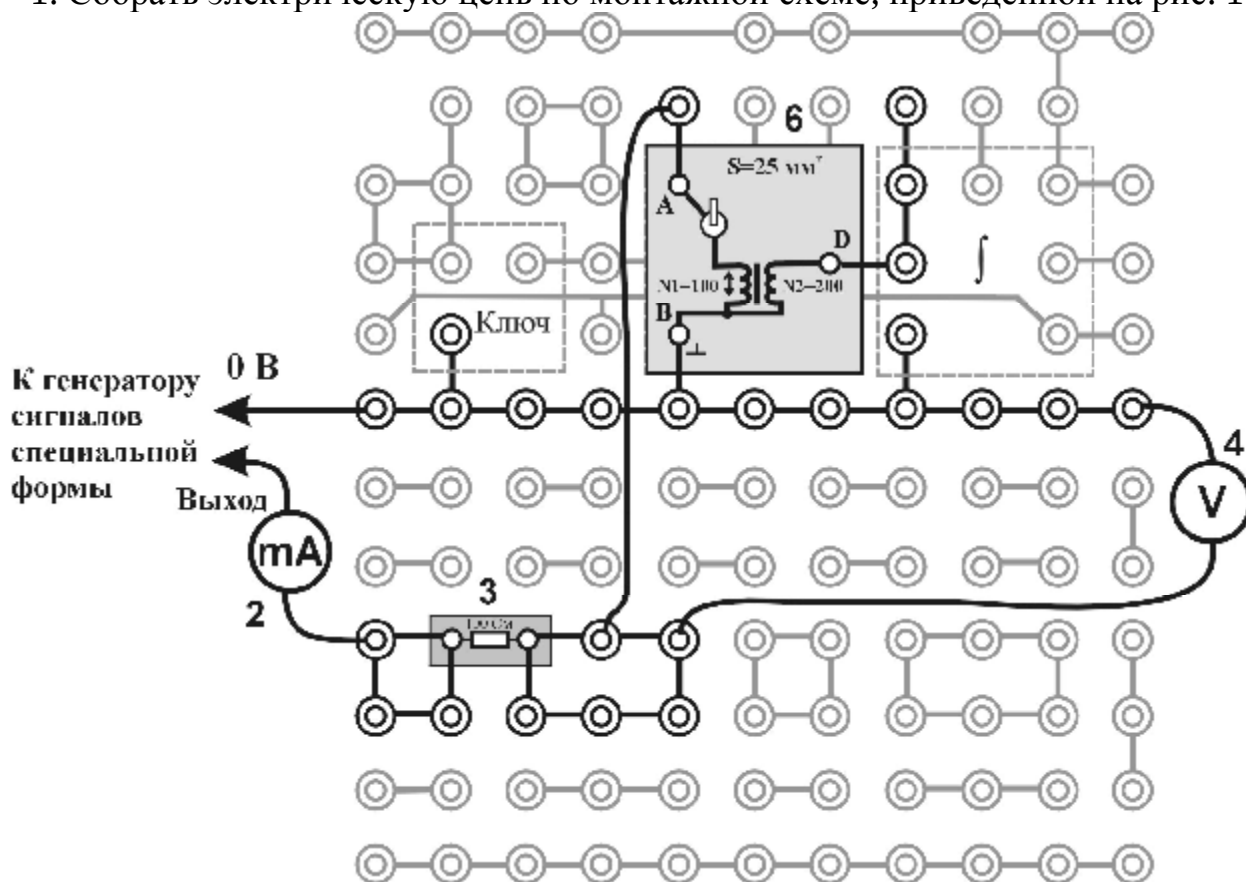


Рис. 1.5. Монтажная схема: обозначения 2, 3, 4, 6 – см. рис. 1.4

Включить в сеть блоки питания генераторов напряжений и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка».

2. Кнопками «Установка частоты 0,2 – 20 кГц» установить любую частоту ν от 200 Гц до 500 Гц. Записать значение ν в табл. 1.2.

3. Кнопками «Установка уровня выхода 0 ... 15 В» генератора сигналов установить в обмотке тороида указанные в табл. 1.2 токи I и измерить для каждого из них значение напряжения U . Результаты записать в табл. 1.2 (см. бланк отчёта). Рекомендуется проводить измерения с шагом 2–3 мА при токах I до 30 мА и с шагом ~5 мА при токах I свыше 30 мА.

4. **Выключить** блоки питания генераторов напряжений и мультиметров.

5. Измерить активное сопротивление катушки мультиметром и записать в таблицу 1.2. Для этого необходимо убрать из схемы сопротивление 3, отключить миллиамперметр 2 и генератор сигналов специальной формы. Мультиметр 4 настроить на измерение сопротивления и включить его.

Обработка результатов измерений

1. Вычислить по формуле (1.6) постоянную установки b .

2. Вычислить индуктивное сопротивление катушки Z для любого измерения.

3. По формулам (1.6), (1.7) и (1.8) для каждого значения тока рассчитать величины μ , H и B , **не забывая переводить миллиамперы в амперы**. Результаты расчётов записать в табл. 1.2.

4. По данным табл. 1.2 построить основную кривую намагничивания $B = f(H)$ и график зависимости $\mu = f(H)$.

5. В выводе по работе отразить особенности формы опытных кривых:

а) сопоставь ход кривой намагничивания с положением максимума на графике $\mu = f(H)$.

б) Сравнить активное сопротивление катушки R и полное сопротивление Z для любого измерения.

Отчёт по лабораторной работе
«Изучение зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика
от напряжённости магнитного поля»

Исполнитель: студент(ка) _____
 Группа _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в СИ)

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 1.1

Наименование прибора	Предел допускаемой основной относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Амперметр (2)	1,8%
Вольтметр (4)	0,8 %

Результаты измерений

Таблица 1.2

$N = 100$ вит., $l = 5,0$ см, $S = 25$ мм ² , $\nu = \dots$ Гц, $\omega = 2\pi\nu = \dots$ с ⁻¹ , $b = \dots$ А/В, $R = \dots$ Ом $Z = U/I = \dots$ Ом (для любого измерения)					
№	I , мА	U , В	H , А/м	μ	B , Тл
1					
...	...	...	...	...	...
N					

Расчёты

1. $b = \dots = \dots$ А/В;

2. $\mu = \dots = \dots$;

3. $H = \dots = \dots$ А/м;

4. $B = \dots = \dots$ Тл.

5. Вывод.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Расчёты п. 2, 3, 4 показать для одного любого значения из табл. 1.2.

Примечание. Построенные согласно табл. 1.2 графики $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$ прилагаются к отчёту.

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРИМАГНЕТИКА

Цель работы: наблюдение за петлёй гистерезиса в процессе нагревания ферримагнетика, исследование температурной зависимости индукции магнитного поля ферримагнетика, определение его точки Кюри.

Магнитный гистерезис и точка Кюри

Ферримагнетики (ферриты) обладают особыми магнитными свойствами благодаря упорядочению магнитных моментов ионов, в результате которого возникают области спонтанного намагничивания – домены. В пределах каждого домена феррит намагничен до насыщения. Направления магнитных моментов для различных доменов различны, так что в отсутствии намагничивающего поля суммарный момент всего ферромагнетика равен нулю, а значит и средняя индукция B также равна нулю (рис. 2.1, а). При включении намагничивающего поля энергия доменов оказывается неодинаковой. Она меньше для тех доменов, у которых вектор магнитного момента образует с направлением намагничивающего поля острый угол, и больше в том случае, когда этот угол тупой. Поэтому возникают смещения границ доменов, в результате чего за счет энергетически невыгодных доменов происходит увеличение объёма доменов с благоприятной ориентацией магнитных моментов. Пока намагничивающее поле невелико, смещение границ доменов обратимо и точно следует за изменением поля (рис. 2.1, б). При увеличении поля смещение границ доменов становится необратимым, и энергетически невыгодные домены исчезают (рис. 2.1, в). Если поле увеличивать ещё, то происходит поворот магнитных

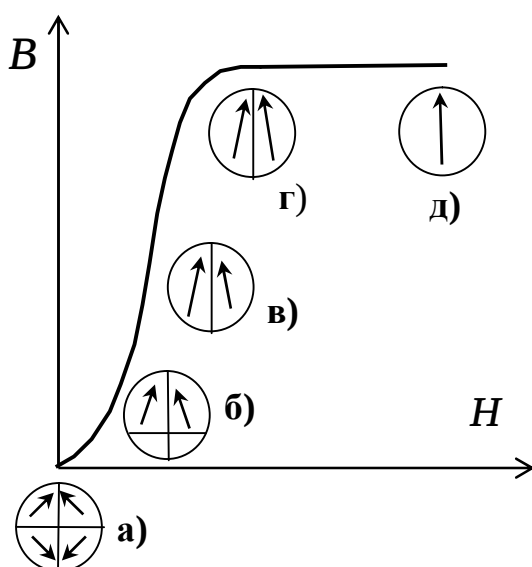


Рис. 2.1. Кривая намагничивания

ных моментов доменов (рис. 2.1, г). Наконец, в очень сильных полях магнитные моменты всех доменов устанавливаются параллельно намагничивающему полю, ферромагнетик намагничивается до насыщения (рис. 2.1, д).

Если размагниченный образец намагнитить до насыщения (т. 1 на рис. 2.2), а затем уменьшать напряжённость H намагничивающего поля, то уменьшение индукции B в феррите будет происходить не по первоначальной кривой 0–1, а по кривой 1–2. В результате, когда H станет равной нулю, ферромагнетик сохраняет свою намагниченность, и индукция в нём равна $B_{\text{ост}}$ (**остаточная индукция**). Для дальнейшего размагничивания надо изменить направление $\vec{H}$ на противоположное. Уменьшение B пойдет по кривой 2–3, и при некотором значении $H_{\text{коэр}}$ намагниченность ферромагнетика станет равной нулю. Величину $H_{\text{коэр}}$ называют **коэрцитивной силой**.

Увеличение H в том же направлении вновь приведёт к насыщению образца (т. 4 на рис. 2.4). При последующем изменении H в обратном направлении индукция B будет изменяться в соответствии с кривой 4–5–6–1. В результате получится петлеобразная кривая 1–2–3–4–5–6–1.

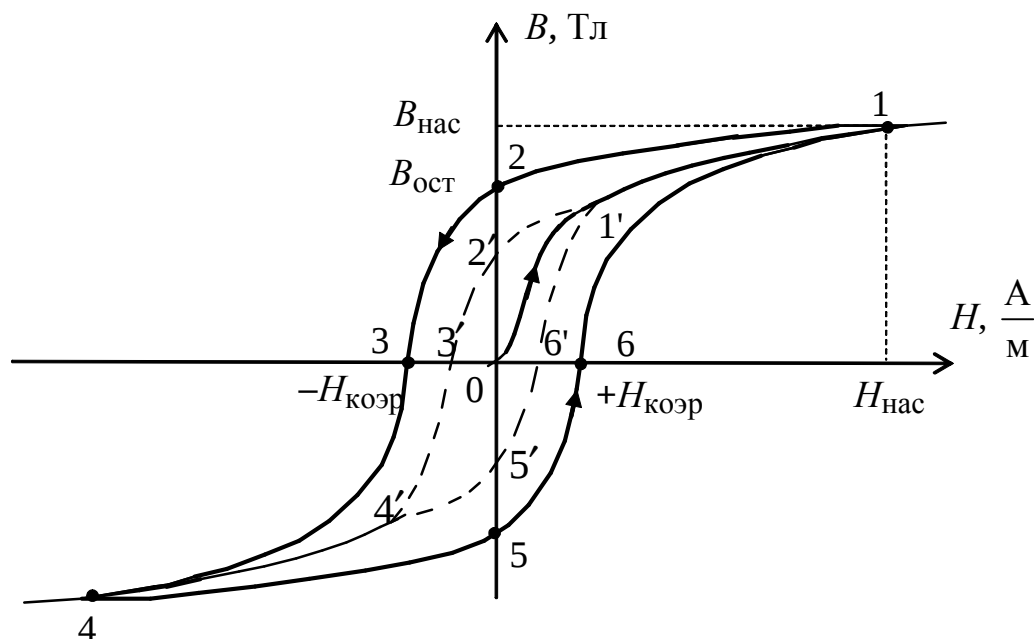


Рис. 2.2. Магнитный гистерезис

Таким образом, значение индукции B в ферромагнетике определяется не только полем H , но ещё и зависит от предыдущих состояний намагничивания, причём происходит отставание изменений индукции от изменения напряжённости. Это явление называется **магнитным гистерезисом**, а петлеобразная кривая — **петлей гистерезиса**. Она будет предельной, если намагничённость ферромагнетика достигает насыщения (кривая 1–2–3–4–5–6–1), и будет называться частным циклом, если насыщение не наступило (кривая 1'–2'–3'–4'–5'–6'–1'). Частных циклов существует бесконечное множество, все они лежат внутри предельной петли гистерезиса. Верхняя точка каждого частного цикла всегда находится на технической кривой намагничивания.

Если образец предварительно был размагничен, то при его намагничивании зависимость B от H изображается кривой 0–1 и называется **основной кривой намагничивания**. При уменьшении напряжённости поля H (кривая 1–2) изменение магнитной индукции B в ферромагнетике будет отставать от изменения H (магнитный гистерезис).

При нагревании ферромагнетика выше температуры Кюри (точки Кюри) тепловое движение разрушает его доменную структуру и вместе с этим исчезают все особенности ферромагнитного состояния: вещество переходит в парамагнитное состояние.

Описание метода исследования

Исследовать основные свойства ферромагнетика и определить его точку Кюри можно с помощью предельной петли магнитного гистерезиса. Получить и наблюдать на экране осциллографа петлю гистерезиса можно с помощью электрической схемы, которая приведена на рис. 2.3.

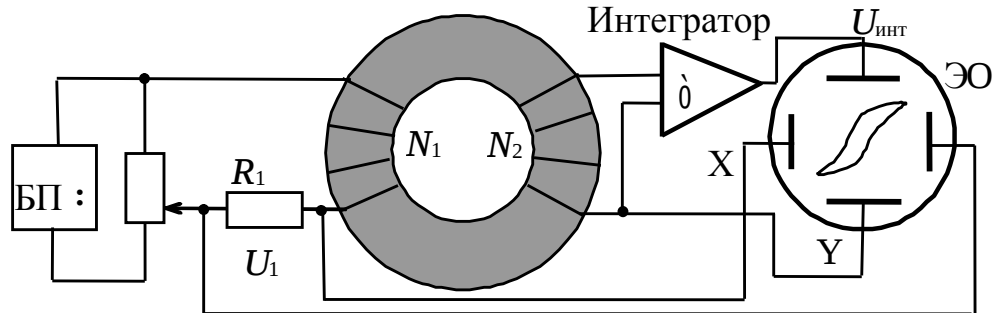


Рис. 2.3. Схема установки

На ферритовый образец, выполненный в виде тороида, равномерно намотаны две обмотки с числом витков N_1 и N_2 . Через сопротивление R_1 на первичную обмотку подается от блока питания (БП) переменное напряжение. Напряжённость намагничивающего поля в тороиде будет определяться током I_1 , протекающим через обмотку

$$H = \frac{I_1 N_1}{l} = n_1 I_1, \quad (2.1)$$

где l – длина осевой линии тороида, $n_1 = N_1/l$ – число витков на единицу длины осевой линии. Величину тока в первичной обмотке можно найти из формулы, определяющей падение напряжения на резисторе R_1

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}. \quad (2.2)$$

Тогда напряжённость магнитного поля будет равна

$$H = \frac{N_1}{l R_1} U_1 = n_1 \frac{U_1}{R_1}. \quad (2.3)$$

При изменении магнитного поля, созданного первичной обмоткой, во вторичной возникает ЭДС индукции

$$e_i = -\frac{d\Phi}{dt} N_2, \quad (2.4)$$

и индукционный ток

$$I_i = \frac{e_i}{R_2} = \frac{d\Phi}{R_2 dt} N_2 = \frac{dB}{dt} \cdot \frac{N_2 S}{R_2}, \quad (2.5)$$

где R_2 – сопротивление цепи вторичной обмотки, $\Phi = BS$ – магнитный поток через один виток тороида; B – индукция магнитного поля в тороиде; N_2 – число витков вторичной обмотки; S – площадь поперечного сечения сердечника.

В результате протекания индукционного тока в цепи вторичной обмотки на интеграторе накапливается заряд

$$Q = \int_0^t I_i dt = \frac{N_2 S}{R_2} \int_0^B dB = \frac{N_2 S}{R_2} B. \quad (2.6)$$

Напряжение $U_2 = U_{\text{инт}}$ на выходе интегратора пропорционально прошедшему через него заряду, а значит и индукции магнитного поля:

$$U_{\text{инт}} = \frac{Q}{b} = \frac{N_2 S}{b R_2} B,$$

откуда следует

$$B = \frac{b R_2}{N_2 S} \cdot U_{\text{инт}} = k \cdot U_{\text{инт}}, \quad (2.7)$$

здесь b – градуировочная постоянная интегратора, $k = b R_2 / N_2 S$ – постоянная установки.

Из уравнений (2.3) и (2.7) видно, что если напряжение U_1 подать на вход горизонтальной развертки осциллографа, а напряжение $U_{\text{инт}}$ – на вход вертикальной развёртки, то электронный луч в горизонтальном направлении будет отклоняться пропорционально напряжённости H , а в вертикальном – пропорционально индукции B . За один период синусоидального изменения тока след электронного луча на экране опишет полную петлю гистерезиса, а за каждый последующий период в точности повторит её. Поэтому на экране будет наблюдаться неподвижная петля гистерезиса. Для определения индукции насыщения $B_{\text{нас}}$ необходимо учесть, что вольтметром можно измерить действующее значение напряжения, поэтому может быть определена по формуле

$$B_{\text{нас}} = k \cdot U \cdot \sqrt{2}. \quad (2.8)$$

Где U – действующее значение выходного напряжения интегратора.

Для построения графика зависимости магнитной индукции насыщения от температуры ферромагнетика измеряют напряжение U при нагревании образца. По мере роста температуры индукция насыщения (а значит и выходное напряжение интегратора) уменьшается, а напряжённость магнитного поля остаётся постоянной, так как она от температуры не зависит. При этом площадь петли гистерезиса уменьшается и по достижении температуры Кюри петля вырождается в прямую линию. В эксперименте получают зависимость $B_{\text{нас}} = f(t)$. Если температура феррита приближается к точке Кюри, то $B_{\text{нас}} \rightarrow 0$.

Описание установки

Оборудование: генератор сигналов специальной формы, генератор регулируемого постоянного напряжения, мультиметры, осциллограф, миниблоки «Сопротивление» 100 Ом, «Интегратор тока», «Точка Кюри».

Электрическая схема цепи представлена на рис. 2.4, монтажная – на рис. 2.5.

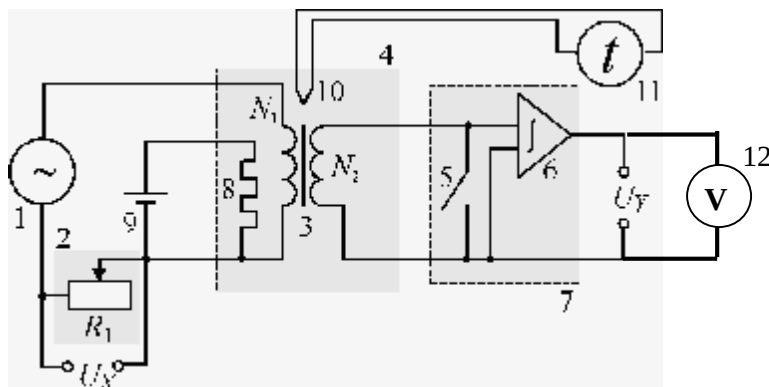


Рис. 2.4. Электрическая схема:

1 – генератор сигналов специальной формы; 2 – миниблок «Сопротивление» 100 Ом; 3 – тороид с первичной N_1 и вторичной N_2 обмотками; 4 – миниблок «Точка Кюри»; 5 – демпферный ключ; 6 – интегратор; 7 – миниблок «Интегратор тока» (**положение тумблера «Сброс»**); 8 – электронагреватель; 9 – источник регулируемого постоянного напряжения 0 ... +15 В; 10 – термопара; 11 – мультиметр (**режим °C, входы ТЕМР**); U_X – напряжение на входе X осциллографа; $U_{\text{инт}} = U_Y$ – напряжение на входе Y осциллографа; 12 – мультиметр (**режим V~ 2, входы COM, V W**)

Первичная N_1 и вторичная N_2 обмотки намотаны на ферромагнитный кольцевой сердечник 3. Первичную обмотку, по которой протекает переменный ток, используют для намагничивания ферромагнетика и по её параметрам определяют напряжённость магнитного поля H . Вторичная обмотка предназначена для измерения индукции B магнитного поля в сердечнике. Для этого напряжение $U_{\text{инт}}$ с интегратора тока 7 измеряется вольтметром 12 и подаётся на вход Y осциллографа для наблюдения петли гистерезиса на его экране. Электронагреватель 8 нагревает исследуемый ферромагнетик. Рядом с ним расположена термопара 10, предназначенная для измерения температуры образца с помощью мультиметра 11.

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 2.11.
2. Переключатель рода работ мультиметра 12 (рис. 2.11) перевести в положение «V~» и установить предел измерения «2 V», а мультиметр 11 – в режим «°C».
3. Коаксиальный кабель подключить к входу осциллографа «CH2 (Y)», красный штекер кабеля соединить через наборное поле с выходом интегратора C, а синий – с шиной наборного поля «⊥» («земля»). Второй кабель подключить к

входу «СН1 (X)» осциллографа, красный штекер кабеля соединить с сопротивлением 100 Ом, а синий – с шиной наборного поля «⊥» («земля»).

4. Установить переключатель развёртки, расположенный на лицевой панели осциллографа, в положение X-Y.

5. Кнопками «СЕТЬ» включить питание блоков генераторов напряжений и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка». Установить режим синусоидального напряжения. Установить в положение «Сброс» демпферный ключ миниблока «Интегратор тока». Кнопками «Установка частоты 0,2 – 20 кГц» на ГССФ установить частоту **0,5 кГц (500 Гц)**.

6. Включить кнопку «POWER» («СЕТЬ»), расположенную на панели осциллографа под экраном, при этом должен зажегаться светодиодный индикатор. При помощи регуляторов «INTEN» и «FOCUS», расположенных там же, установить соответственно оптимальную яркость и фокусировку луча.

Внимание! Для предотвращения повреждения люминофора электронно-лучевой трубки не устанавливайте чрезмерную яркость луча и не оставляйте без необходимости длительное время неподвижное пятно на экране.

С помощью регуляторов «< POSITION >» и «POSITION $\frac{D}{N}$ » вывести электронный луч в центр координатной сетки экрана.

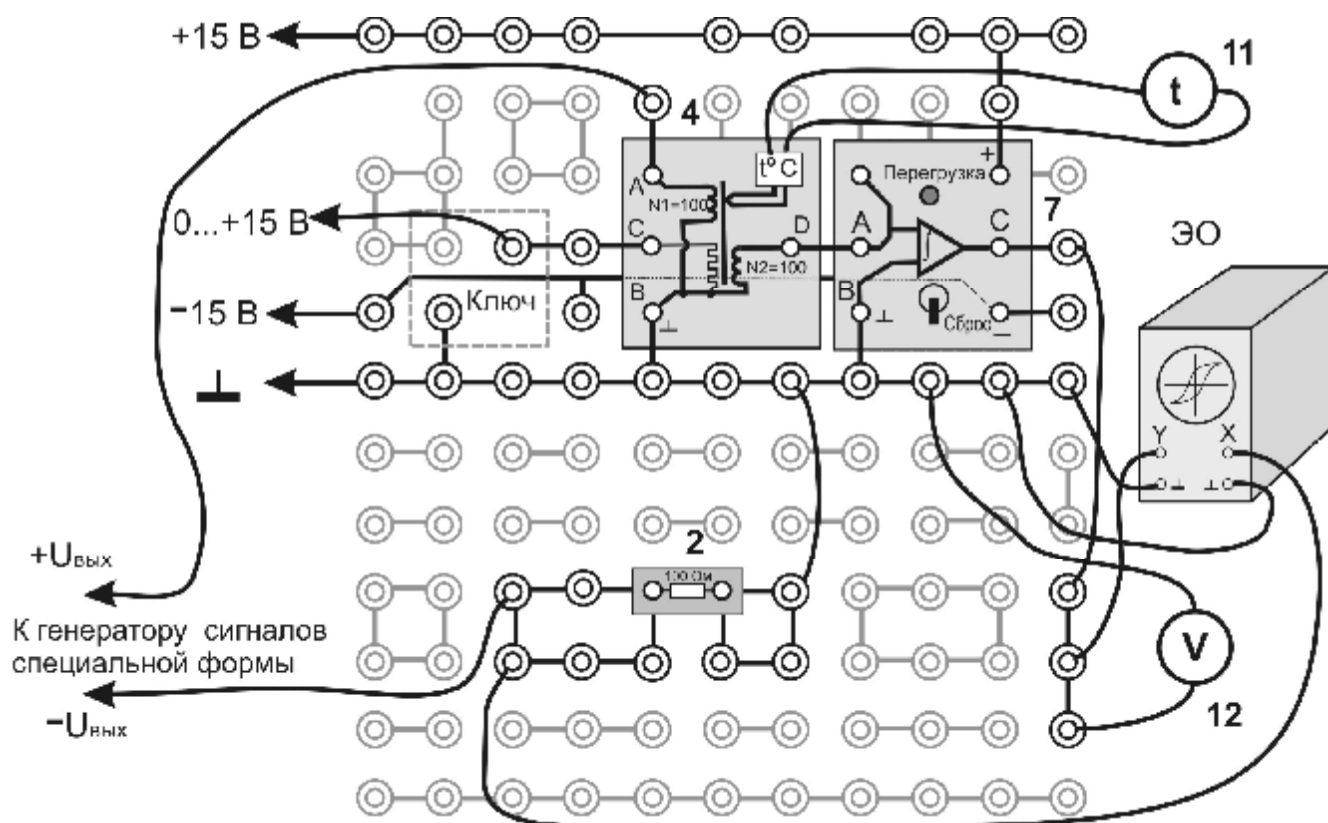


Рис. 2.5. Монтажная схема:
ЭО – электронный осциллограф; 2, 4, 7, 11, 12 – см. рис. 2.4

7. Кнопкой D «Установка уровня выхода 0 ... 15 В» генератора сигналов специальной формы увеличивать ток I_1 в первичной обмотке до получения на экране осциллографа изображения *предельной* петли гистерезиса. Петля считается предельной, если у неё появляются «усы» и рост тока не приводит к увеличению её площади.

8. Медленно вращая по часовой стрелке регулятор «VOLTS/DIV» (MOS-620) или «VAR» (GOS-625) на панели осциллографа, увеличить вертикальный размер петли примерно до 8 больших делений масштабной сетки экрана.

9. Медленно вращая по часовой стрелке регулятор «VOLTS/DIV» (MOS-620) или «VAR» (GOS-625) на панели осциллографа, увеличить горизонтальный размер петли примерно до 10 больших делений масштабной сетки экрана.

10. Регуляторами осциллографа «< POSITION >» и «POSITION $\frac{D}{\tilde{N}}$ » установить петлю симметрично относительно центра координатных осей X-Y.

11. Измерить температуру t °С сердечника и напряжение на выходе интегратора U , соответствующие магнитной индукции насыщения $B_{\text{нас}}$. Результаты измерений записать в табл. 2.2 (см. бланк отчёта).

12. Кнопками «Установка напряжения 0 ... +15 В» регулируемого источника постоянного напряжения выставить по световому индикатору среднее значение. Если нагрев будет происходить слишком медленно, то можно увеличить напряжение на нагревателе.

13. По мере нагревания образца через каждые 5° С, измерять температуру t , °С и напряжение $U_{\text{инт}}$ до тех пор, пока петля гистерезиса не превратится в прямую линию. Для повышения точности можно растягивать изображение по вертикали по мере необходимости. Результаты измерений записать в табл. 2.2.

14. **Выключить из сети** блоки питания генераторов напряжений и мультиметров.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать по формуле (2.7) коэффициент k , зависящий от параметров установки.

2. По данным табл. 2.2 рассчитать по формуле (2.8) значения магнитной индукции насыщения $B_{\text{нас}}$ для каждой температуры.

3. Используя результаты расчетов табл. 2.2, построить график зависимости $B_{\text{нас}} = f(t)$.

4. По графику определить температуру Кюри путём экстраполяции.

Отчёт по лабораторной работе
«Определение точки Кюри ферримагнетика»

Исполнитель: студент(ка) _____
 группа _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в СИ)....

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 2.1

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Мультиметр (11)	0,8 %
Вольтметр (12)	1,0%

Результаты измерений

Таблица 2.2

$b = 23,7 \times 10^{-8} \text{ Кл/В}, \quad R_2 = 2,5 \text{ кОм}, \quad N_1 = 100 \text{ вит.}, \quad N_2 = 100 \text{ вит.},$ $l = 50 \text{ см}, \quad S = 25 \text{ мм}^2$				
№	$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{ К}$	$U_{\text{инт}}, \text{ В}$	$B_s, \text{ Тл}$
1	Комнатная			
2				
...				
N				

Расчёты

1. $k = \dots = \dots \text{ с/м}^2$;
2. $B_{\text{нас}} = \dots = \dots \text{ Тл}$; (для одного любого значения)
3. $t_K = \dots ^\circ\text{C}$.
4. Оценить погрешность t_K графически.
5. Сделать вывод.

Примечание. График зависимости $B_{\text{нас}} = f(t)$, построенный согласно данным табл. 2.2, прилагается к отчету. На графике показать t_K .

Лабораторная работа № 3

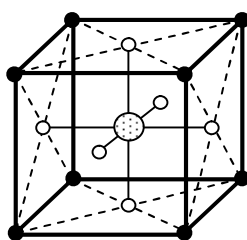
ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: по предельной петле гистерезиса ознакомиться с методом измерения основных характеристик сегнетоэлектриков, исследовать зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряжённости электрического поля.

Сегнетоэлектрики – группа кристаллических диэлектриков, у которых в некотором интервале температур в отсутствие внешнего электрического поля существует спонтанная (самопроизвольная) поляризованность $\vec{P}_s$.

Примерами сегнетоэлектриков являются сегнетова соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, давшая название этому классу вещества, титанат бария BaTiO_3 , триглицинсульфат $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{SO}_4$ и др. Сегнетоэлектрики имеют важное практическое применение. Например, приготовляя сложные диэлектрики на основе сегнетоэлектриков и добавляя к ним различные примеси, можно получить высококачественные конденсаторы большой ёмкости при их малых размерах.

Сегнетоэлектриками могут быть только кристаллические тела, у которых решётка не имеет центра симметрии. Например, кристаллическая решётка титаната бария состоит как бы из трёх встроенных друг в друга кубических подрешёток: одна образована положительными ионами бария, другая – положительными ионами титана, третья – отрицательными ионами кислорода (рис. 3.1). Минимум энергии взаимодействия между положительными ионами титана и отрицательными ионами кислорода достигается, если они смещаются навстречу друг другу, нарушая тем самым симметрию элементарной кристаллической ячейки. Если такое смещение происходит во всех элементарных ячейках кристалла, то сегнетоэлектрик приобретает очень большой электрический дипольный момент в направлении этого смещения. В результате сильного электрического взаимодействия между отдельными поляризованными ячейками они располагаются так, что их дипольные моменты параллельны друг другу. Такое расположение дипольных моментов возможно даже в отсутствие внешнего электрического поля. Это и есть **спонтанная поляризованность** $\vec{P}_s$.

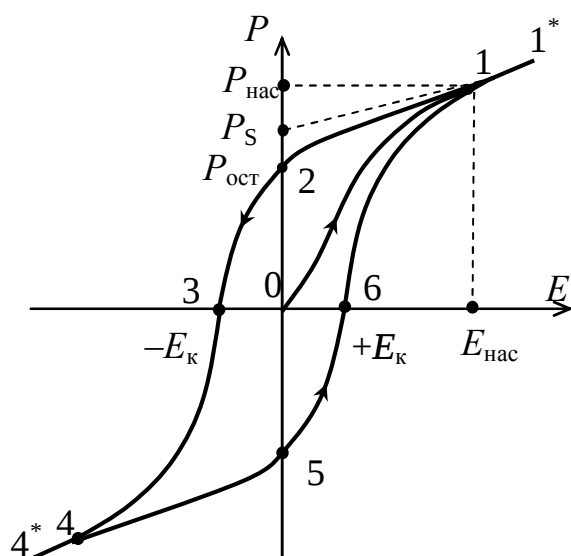


○ – Ti^{4+} , ● – Ba^{2+} , ○ – O^{2-}

Рис. 3.1. Элементарная ячейка титаната бария

При температурах, превышающих некоторое критическое значение, тепловое движение разрушает домены, вследствие чего сегнетоэлектрические свойства исчезают. Такая температура называется точкой (температурой) Кюри. Для некоторых сегнетоэлектриков существуют две точки Кюри: верхняя и нижняя, сегнетоэлектрические свойства проявляются в этом интервале температур. Для примера сегнетова соль обладает сегнетоэлектрическими свойствами только в диапазоне температур от -18°C до $+24^\circ\text{C}$.

2. Нелинейная зависимость поляризованности P от напряжённости электрического поля E . Это приводит к тому, что диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика тоже зависит от напряжённости поля. Для обычных диэлектриков эта величина не зависит от поля и является характеристикой вещества.



этом спонтанную поляризованность $\vec{P}_S$. Это осуществляется путём разделения макроскопического объёма сегнетоэлектрика на малые области – **домены**, каждый из которых характеризуется вектором спонтанной поляризованности $\vec{P}_S$ (рис. 3.3). Размеры доменов порядка десятков тысяч ангстрем (порядка микрометра) В пре-

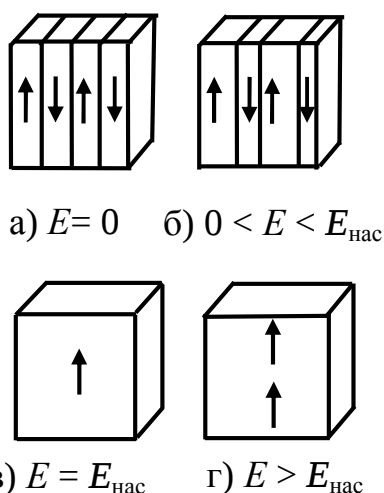


Рис. 3.3. Доменная структура сегнетоэлектрика

инность $\vec{P}_S$. Это осуществляется путём разделения сегнетоэлектрика на малые области – **домены**, каждый из которых имеет собственный вектор спонтанной поляризованности $\vec{P}_S$ (рис. 3.3). Размеры доменов составляют от десятков тысяч ангстрем (порядка микрометра) В пределах одного домена $\vec{P}_S$ всех элементарных ячеек ориентирован в одну сторону, но в разных доменах он ориентирован произвольно, поэтому средняя поляризованность всего сегнетоэлектрика равна нулю (точка 0 на рис. 3.2 и рис. 3.3, а).

При наложении электрического поля поляризованность сегнетоэлектрика будет складываться из спонтанной поляризованности, не зависящей от поля, и индуцированной, вызванной этим полем

$$\dot{P} = \dot{P}_S + \dot{P}_{\text{инд}}. \quad (3.1)$$

Первоначальное увеличение поляризованности происходит из-за роста доменов, с «выгодной» ориентацией за счет доменов с «менее выгодной» ориентацией (рис. 3.3, б). «Выгодной» считается такая

ориентация дипольных моментов, которая образует острый угол с направлением внешнего электрического поля. Наиболее интенсивно этот процесс протекает для среднего участка кривой 0-1. В точке 1 поляризованность всех доменов оказывается ориентированной вдоль поля $\vec{E}$ и сегнетоэлектрик превращается в однодоменный кристалл (рис. 3.3, в). Он находится в состоянии насыщения и характеризуется напряжённостью $E_{\text{нас}}$ и поляризованностью $P_{\text{нас}}$ насыщения. Дальнейшее увеличение E приводит к незначительному возрастанию поляризованности и кривая 0-1 переходит в линейный участок 1-1* (рис. 3.3, г). Увеличение поляризованности на этом участке происходит за счет индуцированной поляризованности, которая линейно зависит от электрического поля E

$$\dot{P}_{\text{инд}} = \epsilon_0(\epsilon - 1)\dot{E}, \quad (3.2)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная. Так как при достижении состояния насыщения поляризованность равна сумме спонтанной и индуцированной поляризованности, то для определения максимальной спонтанной поляризованности P_s необходимо экстраполировать прямую 1-1* до пересечения с осью P . При уменьшении (из точки 1) поля кривая зависимости P от E не совпадет с первоначальной и пойдет несколько выше (кривая 1-2). При $E = 0$ сегнетоэлектрик не возвращается в неполяризованное состояние, а сохраняет остаточную поляризованность $P_{\text{ост}}$ (отрезок 0-2). Это явление называется диэлектрическим *гистерезисом*. Таким образом, поляризованность $\dot{P}$ не определяется однозначно полем $\dot{E}$, а зависит также от предшествующей истории сегнетоэлектрика.

Для деполяризации сегнетоэлектрика, т. е. сведения к нулю остаточной поляризованности, необходимо приложить некоторое поле E_k обратного направления. Напряжённость E_k (отрезок 0-3) называется *коэрцитивной силой (коэрцитивным полем)*. При дальнейшем увеличении поля того же направления поляризованность кристалла меняет свое направление и с ростом поля достигает насыщения в точке 4. Дальнейший рост (от точки 4 до 4*) обусловлен действием индуцированной поляризованности. Если вновь изменять напряжённость от $-E_{\text{нас}}$ до $+E_{\text{нас}}$, то электрическое состояние сегнетоэлектрика будет изменяться вдоль ветви 4*-4-5-6-1-1*. Значение остаточной поляризованности для этой ветви определяется отрезком 0-5, а коэрцитивной силы – отрезком 0-6. Замкнутая кривая 1*-1-2-3-4-4*-5-6-1-1* называется *петлей гистерезиса*.

При изменении напряжённости поля от $-E$ до $+E$ и последующем возвращении от $+E$ до $-E$, где E – любое значение напряжённости поля, удовлетворяющее условию $0 < E < E_{\text{нас}}$, будет также получаться петля гистерезиса, называемая *частной петлей (частным циклом)*. Этих циклов может быть бесчисленное множество, при этом вершины частных петель лежат на основной кривой 0-1.

Описание метода исследования

Получить и наблюдать петлю диэлектрического гистерезиса можно с помощью электрической схемы, приведенной на рис. 3.4. Два конденсатора C_1 и C_2 соединены последовательно и подключены к регулируемому источнику переменного

напряжения. Конденсатор C_2 заполнен обычным «линейным» диэлектриком с постоянной диэлектрической проницаемостью, а конденсатор C_1 – сегнетоэлектриком. Параллельно этой цепочке конденсаторов включены два резистора. Резистор R_1 обладает эквивалентным омическим сопротивлением исследуемого сегнетоэлектрика, а резистор R_2 служит для подбора равенства фаз напряжений, подаваемых на вход осциллографа (ЭО).

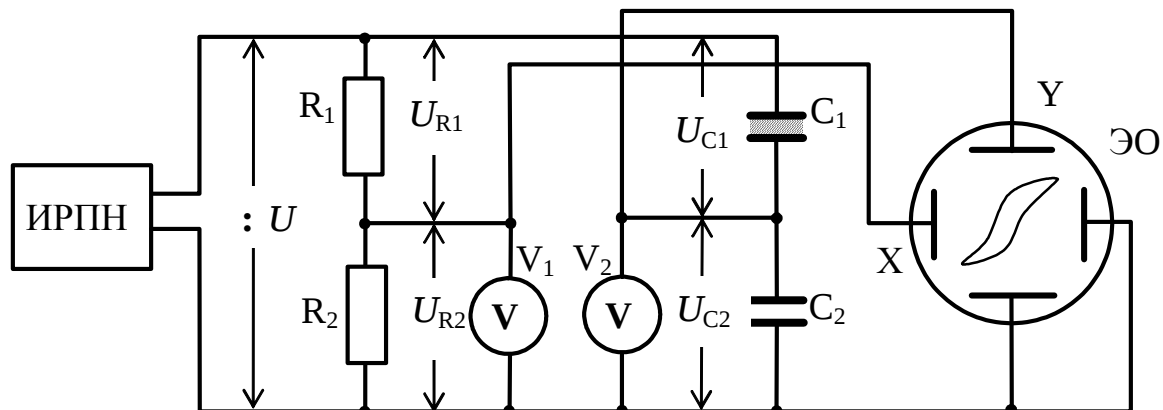


Рис. 3.4. Электрическая схема:

ИРПН – источник регулируемого переменного напряжения, R_1 , R_2 – резисторы, C_1 – конденсатор с изолятором из сегнетоэлектрика, C_2 – конденсатор с изолятором из обычного диэлектрика, V_1 и V_2 – вольтметры, ЭО – осциллограф

Ёмкость конденсатора C_1 и напряжённость электрического поля E внутри сегнетоэлектрика рассчитываются по формулам

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (3.3)$$

$$E = \frac{U_{C1}}{d}, \quad (3.4)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость, S – площадь обкладок, d – расстояние между ними, U_{C1} – напряжение между обкладками. Так как конденсаторы соединены между собой последовательно, то заряды на их обкладках будут одинаковыми

$$Q = C_1 U_{C1} = C_2 U_{C2}. \quad (3.5)$$

Отсюда

$$U_{C1} = \frac{C_2}{C_1} U_{C2}, \quad (3.6)$$

или, учитывая (3.3), получаем

$$U_{C1} = \frac{C_2 d}{\epsilon_0 \epsilon S} U_{C2}. \quad (3.7)$$

Подставим (3.7) в (3.4), получим

$$E = U_{C2} \frac{C_2}{\epsilon_0 \epsilon S}. \quad (3.8)$$

Из соотношения (3.2) с учетом того, что для сегнетоэлектрика $\epsilon \gg 1$, следует

$$E = \frac{P}{\epsilon_0 \epsilon}. \quad (3.9)$$

Тогда уравнение (3.8) примет вид

$$\frac{P}{\epsilon_0 \epsilon} = U_{C2} \frac{C_2}{\epsilon_0 \epsilon S}, \quad (3.10)$$

откуда следует, что

$$U_{C2} = \frac{S}{C_2} P = U_y, \quad (3.11)$$

то есть напряжение на конденсаторе C_2 пропорционально поляризованности сегнетоэлектрика. Это напряжение подают на вход Y осциллографа.

Найдём напряжение U_{R2} на резисторе R_2 . Ток, текущий через этот резистор, по закону Ома равен

$$I = \frac{U_{R2}}{R_2}. \quad (3.12)$$

Такой же ток протекает и по участку цепи с сопротивлением $(R_1 + R_2)$

$$I = \frac{U_{R1} + U_{R2}}{R_1 + R_2}, \quad (3.13)$$

где U_{R1} – падение напряжения на резисторе R_1 . Из сравнения уравнений (3.12) и (3.13) получим

$$\frac{U_{R2}}{R_2} = \frac{U}{R_1 + R_2}, \quad (3.14)$$

где $U_{R1} + U_{R2} = U_{C1} + U_{C2} = U$ – напряжение, подаваемое на вход схемы (рис. 3.3). Полагаем, что $C_2 \gg C_1$. Тогда из (3.6) следует, что $U_{C1} \gg U_{C2}$, и $U \approx U_{C1}$. Полагаем также, что $R_1 \gg R_2$. Тогда из (3.14) следует

$$\frac{U_{R2}}{R_2} = \frac{U_{C1}}{R_1}, \quad (3.15)$$

откуда с учётом равенства (3.4), получаем уравнение

$$U_{R2} = \frac{R_2 d}{R_1} E = U_x, \quad (3.16)$$

то есть напряжение на резисторе R_2 пропорционально напряжённости внешнего электрического поля. Это напряжение подают на вход X осциллографа.

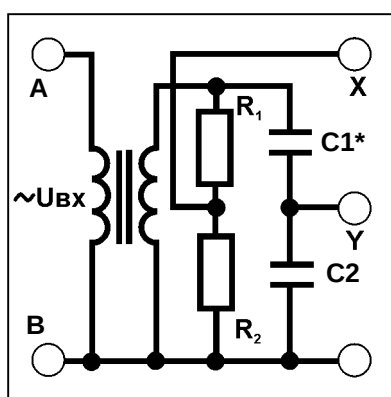
Таким образом, из уравнений (3.11) и (3.16) видно, что если напряжение U_{C2} подать на вход вертикальной развёртки осциллографа (Y), а напряжение U_{R2} – на

вход горизонтальной развертки (X), то электронный луч в направлении оси Y будет отклоняться пропорционально поляризованности P сегнетоэлектрика, а в направлении оси X – пропорционально напряжённости внешнего электрического поля E . За один период синусоидального изменения напряжения электронный луч на экране опишет полную петлю гистерезиса, и за каждый последующий период в точности повторит её. Поэтому на экране будет наблюдаться неподвижная петля.

Описание установки

Оборудование: генератор сигналов специальной формы (ГССФ), миниблок «Сегнетоэлектрик», два мультиметра, осциллограф.

Установка для исследования свойств сегнетоэлектриков состоит из ГССФ, миниблока «Сегнетоэлектрик» (рис. 3.5), двух вольтметров и осциллографа. В качестве исследуемого образца используется изолятор многослойного конденсатора C_1 , который изготовлен из керамики $BaTiO_3$ с добавкой олова и стронция.



Электрическая и монтажная схемы установки приведены на рис. 3.4 и 3.6.

Рис. 3.5. Миниблок «Сегнетоэлектрик»

: $U_{вх}$ – регулируемое напряжение, R_1 , R_2 – резисторы, C_1 , C_2 – конденсаторы, X, Y – выходы напряжений U_x и U_y на измерительные приборы и осциллограф, * – конденсатор с сегнетоэлектриком

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 3.6. Коаксиальный кабель подключить к входу осциллографа «CH2 (Y)», красный штекер кабеля соединить через наборное поле с выходом Y миниблока «Сегнетоэлектрик», а синий – через наборное поле с гнездом «– $U_{вых}$ » генератора сигналов специальной формы. Второй кабель подключить к входу «CH1 (X)» осциллографа, красный штекер кабеля соединить с выходом X миниблока «Сегнетоэлектрик», а синий – через наборное поле с гнездом «– $U_{вых}$ » генератора сигналов специальной формы.

2. Переключатели рода работ обоих мультиметров перевести в положение «V~» и установить предел измерения «20 В».

3. Установить регулятор развёртки, расположенные на лицевой панели осциллографа, в положение «X-Y».

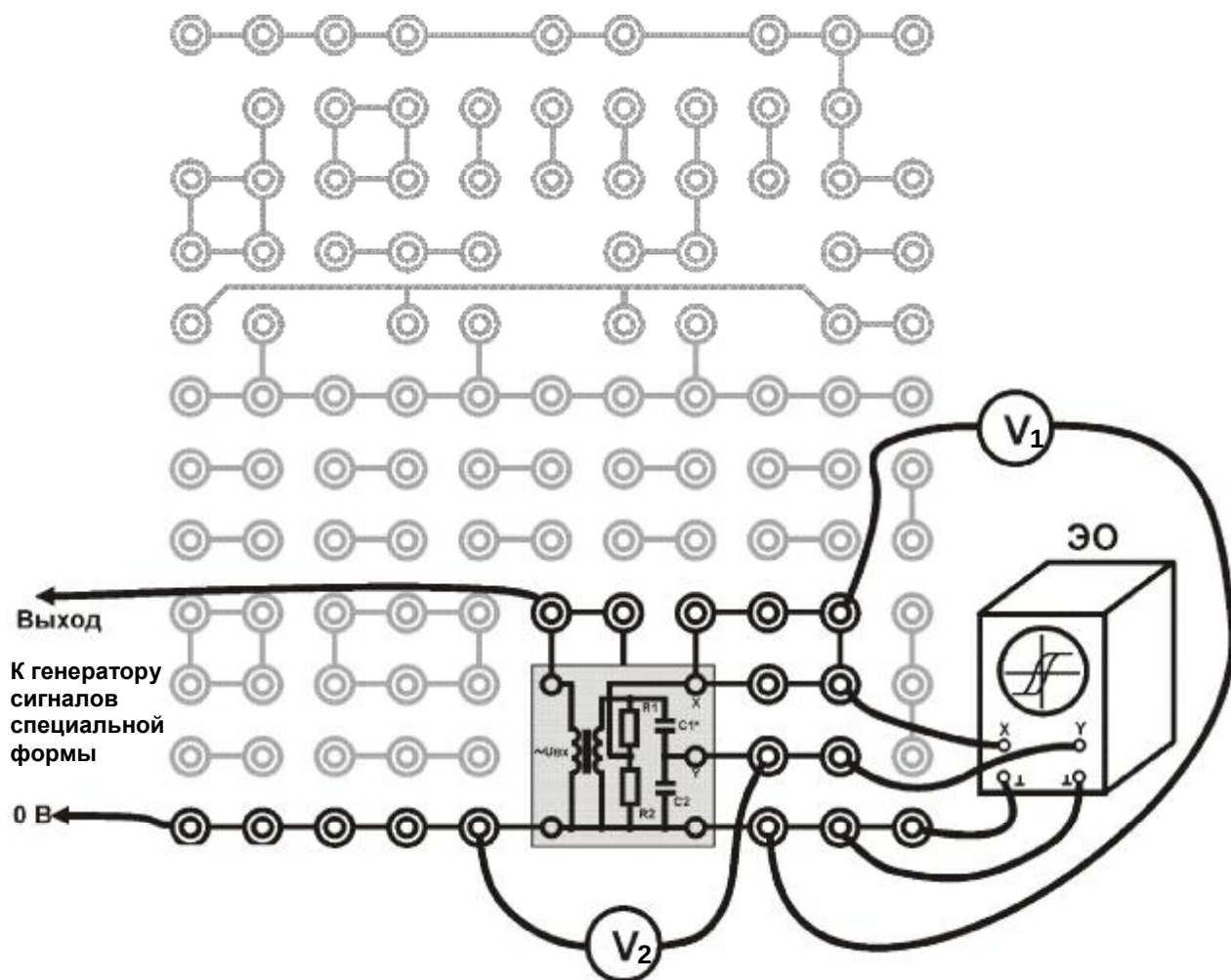


Рис. 3.6. Монтажная схема установки:
Миниблок «Сегнетоэлектрик», V_1 , V_2 – мультиметры, ЭО – осциллограф

4. Записать параметры установки в табл. 3.2.

5. Кнопками «СЕТЬ» включить питание блоков генераторов напряжений и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка». Кнопками «Установка частоты 0,2 – 20 кГц» установить частоту 0,05 кГц (50 Гц).

6. Включить кнопку «POWER» («СЕТЬ»), расположенную на панели осциллографа под экраном, при этом должен загореться светодиодный индикатор. При помощи регуляторов «INTEN» и «FOCUS», расположенных там же, установить соответственно оптимальную яркость и фокусировку луча.

Внимание! Для предотвращения повреждения люминофора электронно-лучевой трубки не устанавливайте чрезмерную яркость луча и не оставляйте без необходимости длительное время неподвижное пятно на экране.

С помощью регуляторов «< POSITION >» и «POSITION $\frac{D}{N}$ » вывести электронный луч в центр координатной сетки экрана.

7. Кнопкой D «Установка уровня выхода 0 ... 15 В» увеличивая напряжение U_y примерно до 4 В, получить изображение петли гистерезиса при насыщении сегнетоэлектрика. Признаком насыщения являются «усы» на петле и её площадь

при росте напряжения не увеличивается. Измерить мультиметрами действующие напряжения $U_y^{\text{нас}}$ и $U_x^{\text{нас}}$ Результаты записать в табл. 3.2.

8. Плавно вращая по часовой стрелке регулятор «**VOLTS/DIV**» (MOS-620) или «**VAR**» (GOS-625) на панели осциллографа, увеличить вертикальный размер петли примерно до 8 больших делений масштабной сетки экрана.

9. Плавно вращая по часовой стрелке регулятор «**VOLTS/DIV**» (MOS-620) или «**VAR**» (GOS-625) на панели осциллографа, увеличить горизонтальный размер петли примерно до 10 больших делений масштабной сетки экрана.

10. Регуляторами осциллографа «**< POSITION >**» и «**POSITION $\frac{D}{\tilde{N}}$** » установить петлю симметрично относительно центра координатных осей X-Y.

11. Измерить по масштабной сетке экрана осциллографа координаты пяти характерных точек петли: x_k , $x_{\text{нас}}$, $y_{\text{ост}}$, y_s , $y_{\text{нас}}$ (рис. 3.7). Результаты измерений занести в табл. 3.2. Петлю гистерезиса зарисовать или сфотографировать.

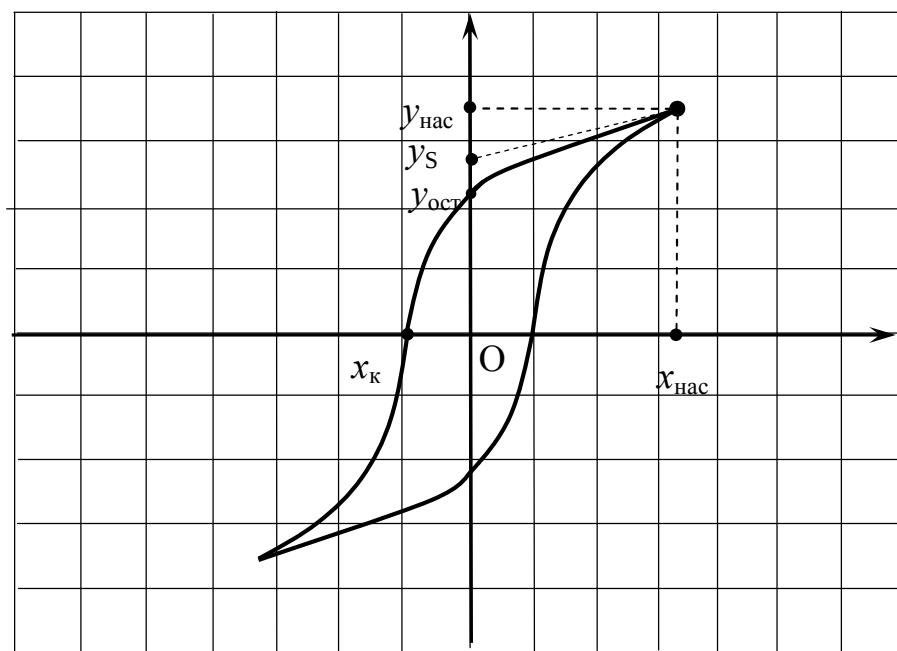


Рис. 3.7. Осциллограмма диэлектрического гистерезиса

12. Деполяризовать образец. Для этого, постепенно уменьшая напряжение U_y , довести его до нуля. При этом площадь петли уменьшится до размеров точки.

13. Устанавливая последовательно значения U_y от 0 до $U_y^{\text{нас}}$ с шагом примерно 0,2-0,4 В, измерить соответствующие значения напряжения U_x . Результаты измерений занести в табл. 3.3.

14. Нажать кнопку «Исходная установка» и кнопками «**СЕТЬ**» и «**POWER**» выключить питание генераторов напряжения, мультиметров и осциллографа. Разобрать электрическую цепь установки.

Обработка результатов измерений

1. По формулам

$$P_{\text{нас}} = \frac{C_2}{S} U_y^{\text{нас}} \cdot \sqrt{2}, \quad E_{\text{нас}} = \frac{R_1}{R_2 d} U_x^{\text{нас}} \cdot \sqrt{2}, \quad (3.17)$$

полученным из (3.11) и (3.16), и данным табл. 3.2 рассчитать поляризованность и напряжённость поля при насыщении сегнетоэлектрика. Мультиметры измеряют действующие напряжения U_x и U_y , поэтому их значения необходимо умножать на $\sqrt{2}$, чтобы получить амплитудные значения напряжений.

2. Спонтанную P_s , остаточную поляризованность $P_{\text{ост}}$ и коэрцитивную силу E_k найти по формулам

$$P_s = P_{\text{нас}} \frac{y_s}{y_{\text{нас}}}, \quad P_{\text{ост}} = P_{\text{нас}} \frac{y_{\text{ост}}}{y_{\text{нас}}}, \quad E_k = E_{\text{нас}} \frac{x_k}{x_{\text{нас}}}. \quad (3.18)$$

Результаты расчётов занести в табл. 3.2.

3. По формулам

$$P = \frac{C_2}{S} U_y \cdot \sqrt{2}, \quad E = \frac{R_1}{R_2 d} U_x \cdot \sqrt{2}, \quad \varepsilon = \frac{P}{\varepsilon_0 E} \quad (3.19)$$

и данным табл. 3.3 рассчитать значения поляризованности, напряжённости и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Результаты расчётов занести в табл. 3.3.

4. Систематические относительные погрешности косвенных измерений величин, выражаемых формулами (3.19), определяются так:

$$\gamma_P = \frac{\theta U_y}{U_y} \cdot 100\%, \quad \gamma_E = \frac{\theta U_x}{U_x} \cdot 100\%, \quad \gamma_\varepsilon = 1,1 \sqrt{(\gamma_P)^2 + (\gamma_E)^2}, \quad (3.20)$$

где $\frac{\theta U_x}{U_x}$, $\frac{\theta U_y}{U_y}$ – **систематические относительные** погрешности прямых измерений напряжений U_x и U_y (табл. 3.1 отчёта).

5. Оформить отчёт в соответствии с прилагаемым образцом.

Отчёт по лабораторной работе “Изучение свойств сегнетоэлектриков”

Исполнитель: студент(ка) _____
группа _____

Цель работы: ...

Краткое описание метода исследования: ...

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в “СИ”).

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 3.1

Наименование прибора	Предел допускаемой основной относительной погрешности (в % от измеренного значения)	Абсолютная погрешность
Вольтметр	$\theta U/U = 0,8 \%$	—
Линейка или шкала осциллографа	—	$\theta l = \dots$

Результаты измерений и вычислений

Таблица 3.2

Параметры установки: $C_2 = \dots$ мкФ, $d = 3,2 \cdot 10^{-3}$ м, $S = 1,23 \cdot 10^{-3}$ м ² , $R_1 = \dots$ Ом, $R_2 = \dots$ Ом				
$U_x^{\text{нас}} = \dots$ В			$U_y^{\text{нас}} = \dots$ В	
$x_{\text{нас}} = \dots$ мм	$x_k = \dots$ мм	$y_{\text{нас}} = \dots$ мм	$y_S = \dots$ мм	$y_{\text{ост}} = \dots$ мм
$E_{\text{нас}} = \dots$ В/м	$E_k = \dots$ В/м	$P_{\text{нас}} = \dots$ Кл/м ²	$P_S = \dots$ Кл/м ²	$P_{\text{ост}} = \dots$ Кл/м ²

Таблица 3.3

$U_x, \text{ В } (V_1)$	$U_y, \text{ В } (V_2)$	$E, \text{ В/м}$	$P, \text{ Кл/м}^2$	ϵ
...	...	...	...	...

Расчёты

1. $E_{\text{нас}} = \dots = \dots = \dots$ В/м;
2. $P_{\text{нас}} = \dots = \dots = \dots$ Кл/м²;
3. $E_k = \dots = \dots = \dots$ В/м;
4. $P_S = \dots = \dots = \dots$ Кл/м²;
5. $P_{\text{ост}} = \dots = \dots = \dots$ Кл/м²;
6. $E = \dots = \dots = \dots$ В/м;
7. $P = \dots = \dots = \dots$ Кл/м²;
8. $\epsilon = \dots = \dots = \dots$;
9. $\gamma_P = \dots = \dots = \dots$ %;
10. $\gamma_E = \dots = \dots = \dots$ %;
11. $\gamma_\epsilon = \dots = \dots = \dots$ %;
12. Вывод.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Расчёт E и P для одного любого значения из табл. 3.3

Примечание. Построенные согласно табл. 3.3 графики $P = f(E)$ и $\epsilon = g(E)$, а также изображение петли гистерезиса прилагаются к отчёту.

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА И ПОЛУПРОВОДНИКА

Цель работы: экспериментально определить температурный коэффициент сопротивления металла и ширину запрещённой зоны полупроводника.

По электрическим свойствам вещества разделяют на три класса: проводники, диэлектрики и полупроводники. Типичными проводниками являются **металлы**, у которых удельное электрическое сопротивление $\rho < 10^{-6}$ Ом·м. Удельное электрическое сопротивление **полупроводников** обычно лежит в пределах от 10^{-6} до 10^{14} Ом·м. Материалы, у которых величина $\rho > 10^{14}$ Ом·м, относятся к **диэлектрикам**. Полупроводниками являются ряд элементов III–VI групп таблицы элементов Д.И. Менделеева (B, Ge, Si, As, Te и т.д.), а также большое число химических соединений (GaAs, GaP, ZnS, SiC и др.). В зависимости от внешних условий (температура, давление) одно и то же вещество может относиться к разным классам. Например, германий при температуре жидкого азота 77 К – диэлектрик, при комнатной температуре – полупроводник, а в жидком состоянии является проводником.

Квантовая теория твёрдого тела даёт более обоснованную классификацию веществ. Согласно этой теории, электроны в атоме могут иметь только определённые значения энергии, которые называют **энергетическими уровнями**. Именно эти уровни при объединении отдельных атомов в кристалл образуют **разрешённые энергетические зоны**. Промежуток, разделяющий такие зоны, называют **запрещённой зоной** (рис. 4.1). Энергетическая зона считается заполненной, если все уровни зоны заняты электронами. При этом, согласно принципу Паули, на одном энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, имеющих противоположно направленные спины. Зона считается свободной, если все уровни этой зоны не заняты.

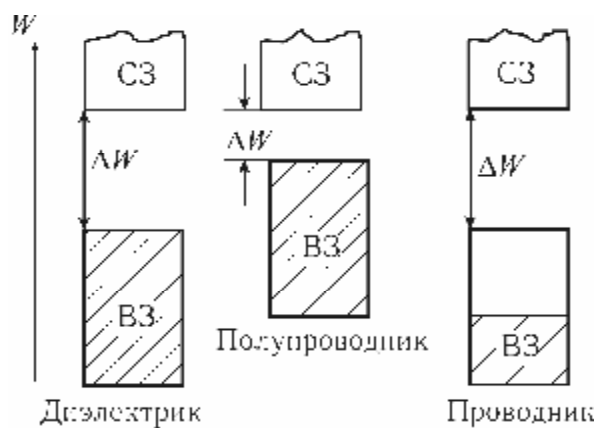


Рис. 4.1. Энергетические зоны:
ВЗ – валентная; СЗ – свободная; ΔW – ширина запрещённой зоны. Штриховкой отмечена заполненная часть зоны (при абсолютной температуре $T = 0$ К).

Если в веществе валентные электроны, ответственные за все электрические свойства, образуют полностью заполненную зону (её называют **валентной зоной**) так, что последующая разрешённая зона свободна (её называют **зоной проводимости**), то электропроводность такого вещества равна нулю, и оно является диэлектриком. Действительно, движение электронов под действием внешнего электрического поля (электрический ток), предполагает увеличение энергии электронов, то есть переход их на более высокий незанятый энергетический уровень. В случае же

полностью заполненной валентной зоны таких уровней нет, значит, в веществе с такой зонной структурой электрон не может ускоряться внешним электрическим полем.

Для того чтобы перевести электроны из валентной зоны в зону проводимости, им следует сообщить энергию, не меньшую, чем ширина запрещённой зоны ΔW . Часть электронов приобретает эту энергию при облучении вещества светом или за счёт теплового движения атомов. Поэтому при обычных температурах ($T \approx 300 \text{ K}$) в зоне проводимости есть некоторое количество электронов. В зависимости от их концентрации вещество может быть либо диэлектриком, либо полупроводником, причём различие между этими классами определяется значениями ΔW и температуры T . Для полупроводников при комнатной температуре ширина запрещённой зоны ΔW составляет 0,02 – 2 эВ, а для диэлектриков – больше 2 эВ.

Температурная зависимость проводимости полупроводников определяется изменением концентрации носителей тока – электронов, перешедших в зону проводимости. При увеличении температуры их количество экспоненциально возрастает, поэтому сопротивление R чистых полупроводников уменьшается с ростом температуры T по закону

$$R = A \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right), \quad (4.1)$$

где A – величина, слабо зависящая от температуры; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана.

Проводники имеют другую зонную структуру. Валентные электроны частично заполняют зону (рис. 4.1), при этом электроны могут свободно перемещаться под действием внешнего электрического поля. Валентная зона является в данном случае зоной проводимости. В проводнике концентрация свободных электронов не зависит от температуры – в этом основное отличие проводника от полупроводника и диэлектрика. Для проводников зависимость сопротивления от температуры значительно слабее, чем для диэлектриков. Она определяется рассеянием энергии электронов при взаимодействии с дефектами и фононами (квантами упругих волн) кристаллической решетки. С ростом температуры увеличивается число фононов, что ведет к снижению длины свободного пробега электронов проводимости в металле. При этом электрическое сопротивление R проводников увеличивается по линейному закону

$$R = R_0(1 + \alpha_t \cdot t), \quad (4.2)$$

где R_0 – сопротивление проводника при 0°C , α_t – температурный коэффициент сопротивления (ТКС), t – температура в градусах Цельсия.

Описание метода исследования

Зависимость сопротивления проводника от температуры (4.2) в координатах $R \leftrightarrow t$ изображается прямой линией, угловой коэффициент которой

$$k_1 = \alpha_t R_0. \quad (4.3)$$

По величине k_1 можно определить значение температурного коэффициента сопротивления исследуемого проводника:

$$\alpha_t = \frac{k_1}{R_0}. \quad (4.4)$$

Значение сопротивления проводника R_0 находится путем экстраполяции полученной линейной зависимости до температуры 0°C .

Для полупроводника зависимость сопротивления от температуры нелинейная, поэтому для её нахождения используют координаты $\ln R \leftrightarrow \frac{1}{T}$, где T – температура по шкале Кельвина. Действительно, логарифмируя уравнение (4.1), получаем

$$\ln R = \ln A + \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (4.5)$$

График функции $\ln R$ от $\frac{1}{T}$ является линейным с угловым коэффициентом:

$$k_2 = \frac{\Delta W}{2k}. \quad (4.6)$$

Это позволяет найти ширину запрещённой зоны полупроводника по формуле:

$$\Delta W = 2k \cdot k_2. \quad (4.7)$$

Таким образом, если экспериментально найти зависимость сопротивления проводника и полупроводника от температуры, то можно рассчитать для первого – ТКС α_t , для второго – ширину запрещённой зоны ΔW .

Описание установки

Оборудование: регулируемый источник постоянного напряжения, миниблоки «Исследование температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника», «Ключ», мультиметры.

Электрическая схема установки показана на рис. 4.2, описание миниблока – на рис. 4.3, а монтажная схема – на рис. 4.4.

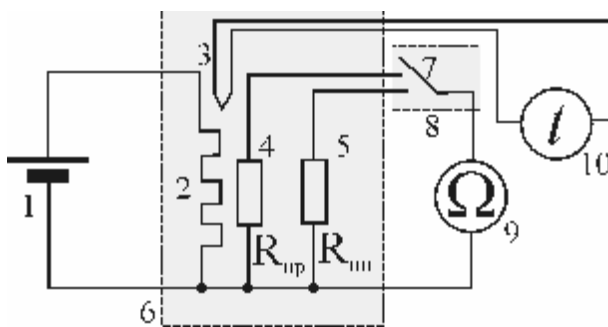


Рис. 4.2. Электрическая схема:

1 – регулируемый источник постоянного напряжения («0 ... +15 В»); 2 – электронагреватель; 3 – термопара; 4, 5 – исследуемые образцы проводника и полупроводника; 6 – миниблок «Исследование температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника»; 7 – переключатель; 8 – блок «Ключ»; 9 – мультиметр в режиме измерения сопротивления; 10 – мультиметр в режиме измерения температуры

Электронагреватель 2 подключен к регулируемому источнику постоянного напряжения 1 («0...+15 В»). При включении источника начинается нагрев исследуемых образцов. Для измерения сопротивления образцов 4, 5 в режиме непрерывного нагрева их поочередно подсоединяют к мультиметру 9 с помощью переключателя 7. Температуру образцов измеряют с помощью термопары 3, напряжение с которой подаётся на клеммы измерителя температуры (мультиметр 10).

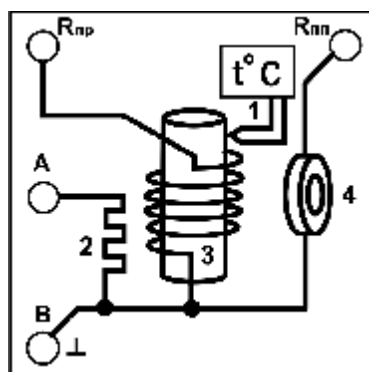


Рис. 4.3. Миниблок «Исследование температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника»:

- 1 – клеммы термопары для подключения к мультиметру;
- 2 – нагреватель печи;
- 3 – проводник;
- 4 – полупроводник;
- $R_{пр}$ – вывод проводника;
- $R_{пп}$ – вывод полупроводника

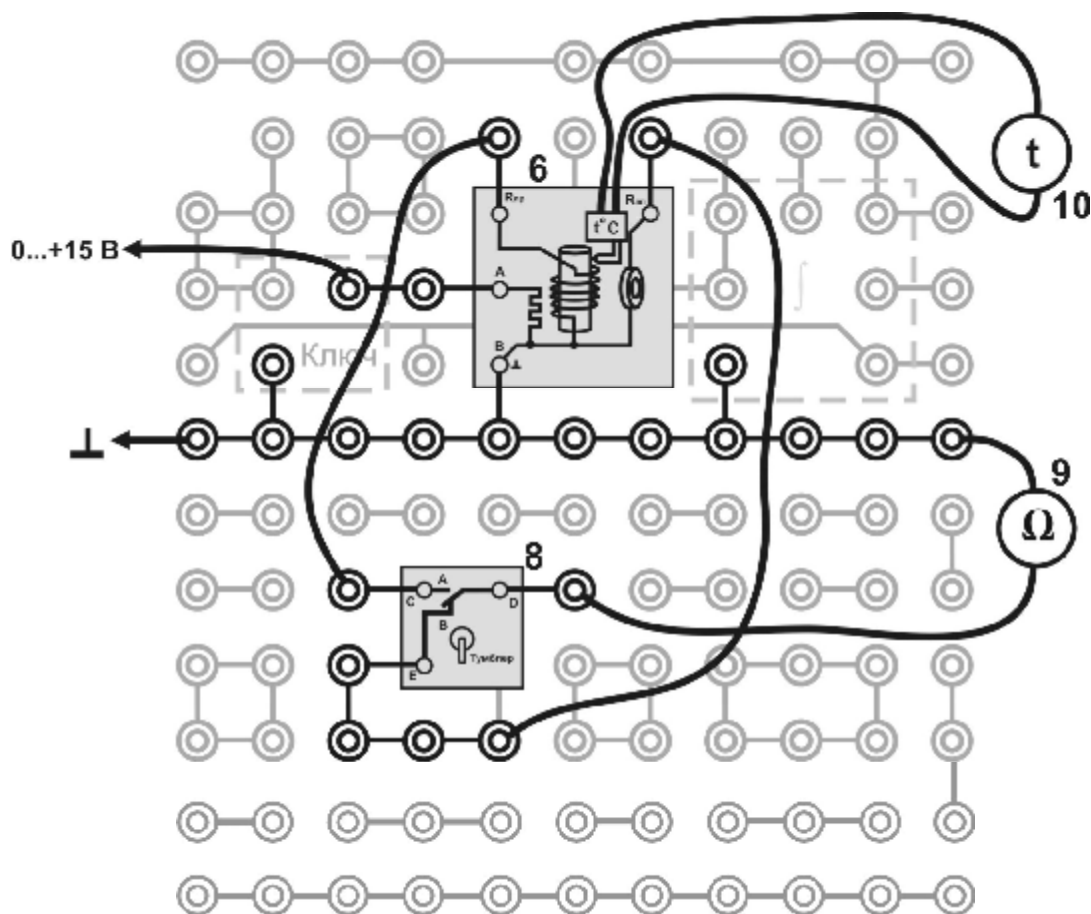


Рис. 4.4. Монтажная схема установки:
6, 8, 9, 10 – см. рис. 4.2

Выполнение работы

1. Заполнить табл. 4.2 (см. бланк отчёта).
2. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 4.4. При подсоединении термопары к мультиметру необходимо учитывать полярность подключения проводов.
3. Включить в сеть блоки питания генераторов и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка».
4. Установить необходимые режимы измерений мультиметров. Учесть, что при измерении сопротивления проводника переключатель диапазонов ставится в положение 200 Ом, а полупроводника – 2 кОм или 20 кОм.
5. С помощью миниблока «Ключ» подключая поочередно к мультиметру проводник (положение А) и полупроводник (положение В), измерить их сопротивление при комнатной температуре. Результаты измерений записать в табл. 4.3 (см. бланк отчёта).
6. Кнопками «Установка напряжения 0 ... +15 В» установить по индикатору напряжение на середине шкалы. Если нагрев будет происходить слишком медленно, то можно напряжение поднять.
7. По мере нагрева образцов, измерять по п. 4 их сопротивления через каждые 5 °С до 70 °С. Результаты измерений записать в табл. 4.3.
8. **Выключить из сети** блоки питания генераторов напряжений и мультиметров.

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 4.3 построить график температурной зависимости сопротивления проводника от температуры в координатах $R \leftrightarrow t$. Ось температуры следует начинать с 0 °С.

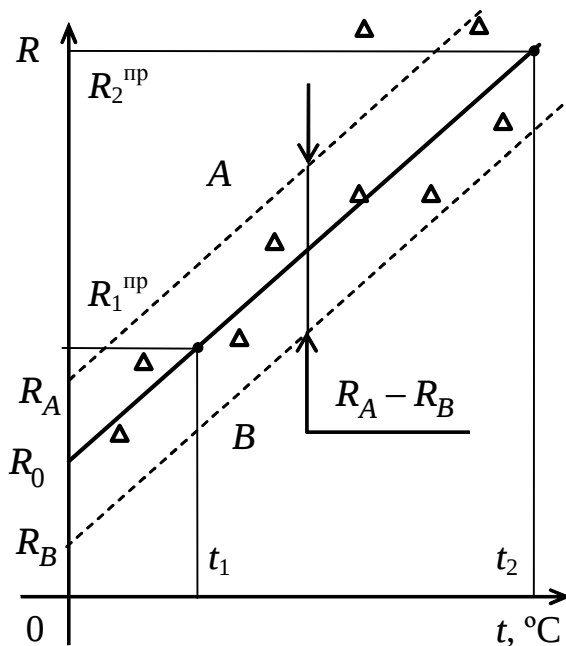


Рис. 4.5. Зависимость сопротивления проводника от температуры

2. Экстраполируя полученную линейную зависимость до пересечения с осью ординат, найти сопротивление проводника R_0 при температуре 0 °С.

3. По полученному графику рассчитать среднее значение углового коэффициента k_1 . Для этого на **концах** экспериментальной прямой выбрать две точки 1 и 2 и спроецировать их на координатные оси. Тогда

$$k_1 = \frac{R_2^{\text{np}} - R_1^{\text{np}}}{t_2 - t_1}. \quad (4.8)$$

4. По формуле (4.4) вычислить величину среднего температурного коэффициента сопротивления α_t исследуемого проводника.

5. По данным табл. 4.3 построить для полупроводника график в координатах $\ln R \leftrightarrow \frac{1}{T}$. Линейный характер этого графика подтверждает экспоненциальный характер зависимости сопротивления полупроводника от температуры.

6. По этому графику определить среднее значение углового коэффициента прямой k_2 аналогично п. 3:

$$k_2 = \frac{(\ln R^{\text{III}})_2 - (\ln R^{\text{III}})_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}. \quad (4.9)$$

7. По формуле (4.7) вычислить ширину запрещенной зоны полупроводника ΔW . Записать её значение в джоулях и электрон-вольтах.

Оценка погрешностей измерений

1. **Систематическая относительная** погрешность при косвенном многократном измерении температурного коэффициента сопротивления находится по известным правилам. За исходную функцию удобно взять выражение, полученное из формулы (4.2)

$$\alpha_t = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot t} = \frac{1}{t} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right). \quad (4.10)$$

Тогда

$$\gamma = \frac{\theta \alpha_t}{\alpha_t} = 1,1 \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\theta R}{R} \right)^2 + \left(\frac{\theta t}{t} \right)^2}; \quad (4.11)$$

здесь $\frac{\theta R}{R}$, $\frac{\theta t}{t}$ – систематическая относительная погрешность мультиметра при измерении сопротивления и температуры (табл. 4.2).

2. **Случайная относительная** погрешность косвенных измерений величины α_t находится по тому же правилу, что и в п. 1. В качестве исходной функции удобно взять расчётную формулу (4.4). Тогда

$$\varepsilon = \frac{\delta \alpha_t}{\alpha_t} = \sqrt{\left(\frac{\delta k_1}{k_1} \right)^2 + \left(\frac{\delta R_0}{R_0} \right)^2}, \quad (4.12)$$

где δk_1 , δR_0 – доверительные границы **случайной абсолютной** погрешности среднего углового коэффициента и сопротивления проводника при температуре 0 °С.

Поскольку зависимость сопротивления проводника от температуры является функцией линейной и изображается прямой, то погрешности δk_1 и δR_0 наиболее просто найти графическим способом по формулам:

$$\delta k_1 = \frac{t_{P,N}(R_A - R_B)}{2\sqrt{N}(t_2 - t_1)}, \quad \delta R_0 = \frac{t_{P,N}(R_A - R_B)}{4\sqrt{N}}, \quad (4.13)$$

где $t_{P,N}$ – коэффициент Стьюдента, P – доверительная вероятность, N – число измерений, R_A, R_B – см. на рис. 4.5. Провести параллельно экспериментальной прямой по обе стороны две прямые A и B по возможности ближе так, чтобы большинство точек, (кроме промахов) оказалось внутри.

Коэффициенты Стьюдента

Таблица 4.1

N	5	6	8	10	20
$P = 0,95$	2,8	2,6	2,4	2,3	2,1

3. Доверительная граница **полной относительной** погрешности рассчитывается по формуле

$$E = \frac{\Delta\alpha_t}{\alpha_t} = \sqrt{\varepsilon^2 + \gamma^2}. \quad (4.14)$$

4. **Полная абсолютная** погрешность находится из её связи с относительной

$$\Delta\alpha_t = \frac{E}{100\%} \cdot \alpha_t. \quad (4.15)$$

5. По аналогичной схеме рассчитываются погрешности косвенных измерений энергии активации полупроводника.

6. Оформить отчёт по работе в соответствии с прилагаемым образцом и сравнить α_t и ΔW с табличными значениями (табл. 4.4, 4.5).

Отчёт по лабораторной работе «Изучение температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника»

Исполнитель студент(ка) _____

группа _____

Цель работы: ...

Краткое описание метода исследования: ...

Расчетные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать единицы их измерения в СИ) ...

Оборудование: ...

Средства измерений и их характеристики

Таблица 4.2

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Омметр	$\theta R/R = 0,8 \%$
Термометр	$\theta t/t = 1,0 \%$

Результаты измерений

Таблица 4.3

№	$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$1/T, \text{K}^{-1}$	$R_{\text{пр}}, \text{Ом}$	$R_{\text{пп}}, \text{Ом}$	$\ln R_{\text{пп}}$
1						
2						
...	...					
N	70					

Результаты расчетов

1. $k_1 = \dots = \dots \text{ Ом}/^\circ\text{C};$ (4.8)

2. $R_0 = \dots \text{ Ом};$

3. $\alpha_t = \dots = \dots 1/^\circ\text{C};$ (4.10)

4. $\gamma = \dots = \dots \%;$ (4.11)

5. $\delta k_1 = \dots = \dots \text{ Ом}/^\circ\text{C};$ (4.13)

6. $\delta R_0 = \dots \text{ Ом};$ (4.13)

7. $\varepsilon = \dots = \dots \%;$ (4.12)

8. $E = \dots = \dots \%;$ (4.14)

9. $\Delta\alpha_t = \dots = \dots 1/^\circ\text{C};$ (4.15)

10. Окончательный результат: $\alpha_t = \dots \pm \dots 1/^\circ\text{C}, E = \dots \%;$

11. $k_2 = \dots = \dots \text{ К};$ (4.9)

12. $\Delta W = \dots = \dots \text{ Дж} = \dots \text{ эВ.}$ (4.7) (1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

13. Оценка погрешностей ширины запрещенной зоны ΔW исследуемого полупроводника.

14. Вывод.

Примечание. К отчёту прилагаются два графика, построенные по данным табл. 4.3.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Температурный коэффициент сопротивления

Таблица 4.4

Вещество	$\alpha_t \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Al	4,5
W	5,1
Cu	4,3
Pb	4,2
Ag	4,1
Нихром	0,2

Ширина запрещённой зоны веществ

Таблица 4.5

Вещество	$\Delta W, \text{ эВ}$ (при 20 °C)
C (алмаз)	5,40
Se	1,79
Ge	0,66
Si	1,11
GaAs	1,43
InAs	0,36

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Цель работы: ознакомиться с явлением Холла, определить постоянную Холла и концентрацию электронных носителей в полупроводнике.

Рассмотрим пластинку из однородного проводника (или полупроводника), к торцам которой припаяны четыре контакта (рис. 5.1). Если пластинку поместить в магнитное поле, вектор индукции $\vec{B}$ которого перпендикулярен пластинке, то при пропускании тока I в направлении 1–2 между контактами 3–4 возникает разность потенциалов $U_{\text{холл}}$. Это явление получило название *эффекта Холла*. Он был открыт в 1879 г. американским физиком Э.Г. Холлом.

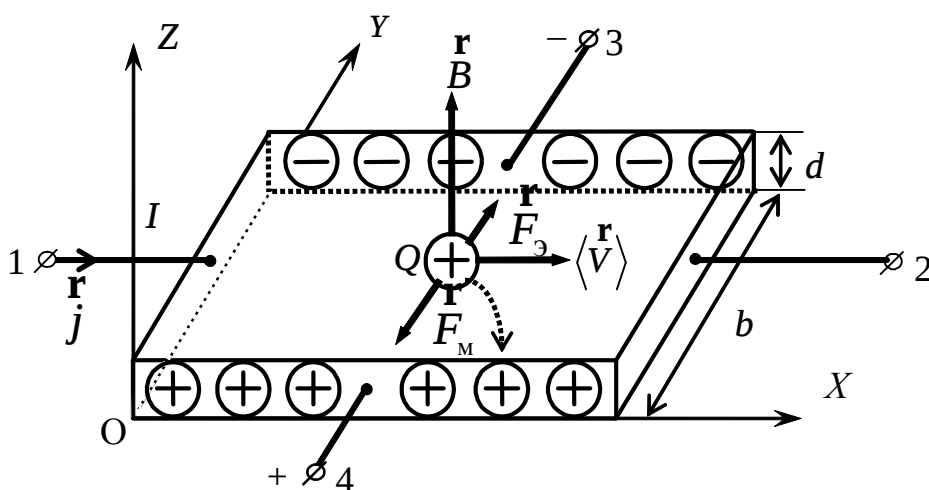


Рис. 5.1. Эффект Холла

Эффект Холла можно объяснить следующим образом. Пусть ток I в пластинке обусловлен движением частиц – носителей положительных зарядов Q . Если их концентрация n , а $\langle \vec{v} \rangle$ – средняя скорость их упорядоченного движения, то сила тока

$$I = JS = Q \langle v_x \rangle nbd, \quad (5.1)$$

где J – плотность тока, $S = bd$ – площадь поперечного сечения пластинки, $\langle v_x \rangle$ – проекция вектора $\langle \vec{v} \rangle$ на направление вектора $\vec{J}$ (на ось OX).

На заряженную частицу Q , движущуюся в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$, действует магнитная составляющая силы Лоренца

$$\vec{F}_M = Q [\langle \vec{v} \rangle, \vec{B}]. \quad (5.2)$$

Эта сила будет отклонять заряды к одному из торцов пластинки. В результате на этом торце окажется избыток зарядов, а на противоположном – недостаток. По

этой причине в пластинке возникает электрическое поле, вектор напряжённости которого $\vec{E}$ направлен по оси ОУ. Сила, действующая на заряд Q со стороны этого поля (электрическая составляющая силы Лоренца),

$$\vec{F}_э = Q \cdot \vec{E}, \quad (5.3)$$

будет направлена противоположно силе $\vec{F}_м$. Разделение зарядов прекратится, когда сила Лоренца будет равна нулю, то есть

$$Q \cdot \vec{E} + Q[\langle \vec{v} \rangle, \vec{B}] = 0. \quad (5.4)$$

Из этого уравнения находим напряжённость установившегося электрического поля

$$\vec{E} = -[\langle \vec{v} \rangle, \vec{B}]. \quad (5.5)$$

Спроецируем вектор напряженности $\vec{E}$ на ось ОУ

$$E_y = -\langle v_x \rangle \cdot B. \quad (5.6)$$

Тогда разность потенциалов между точками 3 и 4 определится как

$$\varphi_3 - \varphi_4 = -\int_0^b E_y dy = \langle v_x \rangle Bb.$$

Подставляя вместо $\langle v_x \rangle$ её значение из (5.1) и, обозначая $\varphi_3 - \varphi_4 = U_{\text{холл}}$, получим

$$U_{\text{холл}} = \frac{I}{Qnd} \cdot B = R_{\text{холл}} \cdot \frac{I}{d} \cdot B, \quad (5.7)$$

где $\frac{1}{Qn} = R_{\text{холл}}$ – величина, которая называется **постоянной Холла**.

Более строгая теория, учитывающая взаимодействие носителей тока с кристаллической решеткой, дает следующее значение постоянной Холла

$$R_{\text{холл}} = \frac{r}{Qn}, \quad (5.8)$$

где r – параметр, называемый Холл-фактором. Он зависит от магнитного поля, температуры, свойств материала образца и всегда больше единицы. Например, для германия при комнатной температуре $r = 3\pi/8$.

Из последней формулы следует, что знак постоянной Холла определяется знаком носителей заряда. Для металлов и полупроводников с электронной проводимостью (n -типа) $R_{\text{холл}} < 0$, а для полупроводников с дырочной проводимостью (p -типа) $R_{\text{холл}} > 0$.

Описание метода исследования

Холловское напряжение $U_{\text{холл}}$, согласно формуле (5.7), линейно зависит от магнитной индукции B и от протекающего в образце тока I . Если опытным путём получить эти зависимости, то по угловому коэффициенту экспериментальной прямой k можно определить постоянную Холла $R_{\text{холл}}$. Действительно, так как

$$U_{\text{холл}} = R_{\text{холл}} \cdot \frac{I}{d} \cdot B = k \cdot B, \quad (5.9)$$

то величина углового коэффициента

$$k = R_{\text{холл}} \cdot \frac{I}{d}. \quad (5.10)$$

Отсюда для постоянной Холла получаем

$$R_{\text{холл}} = k \cdot \frac{d}{I}. \quad (5.11)$$

В качестве источника постоянного магнитного поля используют электромагнит. Величина индукции магнитного поля B в зазоре сердечника электромагнита нелинейно зависит от намагничивающего тока $I_{\text{эм}}$ в его обмотке. Однако на кривой намагничивания сердечника можно выделить практически линейный участок, для которого будет справедлива формула

$$B = \mu_0 I_{\text{эм}} \frac{N}{h}, \quad (5.12)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; N – число витков электромагнита; h – величина воздушного зазора сердечника электромагнита.

При проведении эксперимента задача измерения $U_{\text{холл}}$ осложняется тем, что контакты 3–4 на образце (рис. 5.1) могут быть установлены с некоторым смещением относительно друг друга. В этом случае напряжение между ними будет обусловлено не только эффектом Холла, но и омическим падением напряжения $U_{\text{ом}}$, вследствие протекания основного тока через образец. Поэтому измерения $U_{\text{холл}}$ при каждом значении тока следует проводить для двух противоположных направлений вектора индукции магнитного поля. Тогда холловское напряжение будет менять знак, а омическое напряжение будет оставаться постоянным. При одном направлении магнитного поля измеряемая разность потенциалов

$$U^{\rightarrow} = U_{\text{ом}} - U_{\text{холл}}, \quad (5.13)$$

а при другом его направлении

$$U^{\leftarrow} = U_{\text{ом}} + U_{\text{холл}}. \quad (5.14)$$

Исключая из этих двух уравнений неизвестную величину $U_{\text{ом}}$, получаем

$$U_{\text{холл}} = \left| \frac{U^{\rightarrow} - U^{\leftarrow}}{2} \right|. \quad (5.15)$$

Описание установки

Оборудование: генератор постоянного напряжения, миниблок «Эффект Холла», мультиметры, соединительные провода.

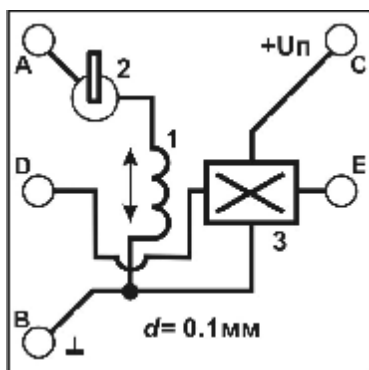


Рис. 5.2. Миниблок «Эффект Холла»:

1 – электромагнит, 2 – переключатель направления тока в обмотке электромагнита, 3 – датчик Холла. Вход В подключается к земле. Вход С – к источнику напряжения «+15 В». На вход А подводится регулируемое напряжение «0 ... +15 В». С выходов DE снимается напряжение с датчика Холла

Электрическая схема установки приведена на рис. 5.3, монтажная – на рис. 5.4. Исследуемый образец (Д) представляет собой пластинку из германия – полупроводник с примесной проводимостью. Он подсоединён к источнику постоянного напряжения 4 и помещён в зазор сердечника электромагнита 6. Обмотка электромагнита через переключатель 8 соединена с регулируемым источником постоянного напряжения 10. С помощью переключателя можно изменять направление тока в обмотке электромагнита, а значит и направление вектора индукции магнитного поля в зазоре сердечника. Напряжение Холла измеряют цифровым вольтметром 5.

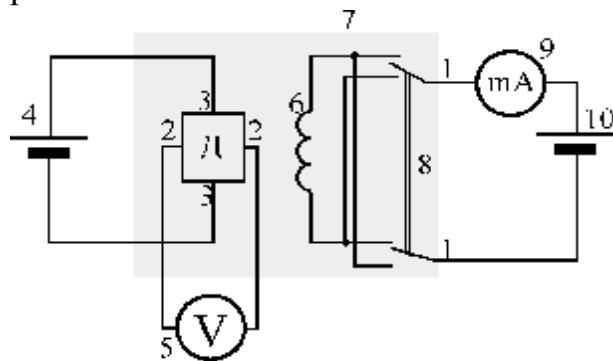


Рис. 5.3. Электрическая схема:

(1–1) цепь питания электромагнита 6: регулируемый источник постоянного напряжения 10, переключатель 8, мультиметр 9;

(2–2) – цепь измерения напряжения Холла мультиметром 5;

(3–3) – цепь питания образца Д: 4 – источник постоянного напряжения «+15 В»;

7 – миниблок «Эффект Холла»

Выполнение работы

1. Заполнить табл. 5.2 (см. бланк отчёта).
2. Записать в табл. 5.3 (см. бланк отчёта) число витков электромагнита N , ширину зазора h и толщину датчика d (указаны на миниблоке «Эффект Холла»).
3. Переключатель рода работ мультиметра 5 (рис. 5.3) перевести в положение «V $\overline{\dots}$ » и установить предел измерения «2 V», мультиметра 9 – в положение «A $\overline{\dots}$ » и установить предел измерения «200 mA»,
4. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 5.4.

10. **Выключить из сети** блоки питания генераторов и мультиметров.

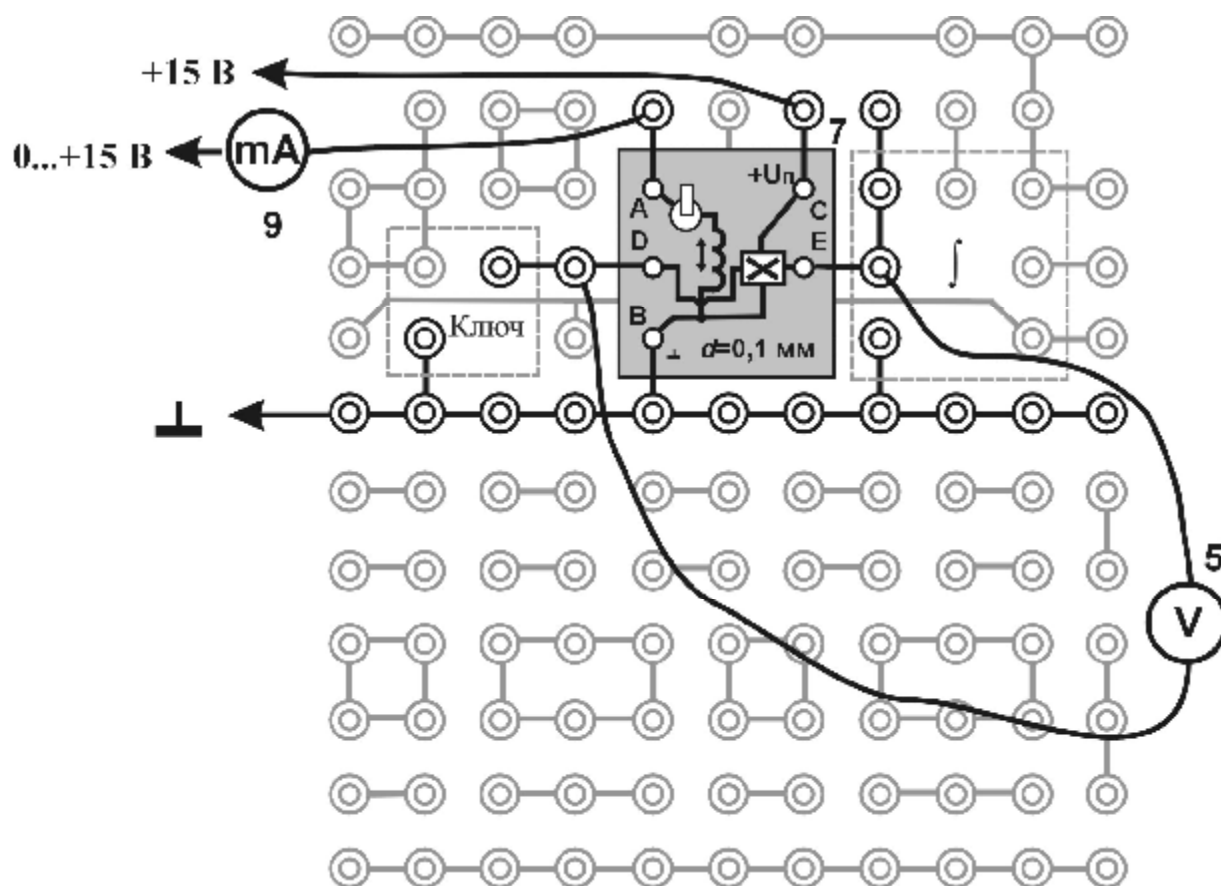


Рис. 5.4. Монтажная схема: обозначения 5, 7, 9 – см. на рис. 5.3

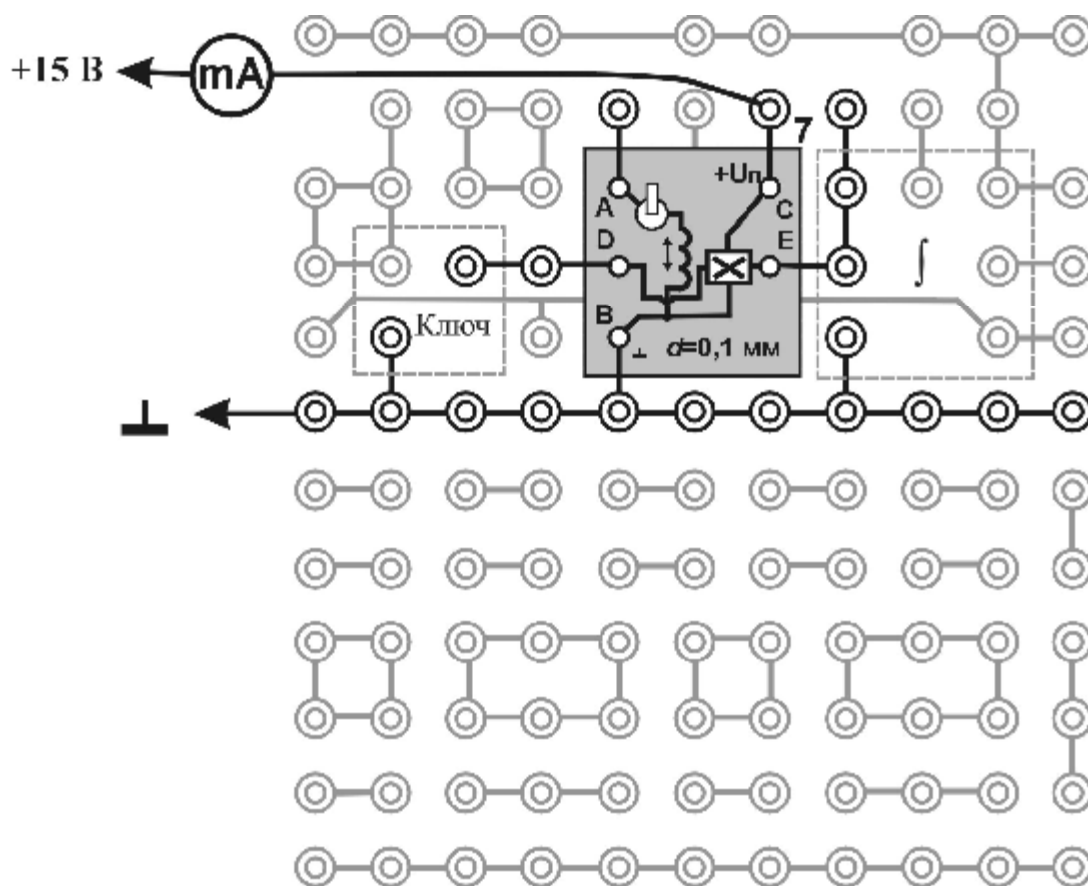


Рис. 5.5. Монтажная схема для измерения рабочего тока датчика Холла

Обработка результатов измерений

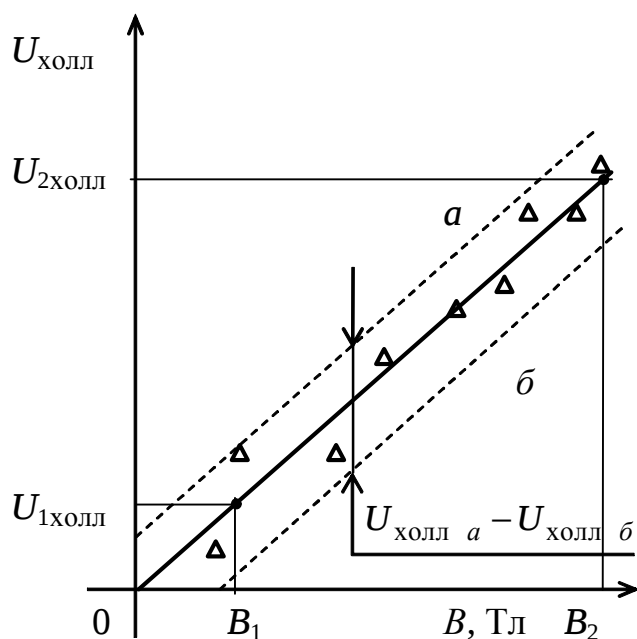


Рис. 5.6. Зависимость холловского напряжения от индукции магнитного поля

1. По формуле (5.12) рассчитать значения магнитной индукции B для каждого значения $I_{эм}$.

2. По формуле (5.15) для каждого значения B вычислить холловское напряжение $U_{холл}$. Результаты расчетов записать в табл. 5.3.

3. Построить график зависимости $U_{холл} = f(B)$. Для этого на графике отложить экспериментальные точки и провести по ним наилучшую прямую.

4. Рассчитать угловой коэффициент k этой прямой. Для этого на **концах** прямой выбрать две произвольные точки 1 и 2 и спроецировать их на координатные оси (рис. 5.6). Тогда

$$k = \frac{U_{2холл} - U_{1холл}}{B_2 - B_1}. \quad (5.16)$$

5. По формуле (5.11) рассчитать среднее значение постоянной Холла для исследуемого полупроводника.

6. Вычислить концентрацию дырок n в исследуемом полупроводнике по формуле (5.8)

$$n = \frac{r}{R_{\text{холл}} \cdot Q}, \quad (5.17)$$

где $Q = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд.

Оценка погрешностей измерений

1. **Систематическая относительная** погрешность косвенных измерений постоянной Холла находится по известному правилу дифференцирования натурального логарифма исходной функции, в качестве которой в нашем случае удобно взять выражение, полученное из формул (5.9), (5.11) и (5.12)

$$R_{\text{холл}} = \frac{U_{\text{холл}} \cdot d \cdot h}{\mu_0 \cdot I \cdot I_{\text{эм}} \cdot N}, \text{ м}^3/\text{Кл}, \quad (5.18)$$

где величины d, h, μ_0, N являются постоянными.

Тогда

$$\gamma = \frac{\theta R_{\text{холл}}}{R_{\text{холл}}} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta U_{\text{холл}}}{U_{\text{холл}}} \right)^2 + \left(\frac{\theta I_{\text{эм}}}{I_{\text{эм}}} \right)^2 + \left(\frac{\theta I}{I} \right)^2}, \quad (5.19)$$

где $\frac{\theta U_{\text{холл}}}{U_{\text{холл}}}, \frac{\theta I_{\text{эм}}}{I_{\text{эм}}}, \frac{\theta I}{I}$, – систематические относительные погрешности мультиметров при измерении холловского напряжения, тока питания обмотки электромагнита и рабочего тока датчика Холла (см. табл. 5.2). $\frac{\theta I_{\text{эм}}}{I_{\text{эм}}} = \frac{\theta I}{I}$.

2. **Случайная относительная** погрешность косвенных измерений постоянной Холла определяется только случайной относительной погрешностью углового коэффициента (5.11), поскольку рабочий ток датчика Холла измеряют однократно:

$$\varepsilon = \frac{\delta R_{\text{холл}}}{R_{\text{холл}}} = \frac{\delta k}{k}, \quad (5.20)$$

где δk – доверительная граница случайной абсолютной погрешности среднего углового коэффициента. Поскольку зависимость холловского напряжения от индукции магнитного поля является линейной (5.9) и изображается прямой, то погрешность δk найдём графическим способом (см. Приложение). Рабочей формулой в этом случае является выражение

$$\delta k = \frac{t_{P,N}(U_{\text{холл } a} - U_{\text{холл } b})}{2\sqrt{N}(B_2 - B_1)}, \quad (5.21)$$

где $t_{P,N}$ – коэффициент Стьюдента, P – доверительная вероятность, N – число измерений, $U_{\text{холл } a}$ и $U_{\text{холл } b}$ – см. на рис. 5.6. Провести параллельно экспериментальной прямой по обе стороны две прямые a и b по возможности ближе так, чтобы большинство точек, (кроме промахов) оказалось внутри.

Коэффициенты Стьюдента

Таблица 5.1

N	5	6	8	10	20
$P = 0,95$	2,8	2,6	2,4	2,3	2,1

3. Доверительная граница **полной относительной** погрешности постоянной Холла рассчитывается по формуле

$$E = \frac{\Delta R_{\text{холл}}}{R_{\text{холл}}} = \frac{\Delta n}{n} = \sqrt{\gamma^2 + \varepsilon^2}, \quad (5.22)$$

которая, как следует из (5.17), совпадает с полной относительной погрешностью концентрации носителей тока n .

4. **Полная абсолютная** погрешность находится из её связи с относительной

$$\Delta n = E \cdot n. \quad (5.23)$$

5. Оформить отчёт по работе в соответствии с прилагаемым образцом.

Отчёт по лабораторной работе **«Изучение эффекта Холла в полупроводниках»**

Исполнитель: студент(ка) _____

Группа _____

Цель работы: ...

Краткое описание метода исследования: ...

Расчетные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать единицы их измерения в системе СИ)...

Оборудование: ...

Средства измерений и их характеристики

Таблица 5.2

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Вольтметр (5)	$\theta U/U = 0,5 \%$
Амперметр (9)	$\theta I/I = 1,5 \%$

Результаты измерений

Таблица 5.3

Параметры установки: $I = \dots$ мА, $N = \dots$ вит., $h = \dots$ мм, $d = \dots$ мм					
№	$I_{эм}, \text{мА}$	$U^{\rightarrow}, \text{В}$	$U^{\leftarrow}, \text{В}$	$B, \text{мТл}$	$U_{холл}, \text{В}$
1					
2					
...					
N					

Результаты расчётов

1. $B = \dots = \dots$ мТл (5.12) (любое значение из табл. 5.3);

2. $U_{холл} = \dots = \dots$ В (5.15) (любое значение из табл. 5.3);

3. $k = \dots = \dots$ В/Тл; (5.16)

4. $R_{холл} = \dots = \dots$ м³/Кл; (5.11)

5. $n = \dots = \dots$ м⁻³; (5.17)

6. $\gamma = \dots = \dots$ %; (5.19)

7. $\delta k = \dots = \dots$ В/Тл; (5.21)

8. $\varepsilon = \dots = \dots$ %; (5.20)

9. $E = \dots = \dots$ %; (5.22)

10. $\Delta n = \dots = \dots$ м⁻³; (5.23)

11. $\Delta R_{холл} = \dots = \dots$ м³/Кл;

12. Окончательные результаты:

$$R_{холл} = \dots \pm \dots, \text{м}^3/\text{Кл}, \quad E = \dots \text{ \%}.$$

$$n = \dots \pm \dots, \text{м}^{-3}$$

13. Вывод.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Примечание. К отчёту прилагается график, построенный по данным табл. 5.3.

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОГО ПЕРЕХОДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Цель работы: Построение вольтамперной характеристики полупроводникового диода, определение контактной разности потенциалов невырожденного р-п-перехода.

Теория невырожденного р-п-перехода

Зона контакта двух невырожденных полупроводников р- и п-типа, называемая р-п-переходом, является основным элементом большинства полупроводниковых приборов. Полупроводник называется невырожденным, если он легирован небольшим количеством примесей так, чтобы их валентные электроны не образовывали зону. В полупроводнике п-типа основными носителями заряда являются электроны, отданные донорными примесями в зону проводимости, а неосновными – дырки. В полупроводнике р-типа, наоборот, основными носителями заряда являются дырки, образовавшиеся в валентной зоне при захвате электронов акцепторными примесями, а неосновными – электроны (рис. 6.1).

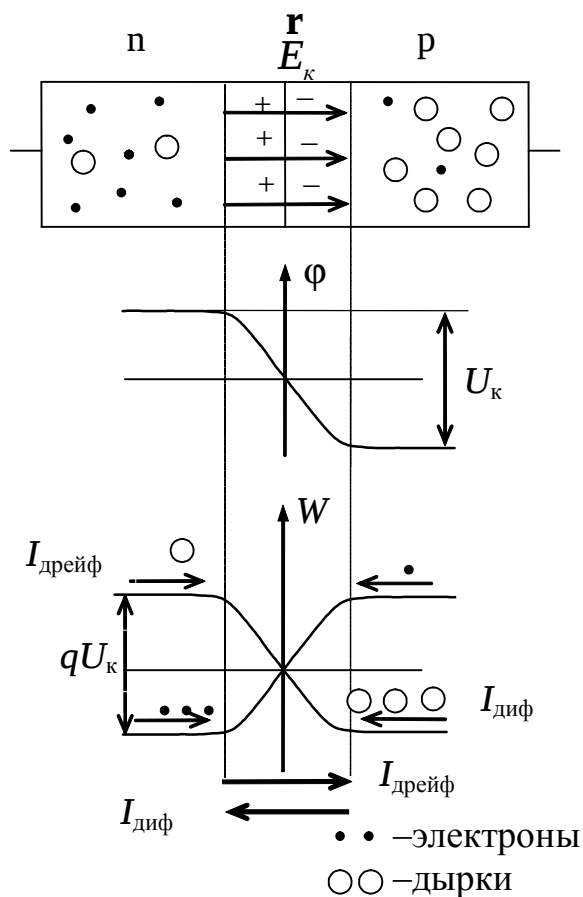


Рис. 6.1

торными примесями, а неосновными – электроны (рис. 6.1).

Вследствие существования градиента концентрации электронов и дырок в области р-п-перехода происходит процесс диффузии основных носителей в тот полупроводник, где их мало. При этом электроны из п-полупроводника уходят в р-полупроводник, оставляя неподвижные ионы доноров с положительным зарядом. Дырки из р-полупроводника уходят в п-полупроводник, оставляя неподвижные ионы акцепторов с отрицательным зарядом. На границе возникают области объёмных зарядов, которые образуют двойной электрический слой толщиной 0,1 – 1 мкм с контактной разностью потенциалов U_k . На рис. 6.1 показано равновесное распределение потенциала электрического поля и потенциальной энергии электронов и дырок $W=q\phi$ в р-п-переходе. Диффундируя, электроны и дырки рекомбинируют друг с другом.

Поэтому р-п-переход оказывается сильно обеднённым носителями заряда и приобретает большое сопротивление. Контактное электрическое поле $\vec{E}_k$ препятствует дальнейшей взаимной диффузии основных носителей. Возникает потенциа-

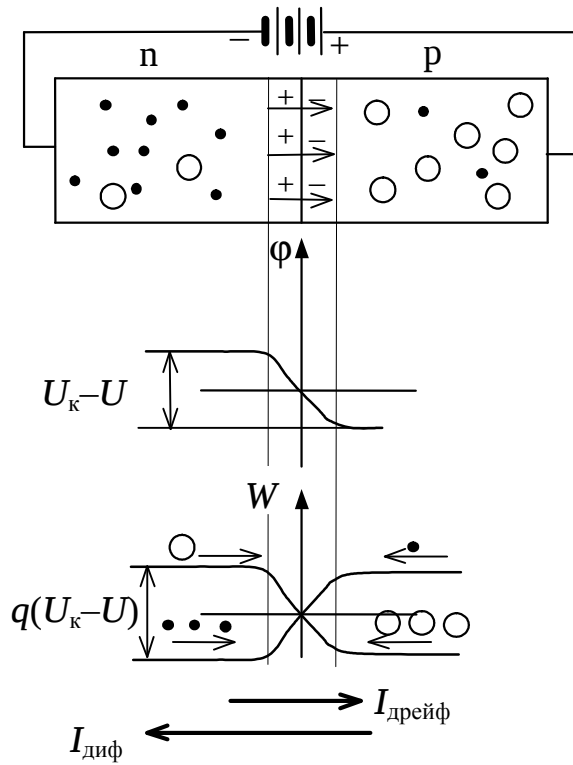


Рис. 6.2

ный барьер qU_k как для электронов, так и для дырок. Некоторому количеству основных носителей удаётся преодолеть этот потенциальный барьер, возникает малый ток диффузии $I_{\text{диф}}$. Контактное поле способствует встречному дрейфу неосновных носителей, возникает ток дрейфа $I_{\text{дрейф}}$. При динамическом равновесии ток диффузии равен току дрейфа: $I_{\text{диф}} = I_{\text{дрейф}}$. Результирующий ток равен нулю. Количество основных носителей заряда, которые могут преодолеть потенциальный барьер вследствие теплового движения, определяется законом Больцмана. Поэтому сила тока диффузии, пропорциональная числу диффундировавших электронов и дырок,

$$I_{\text{диф}} = I_0 \exp\left(-\frac{qU_k}{kT}\right). \quad (6.1)$$

Здесь I_0 – константа, зависящая от природы контактирующих полупроводников, qU_k – высота потенциального барьера, kT – мера тепловой энергии.

Рассмотрим влияние внешнего электрического поля $\vec{E}_{\text{внеш}}$. Пусть к переходу приложено прямое напряжение U : потенциал n-области – отрицательный, потенциал p-области – положительный. Внешнее поле ослабляет контактное, уменьшается высота потенциального барьера, ток диффузии возрастает (см. рис. 6.2). Ток дрейфа (неосновных носителей, увлекаемых полем) не изменяется, оставаясь малым, поскольку мала концентрация неосновных носителей заряда.

Уравнение результирующего тока через p-n-переход

$$\begin{aligned} I &= I_{\text{диф}} - I_{\text{дрейф}} = I_0 \exp\left(-\frac{q(U_k - U)}{kT}\right) - I_0 \exp\left(-\frac{qU_k}{kT}\right) = \\ &= I_0 \exp\left(-\frac{qU_k}{kT}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1\right] = I_{\text{дрейф}} \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1\right]. \end{aligned} \quad (6.2)$$

Результирующее электрическое поле при $U > U_k$ «поджимает» основные носители к границе, уменьшается ширина перехода, обедненными носителями, уменьшается сопротивление перехода.

Если к переходу приложено обратное напряжение, то внешнее поле совпадает с контактным (рис. 6.3). Возрастает потенциальный барьер, уменьшается ток диффузии. Сила тока дрейфа (неосновных носителей) не изменяется, оставаясь малой по величине. Она не зависит от высоты потенциального барьера, с которого неосновные носители «скатываются». Результирующий ток по-прежнему

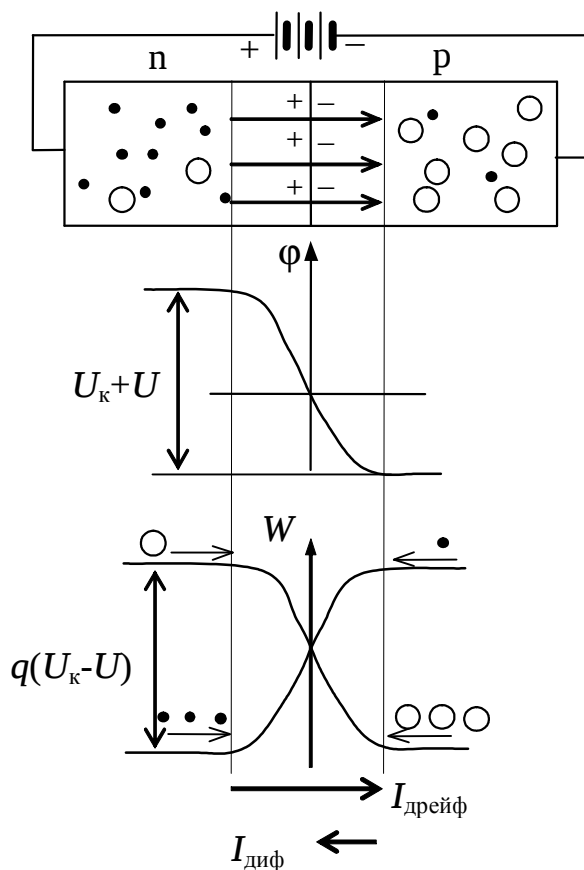


Рис. 6.3

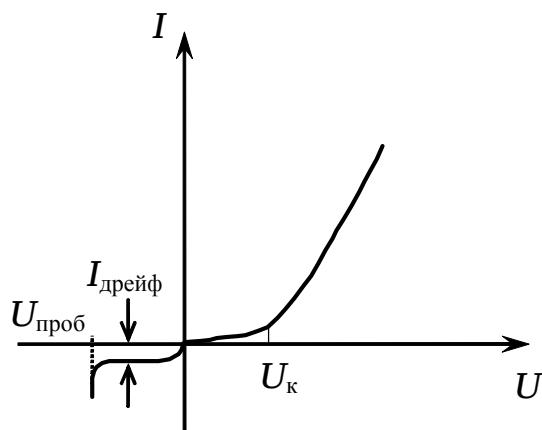


Рис. 6.4.

определяется формулой (6.2), в которой внешнюю разность потенциалов U следует считать отрицательной.

Зависимость силы тока через электронно-дырочный переход от приложенного напряжения (6.2) есть вольт-амперная характеристика (ВАХ) р-п-перехода (рис. 6.4). При $U=0$ сила тока равна нулю. Ток диффузии основных носителей и ток дрейфа неосновных носителей скомпенсированы. С ростом положительного прямого напряжения U сила тока сначала возрастает медленно. Когда внешнее напряжение превысит контактное ($U > U_k$), сила тока возрастает очень быстро, по экспоненциальному закону:

$$I \approx I_{\text{дрейф}} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right), \quad (6.3)$$

так как током дрейфа, то есть единицей в скобках уравнения (6.2), можно пренебречь.

При увеличении обратного напряжения сила тока диффузии быстро падает до нуля. Например, при комнатной температуре $kT \approx 0,025$ эВ и уже при $U = -0,1$ В ток диффузии составляет $e^{-4} = 0,013$ от тока дрейфа. Результирующая сила тока становится постоянной и равной силе тока дрейфа неосновных носителей, которая мала. При некотором обратном напряжении $U_{\text{проб}}$ возможен электрический пробой электронно-дырочного перехода, и ток лавинно нарастает.

Таким образом, электронно-дырочный переход обладает нелинейной ВАХ. При прямом напряжении он, обладая малым сопротивлением, может пропускать большие токи, при обратном – очень малые. Поэтому р-п-переход является выпрямляющим контактом и используется для выпрямления переменного тока в полупроводниковых диодах.

Описание установки

Оборудование: Миниблоки «Выпрямительный диод», «Сопротивление» 10 Ом, мультиметры.

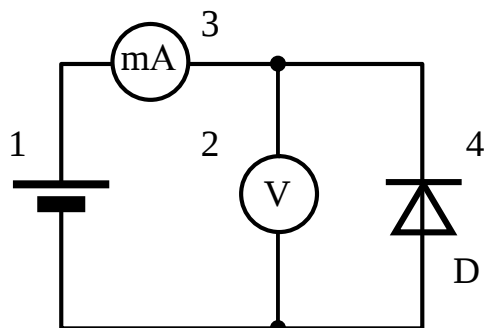


Рис. 6.5

Рис. 6.5. Электрическая схема:

1 – регулируемый источник постоянного напряжения (0...+15 В); 2 – мультиметр (**режим V= 2 В, входы COM, VW**); 3 – мультиметр (**режим A= 200 mA** при измерении прямого тока и **режим A= 2 mA** при измерении обратного тока, входы COM, mA); 4 – выпрямительный диод D

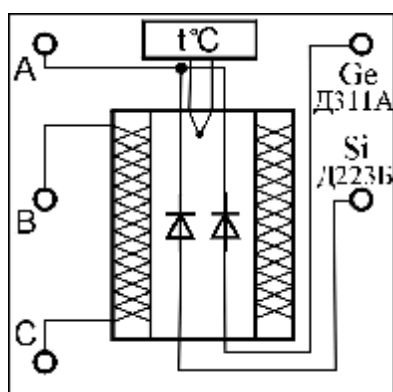


Рис. 6.6

Рис. 6.6. Миниблок «Выпрямительный диод»:

A – общий вход двух диодов; Ge – выход германиевого диода; Si – выход кремниевых диодов; B и C – питание нагревательной обмотки «0...+15 В»; t °C – клемма термопары

В работе используется диод германиевый Д-311А, в котором электронно-дырочный переход образован сплавлением кристалла германия p-типа с индием. К диоду можно приложить либо прямое, либо обратное напряжение, которое измеряется вольтметром 2 (см. рис. 6.5). Сила тока определяется по миллиамперметру 3. Диод расположен внутри электронагревателя. Измерение температуры производится с помощью термопары, которая подключается к мультиметру, используемому в режиме измерения температуры.

Выполнение работы

Задание 1. Изучение ВАХ диода

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 6.7.
2. Включить в сеть блоки питания генераторов напряжений и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка».

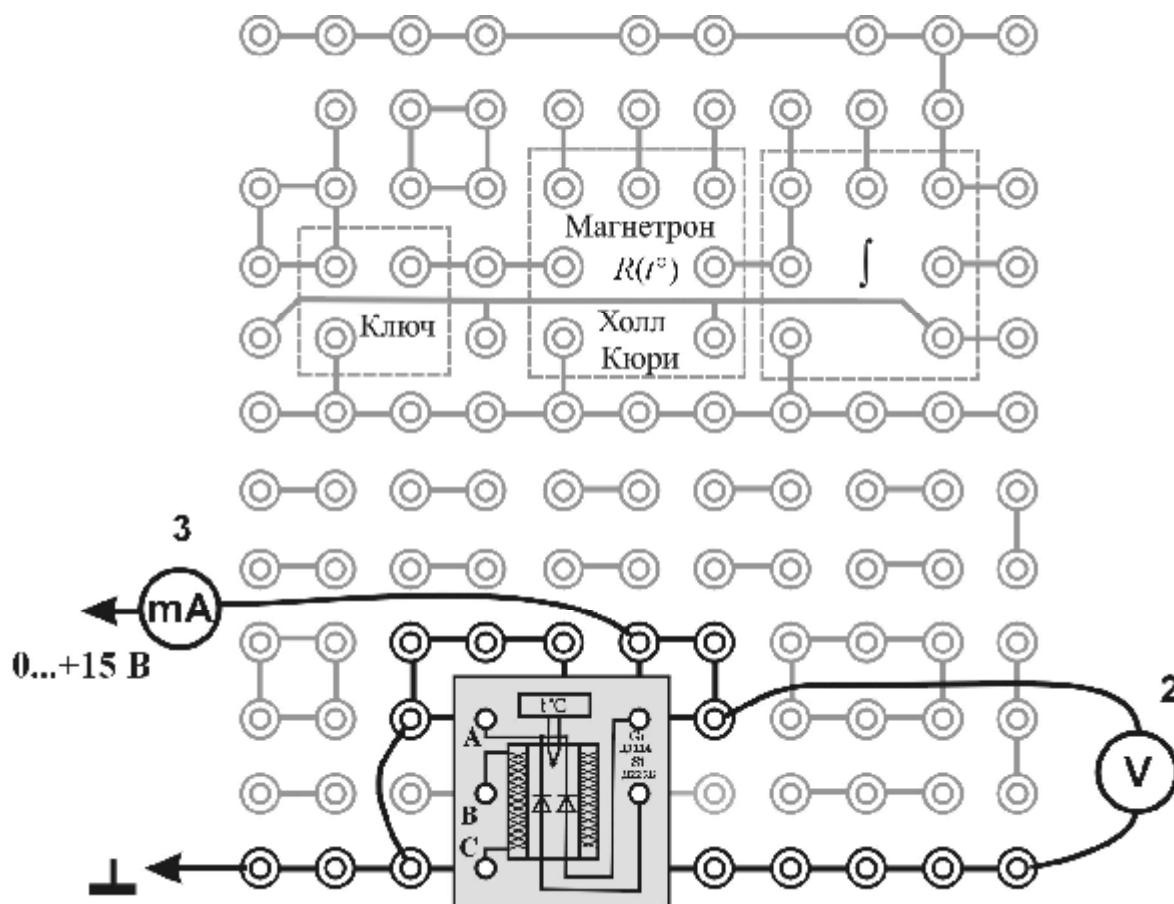


Рис. 6.7. Монтажная схема для исследования прямой ветви ВАХ диода:
обозначения 2, 3 – см. на рис. 6.5

3. Кнопками «Установка напряжения 0 ... +15 В» на регулируемом источнике питания увеличивать напряжение на диоде. Провести измерения для значений тока в диапазоне до 30 мА. Особое внимание надо обратить на область $U < 0,5$ В. Результаты записать в таблицу 6.2. Шаг до 0,5 В стоит выбирать как можно меньшим, буквально одно нажатие кнопки.

4. Выключить блок питания генераторов напряжений.

5. Не изменяя монтажную схему 6.7, изменить полярность подключения (рис. 6.8). Поскольку обратный ток составляет несколько мкА, диапазон миллиамперметра установить на 2 мА.

6. Кнопками «Установка напряжения 0 ... +15 В» на регулируемом источнике питания увеличивать напряжение на диоде. Провести измерения для значений напряжения от 0 до –15 В с шагом около 0,3 В. Результаты записать в таблицу 6.2.

7. Выключить блок питания генераторов напряжений.

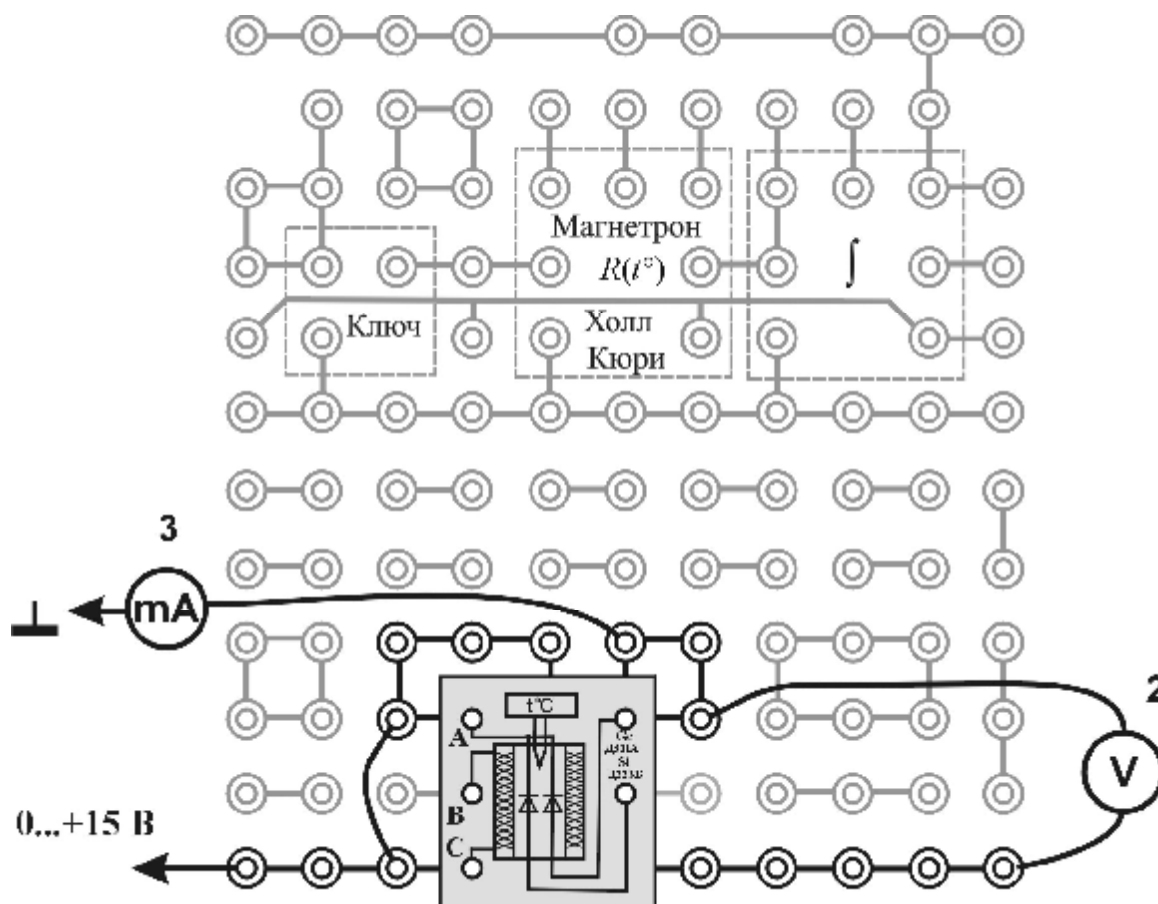


Рис. 6.8. Монтажная схема для исследования обратной ветви ВАХ диода

Задание 2. Изучение температурной зависимости тока дрейфа диода

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 6.9.
2. В табл. 6.3 записать значение обратного тока при комнатной температуре.
3. Кнопками «Установка напряжения 0 ... +15 В» на регулируемом источнике питания увеличивать напряжение на обмотке нагревателя до нескольких вольт.
4. По мере роста температуры диода обратный ток через диод будет расти. Температуру и значение обратного тока необходимо записывать в табл. 6.3. с шагом 2 ... 5°. Нагрев должен быть не слишком быстрым (~ на 1–2° за 1 мин.). Если нагрев слишком быстрый, необходимо уменьшить напряжение на обмотке. Нагревать диод до температуры 70 °С.
5. Выключить блоки питания генераторов напряжений и мультиметров.

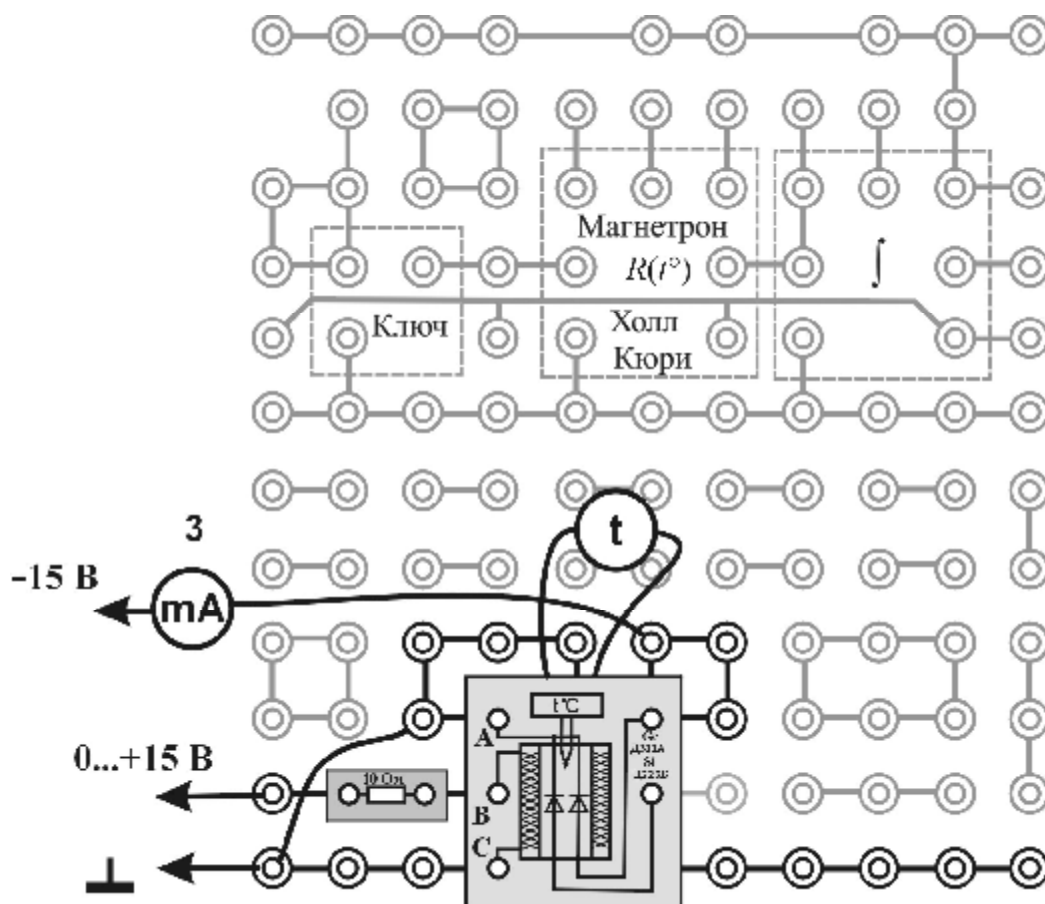


Рис. 6.9. Монтажная схема для исследования зависимости тока дрейфа от температуры

Обработка результатов измерений

1. По экспериментальным данным (табл. 6.2) построить ВАХ диода. Так как обратный ток составляет несколько микроампер, а прямой – несколько миллиампер, то масштаб для обратного тока желательно увеличить.

2. Оценить U_K . На прямой ветви ВАХ отметить точку, где начинается быстрый рост тока (см. рис. 6.4). Это напряжение соответствует контактной разности потенциалов U_K . Оценить её погрешность.

3. Оценить U_K другим способом. Логарифмируя (6.3), и получаем выражение

$$\ln I = \ln I_{\text{дрейф}} + \frac{q}{kT} \cdot U, \quad (6.4)$$

т.е. $\ln I$ пропорционален прямому напряжению U , если $U > U_K$. Определить $\ln I$ и построить график зависимости логарифма силы тока $\ln I$ от прямого напряжения U (см. рис. 6.10). Убедиться, что в области напряжений $U > U_K$ между точками 1 и 2 зависимость линейная. Оценить нижнюю границу напряжения, при котором наблюдается отклонение от линейного закона. Эта граница соответствует контактной разности потенциалов р-п-перехода U_K .

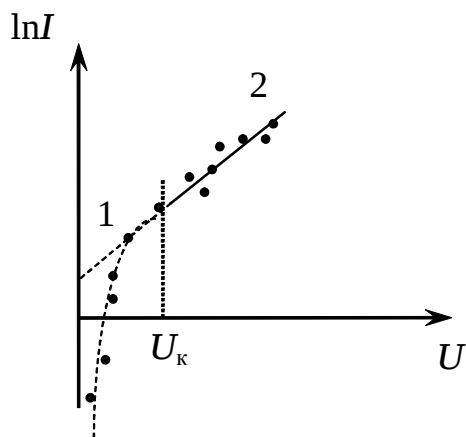


Рис. 6.10

4. Оценить контактную разность потенциалов третьим способом. Логарифмируя выражение (6.1), получаем линейную зависимость $\ln I_{\text{дрейф}}$ от $1/T$:

$$\ln I_{\text{дрейф}} = \ln I_0 - \left(\frac{qU_{\text{к}}}{k} \right) \cdot \frac{1}{T}. \quad (6.5)$$

Построить график зависимости натурального логарифма $\ln I_{\text{дрейф}}$ от $1/T$ (табл. 6.3). Построить на нём прямую наилучшего соответствия. Определить её угловой коэффициент b , который должен быть равен из (6.5)

$$b = \frac{qU_{\text{к}}}{k}. \quad (6.6)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Определить контактную разность потенциалов $U_{\text{к}}$ из (6.6). Оценить её погрешность.

5. Сравнить $U_{\text{к}}$, полученную тремя разными способами со справочным значением $U_{\text{к}} = 0,35 \pm 0,05$ В и сделать выводы.

Отчёт по лабораторной работе **«Изучение электронно-дырочного перехода в полупроводниках»**

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в СИ)

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 6.1

Наименование прибора	Предел допускаемой основной относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Вольтметр	0,5 %
Миллиамперметр	1,5 %
Электронный термометр	0,8 %

Результаты измерений

Таблица 6.2

Прямая ветвь ВАХ			Обратная ветвь ВАХ	
$U, В$	$I, мА$	$\ln I$	$U, В$	$I, мА$
0				
...	...	...		

Таблица 6.3

Температурная зависимость тока дрейфа			
$t, ^\circ C$	$I, мА$	$1/T, K^{-1}$	$\ln I$
...	...	...	...

Расчеты

1. $U_k = \dots В$ (Оценка по графику ВАХ) ;
2. $U_k = \dots В$ (Оценка по графику зависимости $\ln I$ от U) ;
3. $b = \dots = \dots = \dots$ (Оценка по графику $\ln I_{\text{дрейф}}$ от $1/T$);
4. $U_k = \dots = \dots = \dots В$ (Оценка по угловому коэффициенту b);
5. $U_k = \dots В$ (Табличное значение);
6. Оценку погрешностей провести самостоятельно.
7. Сделать вывод.

Лабораторная работа № 7

ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ В ВЫРОЖДЕННОМ p-n-ПЕРЕХОДЕ

Цель работы: Изучение теории туннельного эффекта, исследование туннельного эффекта в твёрдом теле. Теоретическое и экспериментальное исследование вольтамперной характеристики (ВАХ) туннельного диода.

Туннельный эффект в твёрдом теле

Допустим, микрочастица массой m и энергией E движется вдоль оси Ox . На её пути находится потенциальный барьер, то есть область пространства, где потенциальная энергия микрочастицы больше чем кинетическая.

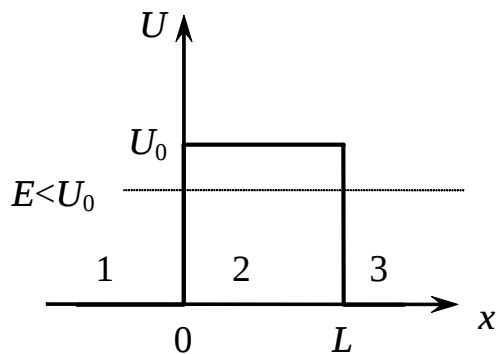


Рис. 7.1

Простейшим является потенциальный барьер прямоугольной формы, высотой U_0 и шириной L (рис. 7.1). В областях 1 и 3 потенциальная энергия частицы равна нулю. Область 2, где потенциальная энергия частицы равна U_0 , является потенциальным барьером. По классическим представлениям, если полная энергия частицы E больше высоты потенциального барьера U_0 , то частица всегда преодолевает этот барьер, а частица с энергией, меньшей U_0 , не сможет его преодолеть. Согласно квантовой механике, существуют отличные от нуля вероятности отражения частицы с энергией $E > U_0$

и прохождения через потенциальный барьер частиц с энергией $E < U_0$. Это подтверждено опытом. Явление прохождения частицы сквозь потенциальный барьер, отделяющий исходное состояние от конечного, в случае, когда полная энергия частицы меньше высоты барьера, называется *туннельным эффектом*.

Туннельный эффект может быть количественно исследован путем решения основного уравнения квантовой механики – уравнения Шредингера, дополненного условиями, накладываемыми на волновую функцию частицы (Ψ -функция): 1) Ψ -функция должна быть непрерывной; 2) её первые производные должны быть непрерывны; 3) Ψ -функция должна быть ограниченной; 4) функция $|\Psi|^2$ должна быть интегрируема. Применительно к частице, движущейся к прямоугольному потенциальному барьеру высотой U_0 и шириной L (см. рис. 7.1), уравнение Шредингера имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U(x)) \Psi = 0, \quad (7.1)$$

где m – масса микрочастицы, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, E – полная энергия частицы, $U(x)$ – потенциальная энергия частицы. В зависимо-

сти от области нахождения микрочастицы (рис. 7.1) её потенциальная энергия принимает значения:

$$U(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 & \text{область 1,} \\ U_0, & 0 \leq x \leq L & \text{область 2,} \\ 0, & x > L & \text{область 3.} \end{cases} \quad (7.2)$$

Волновая функция Ψ в областях 1, 2, 3 (см. рис. 7.2) обозначена Ψ_1 , Ψ_2 и Ψ_3 . Уравнение Шредингера для каждой области будет иметь соответственно вид:

$$1) \quad x < 0, \quad U = 0$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_1}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \Psi_1 = 0; \quad (7.3)$$

$$2) \quad 0 \leq x \leq L, \quad U_0 > E$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U_0) \Psi_2 = 0; \quad (7.4)$$

$$3) \quad x > L, \quad U = 0$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_3}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \Psi_3 = 0. \quad (7.5)$$

Получили три однородных дифференциальных уравнения второй степени. Введём обозначения:

$$\frac{2m}{\hbar^2} E = k^2 \quad \text{и} \quad \frac{2m}{\hbar^2} (E - U_0) = q^2 \quad (7.6)$$

и получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \Psi_1'' + k^2 \Psi_1 = 0, \\ \Psi_2'' + q^2 \Psi_2 = 0, \\ \Psi_3'' + k^2 \Psi_3 = 0. \end{cases} \quad (7.7)$$

Общее решение этих дифференциальных уравнений можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \psi_1(x) &= A_1 e^{ikx} + B_1 e^{-ikx}, \\ \psi_2(x) &= A_2 e^{iqx} + B_2 e^{-iqx}, \\ \psi_3(x) &= A_3 e^{ikx} + B_3 e^{-ikx}, \end{aligned} \quad (7.8)$$

где i – мнимая единица. В 1 и 3 уравнениях первое слагаемое описывает плоскую волну, распространяющуюся в положительном направлении оси Ox , а второе – волну, распространяющуюся в обратном направлении (отражённую волну). В

третьей области отражённой волны быть не может, поэтому коэффициент $B_3 = 0$. Коэффициент A_1 связан с интенсивностью пучка частиц, движущихся к барьеру, поэтому задаётся произвольно и может быть приравнен к 1. Для второй области, когда $E < U_0$, получим $q = i\beta$ – мнимое число. Учитывая (7.6), можно записать:

$$\beta = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(U_0 - E)}. \quad (7.9)$$

Тогда решение (17.8) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Psi_1(x) &= e^{ikx} + B_1 e^{-ikx}, \\ \Psi_2(x) &= A_2 e^{-\beta x} + B_2 e^{\beta x}, \\ \Psi_3(x) &= A_3 e^{ikx}. \end{aligned} \quad (7.10)$$

Функция $\Psi_2(x)$ не описывает плоские волны, распространяющиеся в обоих направлениях оси Ox , поскольку показатели степени экспонент не мнимые, а действительные. Исходя из непрерывности волновых функций и их первых производных по x , определим граничные условия:

$$\begin{aligned} \Psi_1(0) &= \Psi_2(0), & \Psi_1'(0) &= \Psi_2'(0), \\ \Psi_2(L) &= \Psi_3(L), & \Psi_2'(L) &= \Psi_3'(L). \end{aligned} \quad (7.11)$$

Совместное решение уравнений, полученных из граничных условий, позволяет найти коэффициенты B_1, B_2, A_2, A_3 и функции $\Psi_1(x), \Psi_2(x), \Psi_3(x)$.

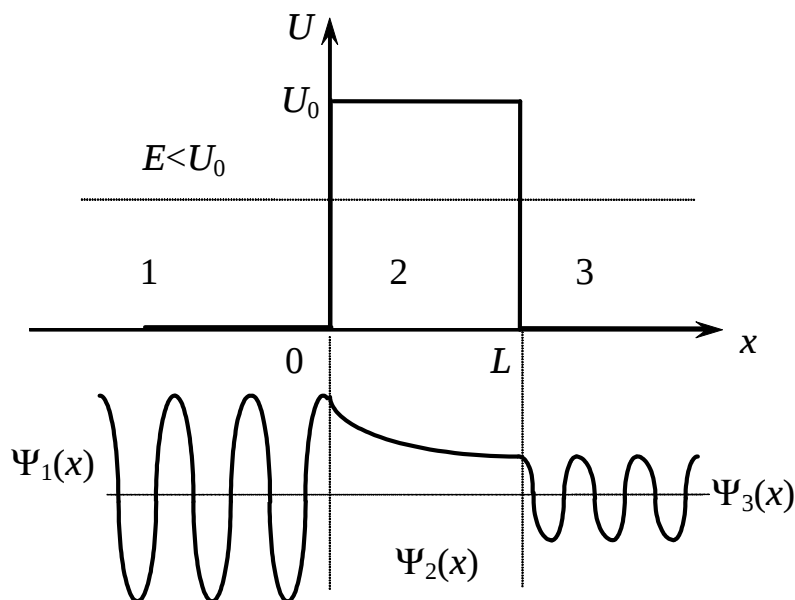


Рис. 7.2

Качественный вид функций $\Psi_1(x), \Psi_2(x)$ и $\Psi_3(x)$ представлен на рис. 17.2. Из рисунка следует, что волновая функция не равна нулю и внутри барьера. В области 3, если барьер не очень широк, она будет опять иметь вид плоской волны де Бройля с той же частотой, но с меньшей амплитудой. Следовательно, частица имеет отличную от нуля вероятность прохождения сквозь потенциальный барьер конечной ширины.

Вероятность туннелирования частиц принято характеризовать коэффициентом прозрачности потенциального барьера – D , который определяется отношением квадратов модулей вол-

новой функции Ψ_3 и первого слагаемого из Ψ_1 , описывающего падающую на барьер волну. Коэффициент прозрачности барьера описывается выражением:

$$D = 16 \frac{E(U_0 - E)}{U_0^2} \exp\left(-\frac{2}{\hbar} L \sqrt{2m(U_0 - E)}\right). \quad (7.12)$$

Из выражения (7.12) следует, что чем уже потенциальный барьер, тем выше вероятность туннелирования частицы.

Туннельный диод

Туннельный эффект проникновения электронов через потенциальный барьер в области электронно-дырочного р-п-перехода составляет физическую основу действия обширного класса полупроводниковых приборов – туннельных диодов.

Р-п-переходом называется область контакта двух полупроводников с различными типами проводимости (р-дырочная, п-электронная). В случае контакта электронного и дырочного полупроводников между ними начинается интенсивный обмен носителями зарядов (электронами и дырками), в результате чего образуется двойной электрический слой (рис. 7.3). В области ab п-полупроводника и

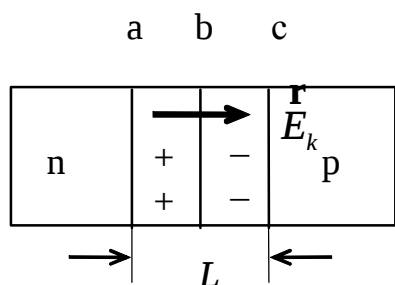


Рис. 7.3

области bc р-полупроводника образуются избыточные заряды противоположных знаков. Двойной слой объемных зарядов толщиной L создает контактное электрическое поле, вектор напряженности $\vec{E}_k$ которого направлен от полупроводника п-типа к полупроводнику р-типа. Контактная разность потенциалов U_k и напряженность $\vec{E}_k$ связаны соотношением $U_k = LE_k$. Под действием этого электрического поля все энергетические уровни зарядившегося положительно

полупроводника п-типа снижаются, а энергетические уровни полупроводника р-типа повышаются. В области р-п-перехода энергетические зоны искривляются и образуют *потенциальный барьер*. Высота этого потенциального барьера определяется разностью положений уровня Ферми в обоих полупроводниках до контакта и равна eU_k (рис. 7.4). При определенной толщине ($L \sim 10^{-6} - 10^{-7}$ м) р-п-перехода наступает состояние равновесия. Оно соответствует выравниванию уровней Ферми в обоих полупроводниках. При этом образуется равновесный контактный слой, обладающий повышенным сопротивлением, по сравнению с сопротивлением остальных объемов полупроводников. Всё это относится к полупроводникам с небольшим количеством примесей. Такие полупроводники называются невырожденными, а р-п-переход между ними также называется невырожденным.

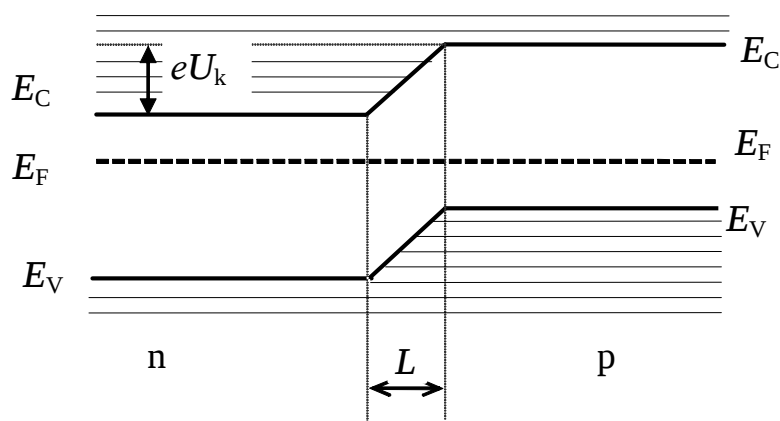


Рис. 7.4.

Свойства р-п-перехода существенно зависят от степени легирования полупроводников. При высоких концентрациях примеси ($10^{24} - 10^{26} \text{ м}^{-3}$) примесные уровни атомов расположены настолько близко друг от друга, что волновые функции их электронов перекрываются и примесные уровни размываются в зоны. Эти зоны, в свою очередь, перекрываются с зоной проводимости в п-области и валентной зоной в р-области, так что ширина за-

прещённой зоны уменьшается. Уровень Ферми располагается не в запрещённой зоне, а внутри зоны проводимости полупроводника п-типа и валентной зоны полупроводника р-типа (рис. 7.5). Такие полупроводники называются вырожденными. Энергетические зоны в области перехода очень сильно искривляются, а толщина переходной области L уменьшается до $10^{-8} - 10^{-9} \text{ м}$, и появляется вероятность прямого туннельного перехода электрона сквозь потенциальный барьер, образованный двойным электрическим слоем. Однако для того, чтобы электроны могли пройти через потенциальный барьер, необходимо, чтобы против занятого электроном энергетического уровня по одну сторону р-п-перехода был свободный энергетический уровень по другую его сторону.

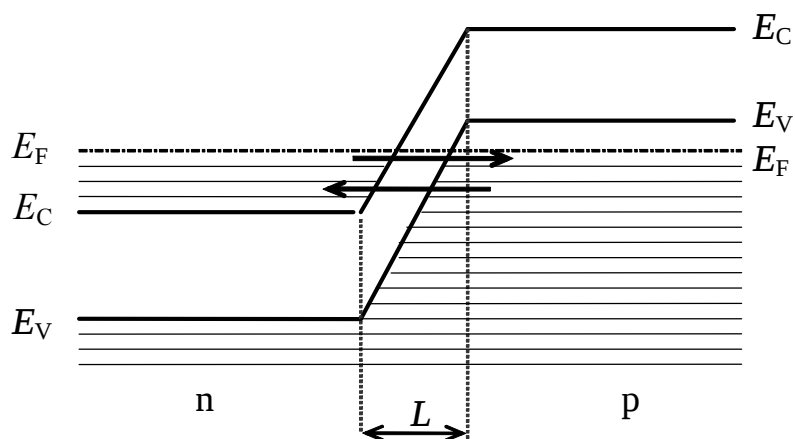


Рис. 7.5.

Вольтамперная характеристика туннельного диода

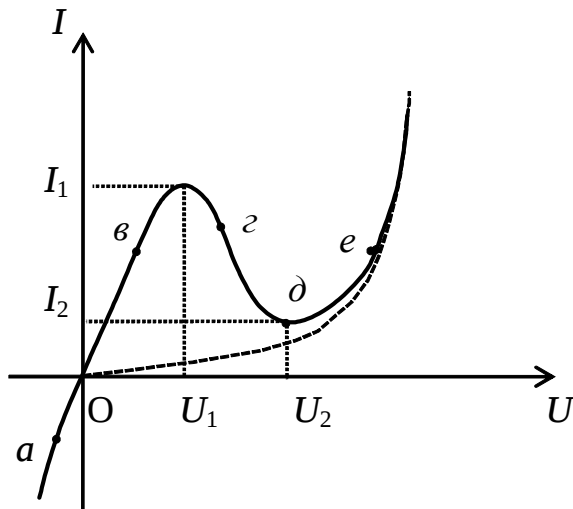


Рис. 7.6

Принцип действия туннельного диода можно понять из рассмотрения энергетических диаграмм р-п-перехода, соответствующих различным точкам его ВАХ, приведённой на рис. 7.6. Область ВАХ между напряжением U_1 и U_2 называется областью отрицательного сопротивления.

При отсутствии внешнего напряжения ($U = 0$) уровни Ферми в электронном и дырочном полупроводниках совпадают (рис. 7.5). В этих условиях вероятность перехода

да электронов из электронного полупроводника на свободные уровни дырочного полупроводника равна вероятности такого же перехода электронов из дырочного полупроводника в электронный. Против уровней, на которых концентрация электронов по одну сторону р-п-перехода велика, мало свободных уровней по другую сторону перехода. И наоборот, против уровней, на которых концентрация электронов невелика, находится много свободных уровней. Поэтому движение электронов из полупроводника n-типа уравнивается встречным потоком электронов и их суммарный поток равен нулю (точка О на рис. 7.6).

Внешнее напряжение, приложенное к р-п-переходу, нарушает равновесие, а следовательно, результирующий ток через р-п-переход не будет равен нулю ($I \neq 0$). Если внешнее напряжение отрицательное (рис. 7.7), то внешнее электрическое поле направлено так же, как и контактное. Это приводит к увеличению потенциального барьера на величину $|eU|$. Однако уровень Ферми в полупроводнике n-

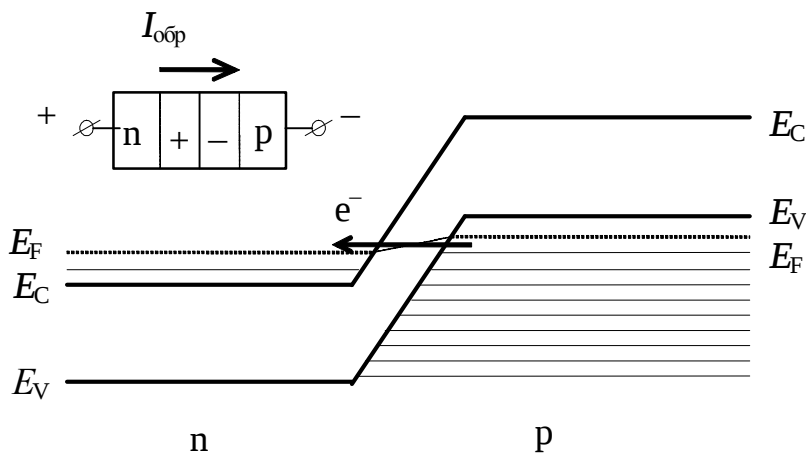


Рис. 7.7

типа смещен вниз по сравнению с таковым в полупроводнике р-типа. Вследствие этого электроны туннелируют из полупроводника р-типа на свободные уровни полупроводника n-типа, и их поток через р-п-переход значительно превышает встречный поток электронов (точка а на рис. 7.6). Это обратный туннельный ток.

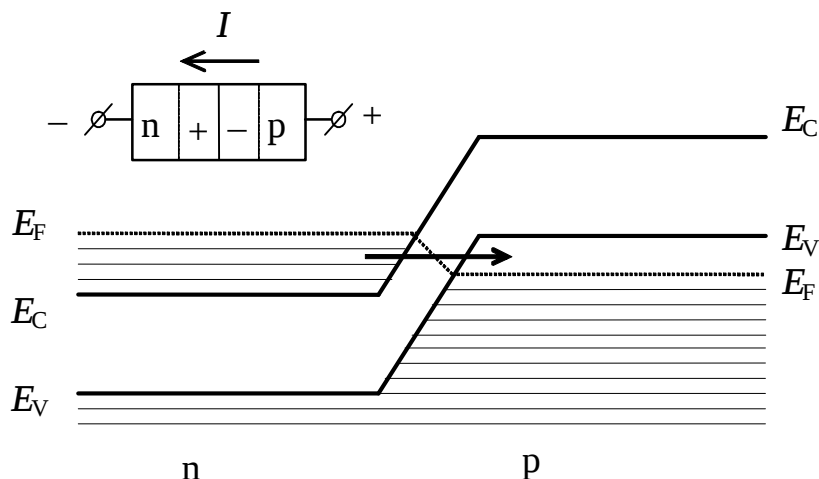


Рис. 7.8

(рис. 7.8). Туннельный ток через р-п-переход обусловлен переходом электронов с заполненных уровней полупроводника n-типа на свободные уровни полупроводника р-типа. С ростом прямого напряжения ток растёт экспоненциально (точка *в* на рис. 7.6).

Ток растёт до тех пор, пока смещение энергетических зон не достигнет такого состояния, при котором максимальной концентрации занятых уровней в электронном полупроводнике будет соответствовать максимальная концентрация

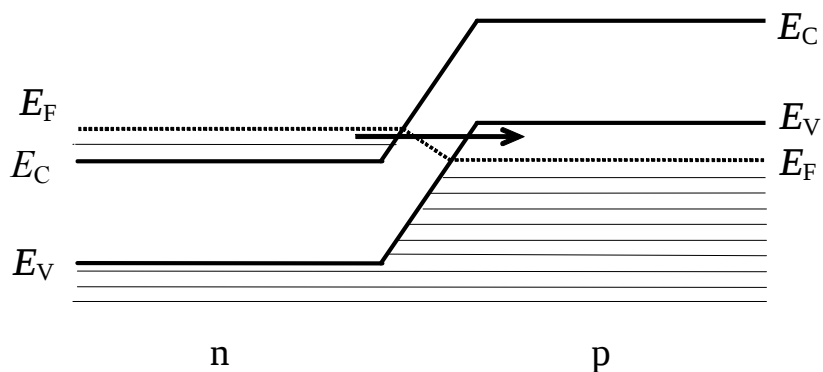


Рис. 7.9

Если к р-п-переходу приложено положительное напряжение, высота потенциального барьера уменьшается на величину $|eU|$, вследствие чего потолок валентной зоны дырочного полупроводника и дно зоны проводимости электронного полупроводника сближаются. Уровень Ферми в полупроводнике n-типа выше, чем уровень Ферми в полупроводнике р-типа

свободных уровней в дырочном полупроводнике. При $U=U_1$ дно зоны проводимости полупроводника n-типа совпадает с уровнем Ферми полупроводника р-типа (рис. 7.9). Ток при этом достигает максимального значения I_1 (рис. 7.6).

Дальнейший рост напряжения приведёт к уменьшению числа заня-

тых электронами уровней в n-области, расположенных напротив свободных уровней в р-области. Вследствие этого ток начнет резко уменьшаться (точка *г* на рис. 7.6). Ток достигнет минимального значения I_2 при совпадении верхнего уровня валентной зоны полупроводника р-типа с нижним уровнем (дном) зоны проводимости полупроводника n-типа (рис. 7.10). При этом уменьшается число электронов, способных совершить прямой туннельный переход из электронного полупроводника в дырочный, и при $U=U_2$ ни один электрон не может пройти сквозь барьер, так как не остается разрешённых уровней энергии слева и справа от р-п-перехода. Сила тока I_2 (точка *д* на рис. 7.6) обусловлена, главным образом, высо-

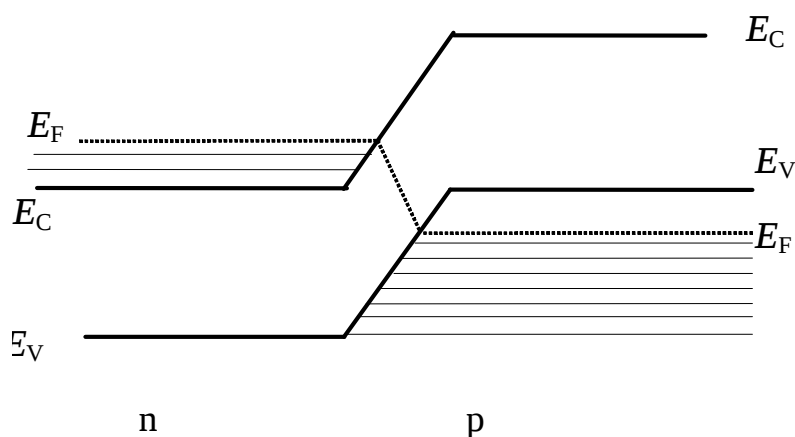


Рис. 7.10

кой концентрацией примесей, при которой примесные уровни размываются в зоны, сливающиеся с остальными зонами.

При дальнейшем повышении напряжения в прямом направлении изменяется механизм проникновения электронов через р-п-переход. Он становится таким же, как в обычном диоде.

Ток определяется движением основных носителей, преодолевающих потенциальный барьер. Ток снова возрастает (точка *e* на рис. 7.6).

Описание установки

Оборудование: Миниблок «Туннельный диод», миллиамперметр и вольтметр, источник питания.

Монтажная схема установки для снятия ВАХ туннельного диода АИ-201 представлена на рис. 7.11. Установка предназначена для исследования только прямой ветви ВАХ.

При изменении напряжения «0...+15 В» изменяется ток туннельного диода, который измеряют миллиамперметром. Напряжение на туннельном диоде измеряют вольтметром.

Справочные данные о ВАХ туннельного диода АИ201: $U_1 = 50$ мВ, $U_2 = 250$ мВ, $I_1 = 12$ мА.

Выполнение работы

1. Заполнить табл. 7.1 (см. бланк отчёта).
2. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 7.11.
3. Миллиамперметр включить в диапазоне ± 20 мА, а вольтметр – ± 2 В. Включить в сеть блоки питания генераторов напряжений и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка».
4. Плавно увеличивая напряжение регулируемого источника от 0 до +15 В, по мультиметру измерять напряжение на диоде и по миллиамперметру определять ток диода. Для диапазона от 0 до 0,2 В. шаг выбирать 10 мВ, для больших напряжений 20 – 40 мВ.
5. Повторить измерения, плавно уменьшая напряжение регулируемого источника до нуля. Результаты занести в табл. 7.2.
6. Выключить установку.

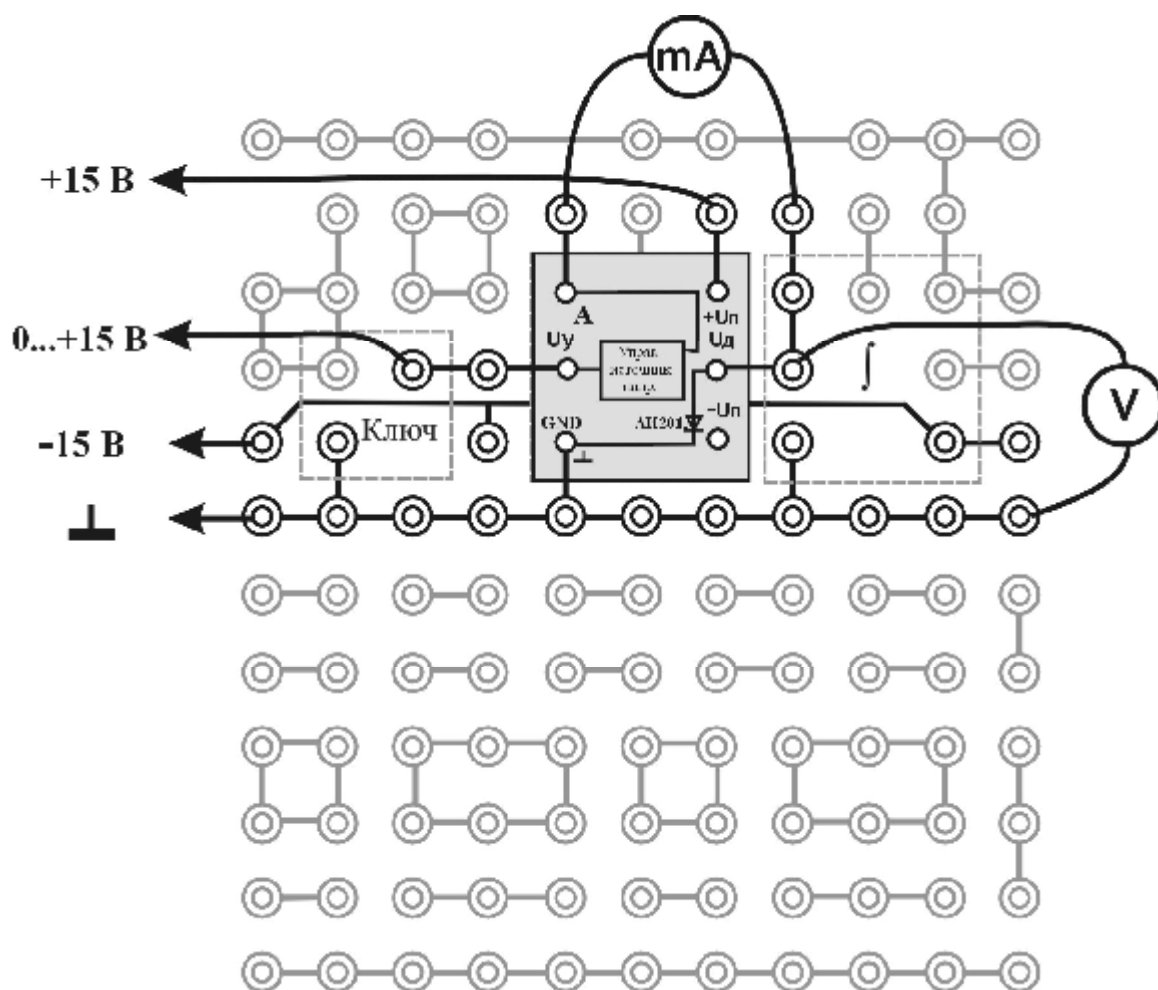


Рис. 7.11. Монтажная схема для исследования прямой ветви ВАХ туннельного диода

Обработка результатов измерений

1. По результатам измерений построить график зависимости силы тока диода I от напряжения U .
2. Из графика найти значения U_1 , U_2 и I_1 . Оценить погрешность величин. Результаты занести в табл. 7.3.
3. Экспериментальные результаты сравнить со справочными данными.
4. Сделать вывод.

Отчёт по лабораторной работе
«Туннельный эффект в вырожденном р-п-переходе»

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 7.1

Наименование прибора	Предел допускаемой основной относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Вольтметр	0,5 %
Миллиамперметр	1,5 %

Результаты измерений

Таблица 7.2

ВАХ туннельного диода			
U , В	I , мА	U , В	I , мА
0			
...		...	

Таблица 7.3

	Измеренное	Табличное
I_1 , мА		
U_1 , В		
U_2 , В		

Вывод.

Примечание. Построенная согласно табл. 7.2 ВАХ туннельного диода прилагается к отчёту. Все данные откладываются на одном графике. Экспериментальные точки не соединять.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1. Изучение зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряжённости магнитного поля.....	9
Лабораторная работа № 2. Определение точки Кюри ферромагнетика	15
Лабораторная работа № 3. Изучение свойств сегнетоэлектриков.....	23
Лабораторная работа № 4. Изучение температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводни- ка.....	33
Лабораторная работа № 5. Изучение эффекта Холла в полупроводнике...	41
Лабораторная работа № 6. Изучение электронно-дырочного перехода в полупроводниках	50
Лабораторная работа № 7. Туннельный эффект в вырожденном p-n- переходе	59