

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Государственный университет «Дубна»

Филиал «Протвино»
Кафедра общеобразовательных дисциплин

Общий физический практикум: электричество и магнетизм

ПРАКТИКУМ

Рекомендовано учебно-методическим советом
университета «Дубна» в качестве практикума для студентов,
обучающихся по направлениям подготовки «автоматизация
технологических процессов и производств»,
«информатика и вычислительная техника», «физика»
(бакалавриат)



Дубна
2024

УДК 537
ББК 22.3 я73
О 288

Рецензент:

д. ф.-м. н., главный советник директора по электронике ИФВЭ им.
А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курча-
товский институт» *В. А. Сенько*

Авторы:

В. А. Коковин, А. В. Куликов, А. А. Масликов, А. Н. Сытин

О 288 **Общий физический практикум: электричество и магнетизм :
практикум / В. А. Коковин, А. В. Куликов, А. А. Масликов,
А. Н. Сытин. – Дубна : Гос. ун-т «Дубна», 2024. – 80 с.**

ISBN 978-5-89847-717-2

В практикум включены описания и руководства по выполнению лабораторных работ по общей физике (раздел «Электричество и магнетизм»). Представленные лабораторные работы охватывают основные разделы электричества и магнетизма. Каждая работа содержит краткое теоретическое введение, описание экспериментальной установки, порядка проведения измерений и обработки их результатов. Посobie снабжено серией вопросов по теоретическому минимуму, что позволяет студентам более осмысленно готовиться к выполнению лабораторной работы и понимать сущность явлений непосредственно при работе с лабораторной установкой.

Практикум предназначен для студентов, обучающихся по программам бакалавриата «автоматизация технологических процессов и производств», «информатика и вычислительная техника», «физика» в филиале «Протвино» государственного университета «Дубна».

УДК 537
ББК 22.3 я73

Учебное издание

Редактор Ю. С. Цепилова
Технический редактор Ю. С. Цепилова
Компьютерная верстка Ю. С. Цепилова
Корректор Ю. С. Цепилова

Подписано в печать. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 4,65.

Тираж 25 экз. Заказ № .

ФГБОУ ВО «Университет «Дубна»
141980, г. Дубна Московской обл., ул. Университетская, 19

ISBN 978-5-89847-717-2

© Государственный университет «Дубна»,
2024

© Коковин В. А., Куликов А. В., Масликов А. А.,
Сытин А. Н., 2024

Введение

Практикум рассчитан на студентов, изучающих общую физику в рамках комплекса общеобразовательных дисциплин. Он составлен авторами на основе опыта преподавания дисциплины «Электричество и магнетизм» (лекции, семинары и лабораторные работы) для студентов специальностей «автоматизация технологических процессов и производств», «программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» и «физика» в государственном университете «Дубна», филиал «Протвино».

В течение семестра студенты выполняют комплекс лабораторных работ по электричеству и магнетизму, и практикум позволит студентам самостоятельно проникнуть в сущность и цели проводимых лабораторных экспериментальных исследований.

В работах широко применяется компьютерная обработка результатов измерений и их графическое отображение на мониторе или экране цифрового осциллографа. Поскольку современный технологический прогресс в очень значительной степени связан с изучаемыми в данных лабораторных работах областями общей физики, то лабораторные работы рассматриваются как первая ступень знакомства студентов с современной электроникой и электромагнитной техникой.

Большое внимание уделяется формату представления результатов лабораторных исследований и корректному оцениванию погрешностей. Студентам прививаются навыки представления результатов экспериментальных исследований в законченной и удобной для дальнейшего анализа форме.

Пособие снабжено серией вопросов по теоретическому минимуму, что позволяет студентам более осмысленно готовиться к выполнению лабораторной работы и понимать сущность явлений непосредственно при работе с лабораторной установкой.

Представленные лабораторные работы охватывают основные разделы электричества и магнетизма. Близкое знакомство с экспериментальными методами, лежащими в основе наших физических знаний о природе, несомненно, совершенно необходимо любому современному специалисту в области технических наук.

Оформление отчета

Каждая работа выполняется бригадами, состоящими, как правило, из 2–3 студентов. Допуск к выполнению лабораторной

работы проводится преподавателем по бригадам, с персональным опросом каждого студента.

Полностью оформленная и подготовленная к зачету работа должна соответствовать следующим требованиям.

На титульном листе нужно указать название работы, ФИО студентов и название группы, дату выполнения.

В отчете должны быть представлены формулы, использованные при расчетах.

В отчете должны быть представлены все экспериментальные данные, полученные в ходе работы. Экспериментальные данные представляются в виде таблиц.

В отчете должны быть представлены все расчеты требуемых величин и погрешностей к ним, заполнены все таблицы, построены все графики.

Для всех величин в таблицах должна быть записана соответствующая *единица измерения*.

Графики должны быть представлены на миллиметровой бумаге или с помощью компьютерной графики. Оси декартовой системы должны быть подписаны и иметь риски равномерного масштаба, должны быть ярко отмечены экспериментальные и теоретические точки. Форма графика – гладкая линия (не ломаная).

Записаны *выводы* по каждому графику.

Выписан *ответ* по установленной форме (осмысленное количество значащих цифр с указанием погрешности).

Записаны *выводы* по ответу.

В случае, если измерялась известная физическая величина, должно быть сделано сравнение с табличным значением.

Лабораторная работа № 1.

Осциллограф

Цель: получение навыков работы с осциллографом, измерение характеристик электрических сигналов.

Оборудование: осциллограф, генератор низкочастотных сигналов.

1. Основные сведения

Осциллограф – прибор, предназначенный для исследования электрических сигналов посредством визуального наблюдения графика сигнала на экране, а также для измерения амплитудных и временных параметров сигнала по форме графика.

Осциллографы бывают двух основных типов – электронно-лучевые и цифровые. Отличие между двумя типами состоит в способе формирования изображения сигнала. В электронно-лучевом осциллографе основным элементом является электронно-лучевая трубка с экраном, на котором отображаются графики входных сигналов. Лучевая трубка формирует пучок электронов, который, попадая на экран, заставляет светиться люминофор, – на люминесцентном экране мы можем видеть пятно большего или меньшего диаметра и четкости. Отклоняющая система, которая может быть магнитной или электростатической, позволяет перемещать пучок по поверхности экрана в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Чем сильнее напряжение, приложенное к управляющим электродам, тем больше отклоняется пучок. Таким образом, достигается перемещение светящегося пятна по экрану.

Развертка. При подаче на управляющие электроды по координате X пилообразного напряжения светящаяся точка будет перемещаться по горизонтали до края экрана. При спаде пилообразного напряжения до нуля луч возвращается в исходную точку слева. В результате на экране появляется светящаяся линия, и эта линия прочерчивается с каждым периодом «пилы». Длительность периода развертки определяется переключателем генератора развертки (от 1 с до 0.05 мкс).

Синхронизация. На управляющие электроды по координате Y подается изучаемое напряжение. В результате луч отклоняется от горизонтали пропорционально поданному напряжению. Таким образом, если подобрать частоту развертки, равной частоте исследуемого сигнала, на экране будет наблюдаться устойчивый сигнал.

дуемого сигнала («синхронизировать»), то за каждый цикл электронный луч прочертит на экране линию, формой подобную исходному сигналу.

Если запуск развертки никак не связан с наблюдаемым сигналом, то изображение на экране будет выглядеть «бегущим» или даже совершенно размазанным. Это происходит потому, что в этом случае осциллограф отображает *различные* участки наблюдаемого сигнала на одном и том же месте. Для получения стабильного изображения все осциллографы содержат систему, называемую триггер.

Триггер в осциллографе – это устройство, которое задерживает запуск развертки до тех пор, пока не будут выполнены некоторые условия. Триггер имеет как минимум две настройки:

- уровень сигнала: задает входное напряжение (в вольтах); при достижении которого запускается развертка;
- тип запуска: по *фронту* или по *спаду*.

Таким образом, триггер запускает развертку всегда с одного и того же места сигнала, поэтому изображение сигнала на осциллограмме выглядит стабильным и неподвижным (конечно, только при правильных настройках триггера).

У цифровых осциллографов (рис. 1.1) изображение выводится на дисплей (монохромный или цветной) в виде готовой картинки.

В обоих типах осциллографов на экран нанесена разметка в виде сетки, позволяющая измерить длительность (координата X) и величину (координата Y) сигнала.

Осциллографы разделяются на одноканальные и многоканальные. Многоканальные осциллографы позволяют одновременно сравнивать сигналы между собой (формы, амплитуды, частоты и пр.). В некоторых осциллографах предусмотрена возможность подачи двух сигналов непосредственно на управляющие элементы по координатам X и Y . В этом случае осциллограф дает возможность изучать сложение взаимно перпендикулярных колебаний – «фигур Лиссажу».

Яркость, фокус и освещение шкалы не требуют пояснений. Это настройки интерфейса.

Усилитель Y и стрелочки «вверх-вниз». Эта ручка позволяет перемещать изображение сигнала вверх или вниз, добавляя ему дополнительное смещение. Иногда не хватает размера экрана,

чтобы вместить весь сигнал. Приходится его загонять вниз, принимая за ноль не середину, а нижнюю границу.

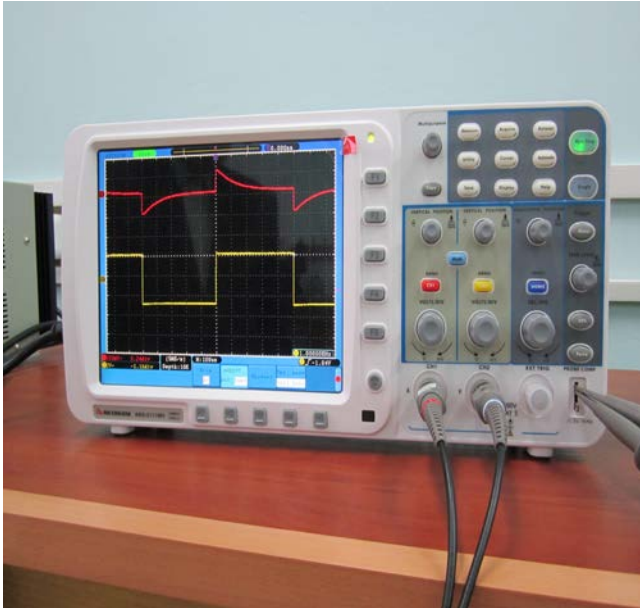


Рис. 1.1. Изображение передней панели цифрового осциллографа

2. Настройки панели управления

Тумблер, переключающий ввод с прямого на емкостный.

Этот тумблер в том или ином виде есть на всех без исключения осциллографах. Он позволяет подключать сигнал к усилителю либо напрямую, либо через конденсатор. Если подключить напрямую, то пройдет **и постоянная составляющая, и переменная**. А через емкость проходит **только переменная**. Например, пусть надо посмотреть на уровень помех блока питания с напряжением 12 вольт, а величина помех может быть не более 0.3 вольт. На фоне 12 вольт эти 0.3 вольт будут совсем незаметны. Можно, конечно, увеличивать коэффициент усиления по Y , но тогда график вылезет за экран, а смещения по Y не хватит, чтобы увидеть вершину. Тогда нам нужно лишь подключить конденсатор и тогда те 12 вольт постоянной составляющей отфильтруются на нем, а в осциллограф пройдет только переменный сигнал – те самые 0.3 вольта помехи, который можно усилить и наблюдать на экране.

Коаксиальный разъем подключения щупа. Каждый щуп содержит в себе **сигнал** и **землю**. Землю обычно подключают на минус или на общий провод схемы, а сигнальным тестируют схему. Осциллограф показывает напряжение на щупе относительно общего провода. Чтобы понять, где сигнальный вход, а где земля, достаточно взяться за них рукой по очереди. Если возьмешься за землю, то на экране останется прямая линия. А если возьмешься за сигнальный вход, то на экране появятся случайные наводки – от твоего тела, служащего в данный момент антенной. На некоторых щупах **внутри** встроен делитель напряжения **1:10** или **1:100**, который позволяет подключать осциллограф к высокому напряжению без риска его сжечь. Включается и выключается он тумблером на щупе.

Калибровочный выход. На нем имеется **прямоугольный сигнал частотой 1 кГц и напряжением 1 вольт**. Он используется для проверки работы самого осциллографа.

Усиление служит для масштабирования сигнала по оси **Y**. Там же показано, сколько приходится вольт на деление сетки экрана. Скажем, если стоит 2 вольта на деление, а сигнал на экране достигает высоты две клеточки размерной сетки, значит, амплитуда сигнала равна 4 вольта.

Длительность определяет частоту развертки. Чем короче интервал, чем больше частота, тем более высокочастотный сигнал мы можем разглядеть. Тут клеточки проградуированы уже в милли- и микросекундах. Так что по ширине сигнала можно посчитать, сколько клеток он занимает, а умножив число клеток на масштаб по оси **X**, получим длительность сигнала в секундах. Аналогично можно посчитать длительность одного периода и, зная длительность, найти частоту сигнала $f=1/t$. Поверх грубой регулировки расположена ручка, позволяющая менять масштаб плавно.

Вход X. На него можно подать свой сигнал вместо пилы развертки. Таким образом, осциллограф может послужить телевизором или монитором, если собрать схему, которая будет формировать изображение.

Развертка и стрелочки влево и вправо позволяют перемещать график по экрану влево и вправо. Их используют, чтобы подогнать нужный участок под деления сетки.

Блок синхронизации.

Ручка уровня задает уровень, от которого будет стартовать генератор пилы.

Переключатель с внутренней на внешнюю позволяет подать на вход синхроимпульсы с внешнего источника.

Переключатель с надписью +/- переключает полярность уровня. Есть не на всех осциллографах.

Ручка стабильности позволяет вручную попытаться подогнать скорость синхронизации.

3. Выполнение измерений

Определение частоты и амплитуды исследуемого сигнала.

1. Переключатель диапазонов поставить в положение 1, 10, 10^2 или 10^3 . Выставить с помощью верньерной ручки какую-либо частоту в пределах этих четырех указанных диапазонов. Записать в табл. 1.1 исследуемую частоту. Ручкой «усиление Y» осциллографа установить величину сигнала по вертикали порядка 25–30 мм. Отрегулировать яркость и фокусировку. Меняя положение ручки «развертка», наблюдать изменение изображения сигнала с изменением частоты развертки. Установить такой диапазон развертки, чтобы на экране поместилось два, три или четыре периода синусоидального напряжения. (Если изображение перемещается, то можно добиться неподвижности изображения ручками «частота плавно» и «синхронизация».)

2. Для калибровки осциллографа используется внутренний генератор сигналов («1 v, 1 kHz»). Сигнал с выхода этого усилителя (блок калибровки) подают на вход рабочего канала. На экране появятся две горизонтальные линии. С помощью рукоятки-переключателя развертки добиться появления меандра (непрерывная последовательность прямоугольных импульсов).

3. Измерить величину поданного с генератора сигнала. Для этого определяют на экране осциллографа по масштабной сетке величину в клетках между минимумом и максимумом сигнала. Определяют цену деления прибора по положению рукоятки «V/дел». Амплитуда сигнала равна половине получившегося числа. Теперь можно измерить величину периода сигнала. Для этого устанавливают синусоиду симметрично относительно горизонтальной прямой, проходящей через центр экрана, и регистрируют величину периода по точкам пересечения исследуемой синусоидой этой прямой.

4. Меняют с помощью генератора амплитуду и длительность сигнала, а затем измеряют параметры сигнала с помощью осциллографа. Результаты заносят в табл. 1.1, повторив измерения трижды.

Таблица 1.1. Сравнение параметров сигнала на генераторе и осциллографе

Номер измерения	ν , кГц (на генераторе)	ν , кГц (на осциллографе)	A, вольт (на генераторе)	A, вольт (на осциллографе)
1				
2				
3				

Контрольные вопросы

1. Основные части осциллографа и их назначение.
2. Устройство и принцип действия электроннолучевой трубки.
3. Принцип действия генератора развертки. Синхронизация.
4. Измерение частоты синусоидального напряжения.
5. Измерение эффективного значения напряжения.

Лабораторная работа № 2. Изучение затухающих электрических колебаний

Цель: исследование затухающих электрических колебаний, измерение характеристик колебательного контура: периода колебаний T , логарифмического декремента затухания λ , критического сопротивления контура $R_{кр}$.

Оборудование: моноблок «Изучение свободных затухающих колебаний в колебательном контуре», мини-блок «Конденсатор» – 2 шт., мини-блок «Индуктивность», осциллограф.

1. Теоретические сведения

Колебательный контур – это электрическая цепь (рис. 2.1), содержащая индуктивность L и емкость C .

Если конденсатор зарядить и тем самым сообщить ему некоторую энергию, а затем ключом K замкнуть контур, то конденсатор начнет разряжаться. Как показывает опыт, в цепи появляется переменный ток. Объясняется это тем, что протекание разрядного тока сопровождается появлением э.д.с. самоиндукции, которая сначала препятствует росту тока, но по окончании разрядки конденсатора поддерживает ток в первоначальном направлении. В результате происходит перезарядка конденсатора. По достижении максимального заряда его обкладок снова начинается процесс разрядки, при этом ток в контуре меняет свое направление.

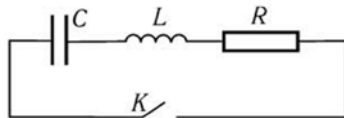


Рис. 2.1. Колебательный контур: C – конденсатор; L – катушка индуктивности; R – активное сопротивление; K – ключ

При протекании тока энергия, сообщенная контуру при разрядке конденсатора, превращается в тепловую, которая выделяется в резисторе R . Поэтому колебания затухают. На рис. 2.2 показан график изменения напряжения $u = q/C$ на обкладках конденсатора с течением времени.

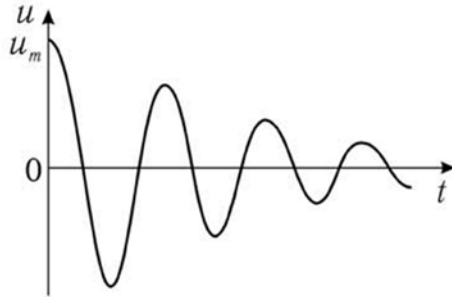


Рис. 2.2. Затухающие колебания

Закон изменения напряжения имеет следующий вид:

$$U(t) = U_m e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (2.1)$$

где $U(t)$ – мгновенное значение напряжения; U_m – его начальная амплитуда; ω – циклическая частота затухающих колебаний; t – время от начала разрядки; φ – начальная фаза; δ – коэффициент затухания.

$$\delta = \frac{R}{2L}. \quad (2.2)$$

Циклическая частота ω затухающих колебаний определяется параметрами цепи – ее индуктивностью L , емкостью C и активным сопротивлением R :

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 + \delta^2}, \quad (2.3)$$

где ω_0 – собственная частота контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.4)$$

Период затухающих колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{(1/LC) - \delta^2}} \quad (2.5)$$

больше, чем период незатухающих $T_0 = 2\pi / \omega_0$ и, как следует из формул (2.2) – (2.5), отличается от него тем сильнее, чем больше величина δ . При $\delta \ll \omega_0$ период колебаний $T \cong 2\pi\sqrt{LC}$.

По мере увеличения коэффициента затухания период колебаний растет, стремясь к бесконечности при $\delta \rightarrow \omega_0$. Это означает,

что колебания в цепи сменяются апериодическим разрядом конденсатора (рис. 2.3).

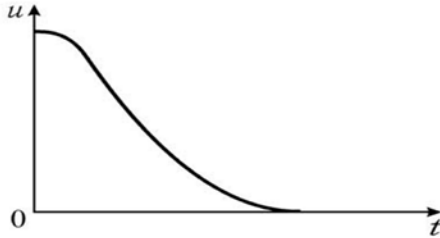


Рис. 2.3. Апериодический разряд

Сопротивление контура, при котором возникает такой разряд, называют критическим. Величина $R_{кр}$, согласно условию $\delta = \omega_0$ и с учетом формул (2.2), (2.4), определяется выражением

$$R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.6)$$

Затухание колебаний характеризуют величиной логарифмического декремента затухания:

$$\lambda = \ln(U(t) / U(t+T)), \quad (2.7)$$

где $U(t)$ и $U(t+T)$ – амплитуды напряжения в моменты времени, отличающиеся на период. В соответствии с законом колебаний (2.1) имеем

$$\lambda = \delta T. \quad (2.8)$$

2. Описание экспериментальной установки и метода измерений

Описание установки

Для исследования затухающих электрических колебаний используется моноблок ЭИМ-М-Л10, мини-модули «Конденсатор» – 2 шт., мини-модуль «Индуктивность» и осциллограф (АКИП-4115/1А).

Внешний вид лабораторной установки представлен на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Лабораторная установка «Изучение свободных затухающих колебаний»

Моноблок содержит

Генератор сигналов специальной формы (меандр «П») с регулировкой частоты в диапазоне от 50 Гц до 6 кГц и регулируемой амплитудой от 0 до 12 В, с индикацией текущего значения частоты и уровня амплитуды. Генератор предназначен для получения униполярных импульсов с целью сообщения энергии колебательному контуру.

Исследуемый колебательный контур состоит из последовательно соединенных катушки (с известной индуктивностью L и активным сопротивлением R_k), реостата R_1 и конденсатора известной емкости C (C_1 или C_2).

Напряжение U_Y с конденсатора колебательного контура подают на вход осциллографа. Масштабная сетка, нанесенная на его экране, позволяет измерять параметры зависимости $U(t)$: амплитуду и период затухающих колебаний. По осциллограмме $U(t)$ наблюдают также переход от колебаний к аperiodическому разряду конденсатора. Для его достижения увеличивают сопротивление контура с помощью реостата.

Метод измерений

Для наблюдения затухающих колебаний напряжение U с обкладок конденсатора колебательного контура подают на вход Y осциллографа. Конденсатор подключен к генератору сигналов специальной формы, настроенному на выдачу униполярных импульсов. В течение первой половины периода напряжение U на конденсато-

ре равно э.д.с. источника. Через половину периода напряжение $U=0$. В контуре начинаются свободные затухающие колебания. Осциллограмма этих колебаний показана на рис. 2.4.

Измерение параметров затухающих колебаний по осциллограмме

Амплитуды напряжения на конденсаторе $U(t)$ и $U(t+T)$ (рис. 2.5), необходимые для расчета логарифмического декремента λ по формуле (2.7), можно измерить в делениях шкалы Y осциллографа.

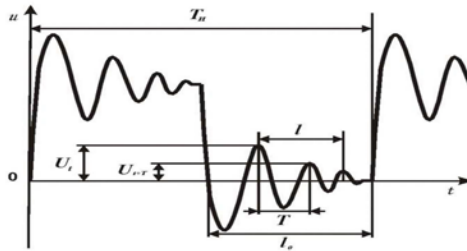


Рис. 2.5. Осциллограмма

Для измерения периода колебаний T проводят предварительную калибровку оси времени осциллографа по известному периоду $T_{и}$. При этом определяют цену деления оси X как отношение $m = T_{и} / 2l_0$ (с/дел.). В результате измеряемый период затухающих колебаний

$$T = \frac{ml}{n} = \frac{T_{и}l}{2nl_0}, \tag{2.9}$$

где l_0 – число делений, соответствующее отрезку времени, равному половине периода колебаний $T_{и}$ (см. рис. 2.5); n — целое число полных колебаний на отрезке оси длины l .

По измеренным значениям λ и T с помощью формулы (2.8) определяют экспериментальное значение коэффициента затухания δ .

Критическое сопротивление контура $R_{кр}$ находят опытным путем, наблюдая изменение вида зависимости $U(t)$ по мере увеличения активного сопротивления контура R . Признаком выхода на режим аperiодического разряда конденсатора является получение кривой $U(t)$, не содержащей колебаний (см. рис. 2.3).

3. Выполнение лабораторной работы

Выполнение измерений

1. На место конденсатора C установите конденсатор с известной емкостью C_1 (по указанию преподавателя). Установите сопротивление реостата R_1 равным $0 \text{ к}\Omega$.

2. Включите осциллограф.

Калибровка установки

3. Включите питание моноблока. Установите частоту сигнала генератора ν : 100 Гц (период $T_H = 0,01 \text{ с}$). Установите амплитуду сигнала генератора, близкую к максимальной.

4. На осциллографе нажмите кнопку «АВТО». Получите осциллограмму вида, показанного на рис. 2.4, устанавливая амплитуду импульсов кнопками регулировки амплитуды сигнала генератора. Регулируя развертку осциллографа, добейтесь, чтобы отрезок l_0 занял как можно большее пространство сетки экрана. Значение l_0 запишите в табл. 2.1.

5. Внесите в табл. 2.1 следующие параметры контура:

L – индуктивность катушки;

C – емкость конденсатора;

R_k – активное сопротивление катушки ($1,5 \Omega$).

Таблица 2.1. Измерение параметров колебательного контура

C , мкФ	L , мГн	R_k , Ω	l_0 , мм	l , мм	n	$U(t)$, дел.	$U(t+T)$, дел.	$R_{кр}$, к Ω
$C_1 = \dots$								
$C_2 = \dots$								

6. Перенесите осциллограмму колебаний напряжения $U(t)$ с экрана на лист бумаги. По координатной сетке экрана или линейкой измерьте длину участков l .

7. Проведите измерения величин l и l_0 , амплитуды $U(t)$ и $U(t+T)$ (для более точного их отсчета перемещайте измеряемую ординату на центральную линию экрана), определите число полных колебаний n на участке l . Результаты этих измерений запишите в табл. 2.1.

8. Увеличивая сопротивление реостата R_1 , наблюдайте изменение затухания колебаний и переход осциллограммы от вида на рис. 2.2 к виду, показанному на рис. 2.3. Минимальное сопро-

тивление цепи, при котором получена осциллограмма вида рис. 2.3, есть $R_{кр} = R_k + R_1$. Определите значение R_1 по его градуировке. Рассчитайте и запишите значение $R_{кр}$ в табл. 2.1.

9. Выключите питание моноблока и осциллографа.

10. Вместо конденсатора C_1 установите конденсатор C_2 другой емкости и повторите п. 3–9.

4. Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 2.1 для каждого значения емкости вычислите расчетные (р) и экспериментальные (э) величины логарифмического декремента λ , коэффициента затухания δ , периода колебаний T и критического сопротивления контура $R_{кр}$.

Используйте формулы, номера которых указаны в табл. 2.2, предназначенной для записи результатов расчета.

Таблица 2.2

C , мкФ	λ	δ , c^{-1}		T , мс		$R_{кр}$, к Ω М	
	э (2.7)	р (2.2)	э (2.8)	р (2.5)	э (2.9)	р (2.6)	э ($R_k + R_1$)
$C_1 = \dots$							
$C_2 = \dots$							

Примечание. Обратите внимание, что экспериментальные значения коэффициента затухания больше, чем расчетные, из-за существенных потерь энергии на перемagnичивание сердечника катушки.

2. В выводе по работе сделайте анализ полученных данных:

а) укажите характерные изменения осциллограммы и параметров колебаний при изменении емкости контура;

б) опишите изменения зависимости $U(t)$ по мере увеличения активного сопротивления цепи;

в) сравните полученные экспериментальные значения величин T и $R_{кр}$ с расчетными.

Контрольные вопросы

1. По какому закону изменяются при разряде конденсатора в колебательном контуре, содержащем R , L , C , следующие величины:

а) напряжение на конденсаторе; б) заряд обкладок; в) ток в цепи?

2. Какие формулы показывают, как зависят от параметров колебательного контура следующие характеристики колебаний:

а) циклическая частота и период затухающих колебаний;

- б) коэффициент затухания колебаний;
 - в) критическое сопротивление контура?
3. При изменении каких параметров контура, содержащего R , L , C :
- а) сближаются значения периодов затухающих и незатухающих колебаний;
 - б) изменяется коэффициент затухания колебаний;
 - в) изменяется критическое сопротивление контура?
4. Что происходит в колебательном контуре при сопротивлении, большем критического значения, т.е. при выполнении условия $\delta > \omega_0$?
5. Какие величины измеряют по осциллограмме колебаний для определения:
- а) периода затухающих колебаний;
 - б) логарифмического декремента затухания колебаний?
6. Какие величины используют для калибровки оси X осциллографа?
7. Как определяют экспериментальное значение критического сопротивления контура? Какой вид принимает осциллограмма $U(t)$ при достижении $R_{кр}$?
8. Какое назначение имеют следующие элементы электрической цепи:
- а) генератор напряжений специальной формы; б) реостат?
9. Какой параметр колебательного контура изменяют в работе, чтобы получить апериодический разряд конденсатора?
10. С каких элементов электрической цепи можно подать напряжение на вход Y осциллографа для наблюдения затухающих колебаний?
11. По каким формулам определяют:
- а) экспериментальное значение периода колебаний T ;
 - б) экспериментальное значение коэффициента затухания колебаний δ ;
 - в) расчетные (теоретические) значения величин T , δ и $R_{кр}$?

Лабораторная работа № 3. Взаимная индукция двух соленоидов

Цель: определение коэффициента взаимной индукции двух соленоидов и сравнение результата с рассчитанным теоретически.

Оборудование: моноблок «Изучение явления взаимной индукции» ЭИМ-М-Л6, мини-модуль «Соленоиды».

1. Теоретические сведения

Контур с током I_1 создает вокруг себя магнитное поле \vec{B}_1 . Если вблизи этого контура поместить другой контур, то с ним окажется сцеплен некоторый магнитный поток Φ_2 . Этот магнитный поток, как показывает опыт и теория, пропорционален величине тока в первом контуре (рис. 3.1):

$$\Phi_2 = M_{21}I_1.$$

Коэффициент пропорциональности M_{21} между магнитным потоком Φ_2 (рис. 3.1), сцепленным со вторым контуром, и током I_1 , текущим по первому контуру, называется коэффициентом взаимной индукции второго контура с первым.

Исследуем коэффициент взаимной индукции контуров на примере двух соленоидов, оси которых совпадают и один из них (короткий) L_K помещен снаружи длинного L_D в его середине (рис. 3.2)

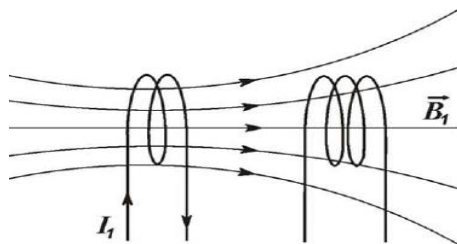


Рис. 3.1

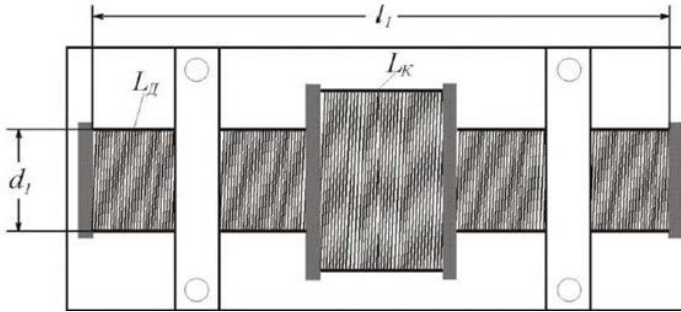


Рис. 3.2. Мини-модуль «Соленоиды»

Длинный соленоид ($l_1 \gg d_1$) создает в средней его части (где расположен короткий) практически однородное магнитное поле, вектор индукции которого равен

$$B_1 = \mu\mu_0 \frac{N_1}{l_1} I_1, \quad (3.1)$$

где N_1 – число витков длинного соленоида; l_1 – его длина.

Магнитный поток через сечение $S_1 = \pi d_1^2 / 4$ длинного соленоида (следовательно, и через сечение короткого) равен

$$\Phi_1 = B_1 \cdot S_1. \quad (3.2)$$

Так как магнитное поле снаружи длинного соленоида отсутствует, то магнитный поток, сцепленный с коротким соленоидом

$$\Phi_2 = \Phi_1 N_2 = \mu\mu_0 \frac{N_1}{l_1} S_1 I_1 N_2, \quad (3.3)$$

где N_2 – число витков короткого соленоида.

Следовательно, коэффициент взаимной индукции второго соленоида с первым

$$M_{21} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l_1} S_1. \quad (3.4)$$

В нашем случае $\mu = 1$ (воздух).

Если через длинный соленоид пропустить переменный ток

$$I = I_0 \cos \omega t, \quad (3.5)$$

(где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота тока), то магнитный поток, сцепленный с коротким соленоидом, будет переменным

$$\Phi_2 = M_{12} I_0 \cos 2\pi \nu t. \quad (3.6)$$

Следовательно, в нем будет наводиться э.д.с. индукции

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = M_{12}I_0 \cdot 2\pi\nu \sin 2\pi\nu t. \quad (3.7)$$

Амплитуда этой э.д.с.

$$\varepsilon_{\max} = 2\pi\nu M_{12} \cdot I_0. \quad (3.8)$$

Электроизмерительные приборы (в том числе и мультиметры) измеряют действующие значения тока и напряжения

$$U_2 = \frac{\varepsilon_{\max}}{\sqrt{2}}, I_1 = \frac{I_0}{\sqrt{2}}. \quad (3.9)$$

Учитывая это, получаем из (3.8) и (3.9):

$$U_2 = M_{21} 2\pi\nu I_1.$$

Следовательно,

$$M_{21} = \frac{U_2}{2\pi\nu I_1}. \quad (3.10)$$

Таким образом, измеряя ток I_1 в длинном соленоиде и напряжение U_2 , возникающее на концах короткого соленоида, можно экспериментально определить M_{21} .

2. Описание экспериментальной установки

Для определения коэффициента взаимной индукции двух соленоидов используется моноблок ЭИМ-М-Л6 и мини-модуль «Соленоиды».

Внешний вид лабораторной установки представлен на рис. 3.3.

Моноблок содержит:

- генератор сигнала синусоидальной формы с регулируемой частотой в диапазоне от 100 Гц до 6 кГц и регулируемой амплитудой от 0 до 15 В, с индикацией текущих частоты и амплитуды;
- мультиметр – 2 шт.;
- гнезда диаметром 4 мм для установки мини-модуля и подключения мультиметров;
- на лицевой панели – рисунок функциональной схемы;
- проведения измерений для определения коэффициента взаимной индукции двух соленоидов.

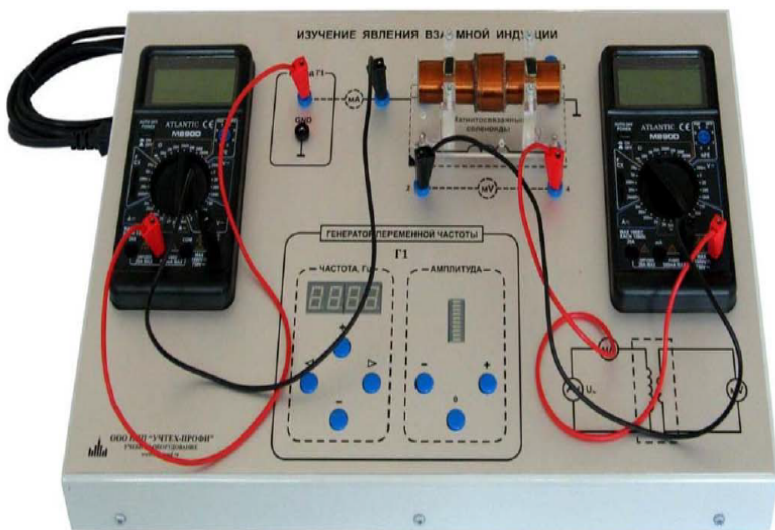


Рис. 3.3. Лабораторная установка «Определение коэффициента взаимной индукции двух соленоидов»

Для проведения лабораторной работы используется мини-модуль «Соленоиды», входящий в комплект поставки. Мини-модуль содержит два соленоида, оси которых совпадают и один из них (короткий) помещен снаружи длинного в его середине. Длинный соленоид создает практически однородное магнитное поле в средней его части, где расположен короткий.

Параметры мини-модуля «Соленоиды» (см. рис. 3.2):

1. Длинный соленоид: общее количество витков $N_1 = N_D = 2380$, многослойная намотка, $l_1 = 100$ мм, средний диаметр намотки $d_{1cp} = 2$ мм.
2. Короткий соленоид: общее количество витков $N_1 = N_K = 476$, многослойная намотка, $l_2 = 18$ мм, $d_2 = 27$ мм.

Электрическая схема установки приведена на рис. 3.4.

Питание длинного соленоида 3 осуществляется от генератора переменной частоты 1. Ток в поле измеряется мультиметром 2. Э.д.с. индукции, возникающая в коротком соленоиде 4, измеряется вольтметром 5.

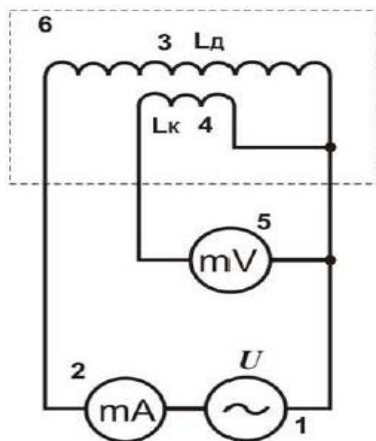


Рис. 3.4. Электрическая схема: 1 – генератор переменной частоты; 2 – мультиметр (режим $A \sim 200 \text{ mA}$, входы COM, mA); 3 – длинный соленоид с индуктивностью $L_{\text{д}}$ ($N_{\text{д}}=2380$ витков); 4 – короткий соленоид индуктивностью $L_{\text{к}}$ ($N_{\text{к}}=476$ витков); 5 – мультиметр (режим $V \sim 200 \text{ V}$, входы COM, V Ω); 6 – мини-модуль «Соленоиды»

3. Выполнение лабораторной работы

Выполнение измерений

1. Установите мини-модуль «соленоиды» на моноблок ЭИМ-М6. Соберите электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 3.4 и панели моноблока.
2. Установите необходимые режимы измерения мультиметров 2 и 5 (см. рис. 3.4).
3. Включите моноблок кнопкой «Сеть» на левой боковой поверхности корпуса.
4. В табл. 3.1 запишите параметры N_1, N_2, l_1, d_1 .

Таблица 3.1

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}, N_1 = \dots, N_2 = \dots, l_1 = \dots \text{ мм}, d_1 = \dots \text{ мм}, S = \dots \text{ м}^2$			
$\nu, \text{ Гц}$	$I_1, \text{ mA}$	$U_2, \text{ V}$	$M_{\text{Э21}}, \text{ Гн}$
200	40		
200	60		
200	80		
500	40		

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}, N_1 = \dots, N_2 = \dots, l_1 = \dots \text{ мм}, d_1 = \dots \text{ мм}, S = \dots \text{ м}^2$			
$\nu, \text{ Гц}$	$I_1, \text{ мА}$	$U_2, \text{ В}$	$M_{Э21}, \text{ Гн}$
500	60		
500	80		
800	30		
800	50		
800	70		
100	20		
1000	40		
1000	60		
2000	10		
2000	20		
2000	30		
4000	5		
4000	10		
4000	15		

5. Кнопками установки частоты генератора установите частоту сигнала $\nu = 200 \text{ Гц}$. С помощью кнопок установки амплитуды установите значение тока $I_1 = 40 \text{ мА}$ в длинном соленоиде и проведите замер напряжения U_2 на коротком соленоиде. Результат занесите в таблицу.

6. Проведите подобные измерения для других токов и частот, указанных в таблице (если нет по этому поводу указаний преподавателя). Результат занесите в таблицу.

7. Выключите питание моноблока кнопкой «Сеть» на левой боковой поверхности корпуса.

Обработка результатов измерений

1. Используя формулу (3.10), рассчитайте для каждого измерения экспериментальный коэффициент магнитной индукции $M_{Э21}$. Результат занесите в таблицу.

2. Рассчитайте среднее значение экспериментального коэффициента магнитной индукции $\langle M_{Э} \rangle$.

3. По формуле (3.4) рассчитайте теоретическое значение коэффициента магнитной индукции M_T .

4. Сравните между собой значение экспериментального $\langle M_{Э} \rangle$ и теоретического M_T коэффициента взаимной индукции.

5. Сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент взаимной индукции?
2. В каких единицах измеряется коэффициент взаимной индукции?
3. Почему в данной работе используется один длинный, а другой короткий соленоид?
4. Что такое магнитный поток?
5. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
6. Сформулируйте закон Фарадея для электромагнитной индукции.
7. Что такое действующие значения тока и напряжения?

Лабораторная работа № 4. Сложение гармонических колебаний

Цель: исследовать сложение гармонических электрических колебаний с помощью осциллографа.

Оборудование: моноблок «Сложение гармонических колебаний» ЭИМ-М-Л19, 2-канальный осциллограф с режимом XY.

1. Теоретические сведения

Рассмотрим точку, колеблющуюся с одинаковыми частотами во взаимно перпендикулярных направлениях. Пусть координаты (x, y) точки изменяются по закону

$$\begin{cases} x = A_x \cos(\omega t + \varphi_1), \\ y = A_y \cos(\omega t + \varphi_2). \end{cases} \quad (4.1)$$

Введя разность фаз складываемых колебаний $\delta = \varphi_2 - \varphi_1$ («сдвиг фаз»), можно без ограничения общности переписать систему (4.1) в виде

$$\begin{cases} x = A_x \cos \omega t, \\ y = A_y \cos(\omega t + \delta). \end{cases} \quad (4.2)$$

Получим уравнение, описывающее *траекторию движения* точки. Для этого из системы (4.2) следует исключить зависимость от времени. Имеем:

$$\frac{x}{A_x} = \cos \omega t, \quad \frac{y}{A_y} = \cos(\omega t + \delta) = \cos \omega t \cos \delta - \sin \omega t \sin \delta.$$

Избавимся от синуса во втором уравнении:

$$\sin^2 \omega t \sin^2 \delta = (1 - \cos^2 \omega t) \sin^2 \delta = \left(\cos \omega t \cos \delta - \frac{y}{A_y} \right)^2.$$

И окончательно:

$$\frac{x^2}{A_x^2} + \frac{y^2}{A_y^2} - 2 \frac{xy}{A_x A_y} \cos \delta = \sin^2 \delta. \quad (4.3)$$

Итак, в рассматриваемом случае траекторией частицы является эллипс, вид которого определяется разностью фаз и отношением амплитуд A_x и A_y (рис. 4.1).

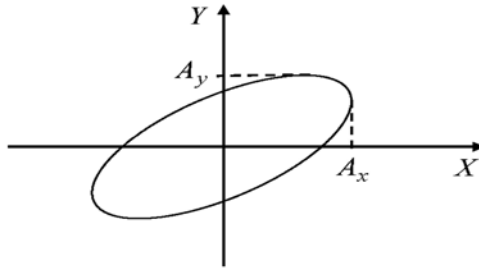


Рис. 4.1. Траектория движения частицы в общем случае

Рассмотрим некоторые частные случаи.

1. $\delta=0$. В этом случае $\sin \delta = 0, \cos \delta = 1$, и уравнение колебаний принимает вид

$$\left(\frac{x}{A_x} - \frac{y}{A_y} \right)^2 = 0,$$

т.е. точка движется по отрезку прямой линии в 1-м и 3-м квадрантах (рис. 4.2а).

$$\frac{x}{A_x} = \frac{y}{A_y}, |x| \leq A_x, |y| \leq A_y.$$

2. $\delta=\pi$. В этом случае $\sin \delta = 0, \cos \delta = -1$. Уравнение траектории

$$\frac{x}{A_x} = -\frac{y}{A_y}, |x| \leq A_x, |y| \leq A_y.$$

Это снова отрезок, но во 2-м и 4-м квадрантах (рис. 4.2б).

3. $\delta=\pi/2$. В этом случае уравнение колебаний принимает вид

$$\frac{x^2}{A_x^2} + \frac{y^2}{A_y^2} = 1$$

– частица движется по эллипсу, полуоси которого A_x и A_y совпадают с осями координат. При $A_x=A_y$ эллипс превращается в окружность. Движение частицы по траектории будет происходить в направлении часовой стрелки (рис. 4.2в).

4. $\delta=-\pi/2$. Движение происходит по тому же эллипсу, что и в предыдущем случае, но против часовой стрелки (почему?) – рис. 4.2г.

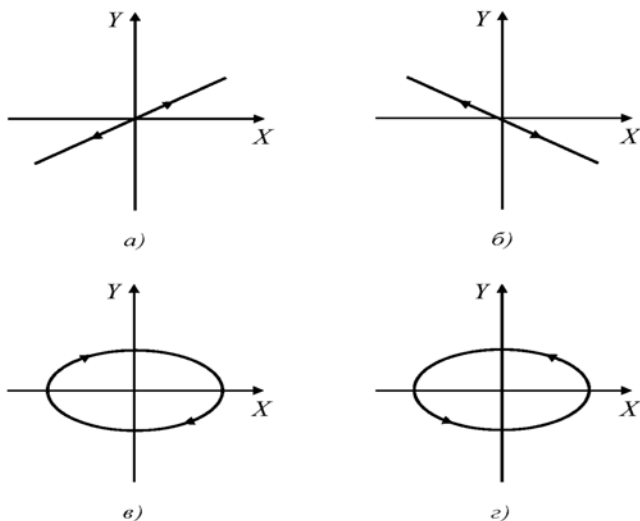


Рис. 4.2. Частные случаи траекторий движения частицы

Если частоты взаимно перпендикулярных колебаний не одинаковы и соотносятся как целые числа, то траектории результирующих колебаний имеют более сложную форму и носят название *фигур Лиссажу*. На рис. 4.3 показана фигура Лиссажу для соотношения частот $\frac{\omega_x}{\omega_y} = \frac{1}{2}$. Фигуры Лиссажу для других соотношений частот представлены на рис. 4.6.

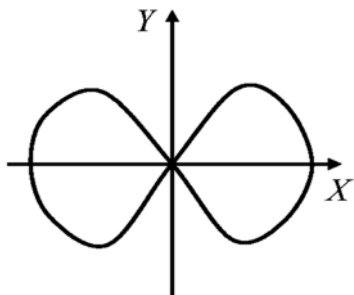


Рис. 4.3 Фигура Лиссажу для соотношения частот $\frac{\omega_x}{\omega_y} = \frac{1}{2}$

Фигуры Лиссажу весьма удобно наблюдать на экране осциллографа, так как в этом случае можно наблюдать траектории, получающиеся при сложении колебаний с произвольными частотами.

2. Описание экспериментальной установки

Для исследования сложения гармонических колебаний используется моноблок ЭИМ-М-Л-9 и 2-канальный осциллограф (АКИП-41 15/1А).

Внешний вид лабораторной установки представлен на рис. 4.4.

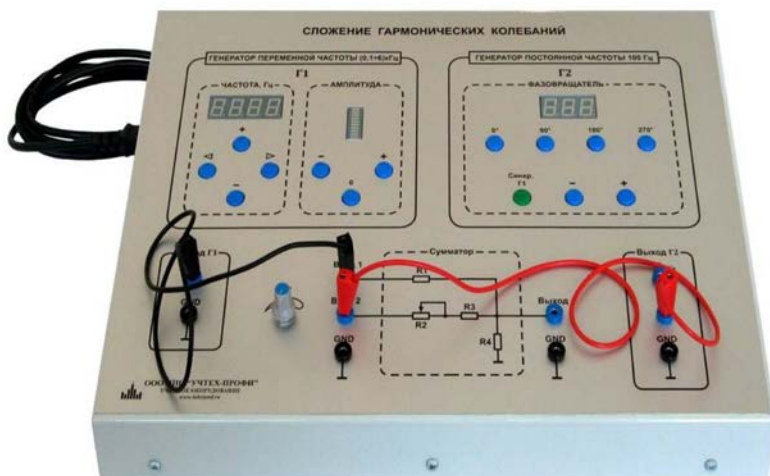


Рис. 4.4. Лабораторная установка «Сложение гармонических колебаний»

Моноблок содержит:

- Генератор постоянной звуковой частоты (ЗЧ) Г2 с фазовращателем: частота генератора 100 ± 1 Гц; органы управления:
 - кнопки фиксированной установки фазы: 0° , 90° , 180° , 270° ;
 - кнопки изменения фазы на 1° : « \leftarrow » – в сторону уменьшения, « \rightarrow » – в сторону увеличения;
 - кнопка «Синхр. Г1» – синхронизация генератора Г2 от генератора Г1;
- генератор ЗЧ Г1 с возможностью изменения частоты в диапазоне от 100 Гц до 6 кГц, с индикацией текущих частоты и амплитуды; органы управления:

- кнопки выбора величины шага изменения частоты (1, 10, 100, 1000 Гц): «←» – в сторону уменьшения, «+» – в сторону увеличения;
- кнопки изменения частоты: «+» – увеличение частоты на 1 шаг, «←» – уменьшение частоты на 1 шаг;
- кнопки изменения амплитуды: «←» – в сторону уменьшения, «+» – в сторону увеличения;
- кнопка установки нулевой амплитуды – «0»;
- сумматор сигналов с изменяемым весовым коэффициентом, его параметры: $R1 = R2 = R3 = R4 = 10 \text{ к}\Omega$;
- гнезда диаметром не менее 4 мм для сборки схемы проведения измерений и подключения осциллографа;
- на лицевой панели – рисунок схемы проведения эксперимента по исследованию сложения гармонических электрических колебаний;
- для проведения лабораторной работы используется 2-канальный осциллограф с режимом XY (АКИП-41 15/1А).

3. Выполнение лабораторной работы

Задание 1. Определение длительности и частоты периодических сигналов.

1. Включите моноблок кнопкой «Сеть» на левой боковой поверхности корпуса.
2. Установите амплитуду и частоту генератора переменной частоты (0,1 + 6) кГц (в дальнейшем – генератор Г1) по заданию преподавателя.
3. Включите осциллограф АКИП-4115/1А (в дальнейшем – осциллограф) кнопкой на верхней части корпуса. Нажмите кнопку «МЕНЮ СИНХР» и установите Источник КАН1.
4. Кабелем из комплекта соедините первый канал осциллографа КАН1 с выходом генератора Г1.
5. Установите вертикальную и горизонтальную развертку осциллографа таким образом, чтобы на экране отображалось 1–2 периода колебаний и сигнал не выходил за пределы экрана по вертикали.
6. По клеткам на экране осциллографа определите период гармонического колебания в клетках. При необходимости задавайте горизонтальное смещение сигнала на экране ос-

циллографа соответствующей ручкой. Результат занесите в табл. 4.1, а также запишите коэффициент горизонтальной развертки «ВРЕМЯ/ДЕЛ».

- Повторите пункт 6 не менее 5 раз при различных коэффициентах развертки.

Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

№ п/п	Количество клеток в периоде	Коэффициент развертки «ВРЕМЯ/ДЕЛ»	Период T , с	Частота f , Гц
1				
2				
3				
4				
5				
среднее значение \bar{f}				

- Вычислите период T как произведение количества клеток и коэффициента развертки.
- Рассчитайте частоту сигнала и среднее значение частоты $\bar{f} = 1/T$.
- Оцените погрешность измерения частоты f . Исправленная среднеквадратичная ошибка при n измерениях

$$\Delta f = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2},$$

относительная ошибка $\delta = \frac{\Delta f}{f} 100\%$.

- Окончательный результат измерения частоты представьте в виде $f = \bar{f} \pm \Delta f$.

Задание 2. Исследование сдвига фаз между периодическими сигналами.

Сравнение фаз между двумя сигналами одной частоты можно осуществить, используя двухканальный режим работы осциллографа.

- Подключите первый канал осциллографа КАН1 к выходу генератора постоянной частоты 100 Гц (в дальнейшем гене-

ратор Г2) гнезда GND и $U_{100\Omega}$, второй канал КАН2 к выходу генератора Г2 после фазовращателя, гнезда GND и U_{ϕ} . Из-за не идентичности входов осциллографа возможен некоторый фазовый сдвиг, это влияет на показания осциллографа.

2. Включите два канала осциллографа кнопками КАН1 и КАН2.
3. Фазовращателем на генераторе Г2 установите фазу по заданию преподавателя кнопками «+», «-» либо дискретно.
4. Измерьте период опорного сигнала (КАН1) T_1 в делениях шкалы (рис. 4.5).

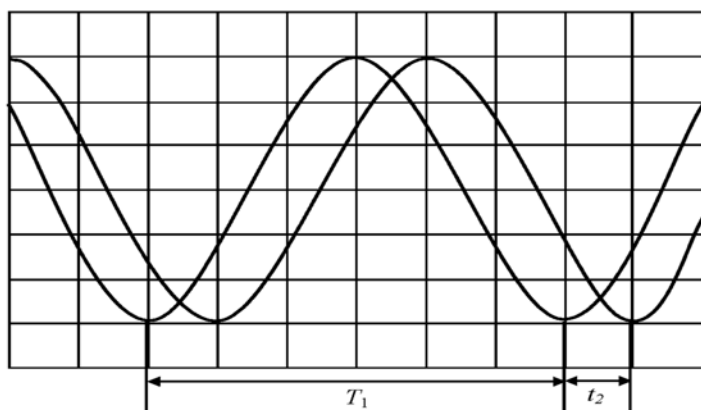


Рис. 4.5. Измерение разности фаз

5. Измерьте разность по горизонтали между соответствующими точками сигналов t_2 (в делениях шкалы).
6. Фазовый сдвиг $\Delta\phi$ вычислить по формуле:

$$\Delta\phi = \frac{t_2}{T_1} 360^\circ.$$

7. Разность по горизонтали между точками 1-го и 2-го сигналов (в делениях шкалы) измерить не менее 5 раз при различном фазовом сдвиге на индикаторе фазовращателя.
8. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 4.2.

Таблица 4.2

№ п/п	Период опорного сигнала T_1 , дел.	Показания индикатора фазовращателя	Разность t_2 , дел.	Разность фаз $\Delta\varphi$, град.

Задание 3. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу.

1. Подключите первый канал осциллографа КАН1 к выходу генератора Г1, второй канал КАН2 – к выходу генератора Г2 после фазовращателя, гнезда GND и U_ϕ .
2. На генераторе Г1 установите максимальную амплитуду, а на фазовращателе – нулевой сдвиг фазы.
3. Установите вертикальную и горизонтальную развертку осциллографа таким образом, чтобы на экране отображалось 4–5 периодов колебаний и сигнал не выходил за пределы экрана по вертикали (вертикальная развертка у обоих каналов должна быть одинакова).
4. На осциллографе нажмите кнопку ДИСПЛЕЙ, затем на второй странице появившегося меню во вкладке Формат выберите XY.
5. Изменяя частоту генератора Г1 и сдвиг фазы на фазовращателе, в соответствии с теоретическими данными добейтесь на экране осциллографа появления фигур Лиссажу, изображенных на рис. 4.6.

Важно. При любом изменении частоты генератора Г1 необходимо синхронизировать генераторы Г1 и Г2 между собой, для это нажмите кнопку «Синхр. Г1» на фазовращателе.

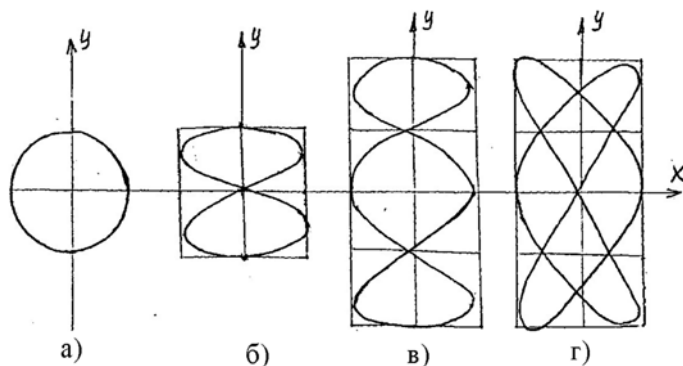


Рис. 4.6. Вид фигур Лиссажу

1. Зарисуйте фигуры Лиссажу и запишите частоту генератора Г1 для каждой фигуры.
2. На осциллографе нажмите кнопку ДИСПЛЕЙ, затем на второй странице появившегося меню во вкладке Формат выберите YТ.

Задание 4. Исследование сложения гармонических колебаний с помощью резистивного сумматора.

1. Соедините выход генератора Г1 с входом ВХОД 1 сумматора, а выход генератора F2, гнездо $U_{100\text{Гц}}$ – с входом ВХОД 2.
2. Ручку резистора R2 установите в крайнее левое положение.
3. Соедините первый канал осциллографа с выходом сумматора.
4. Установите частоту генератора Г1 300Гц, не забывайте синхронизировать генераторы (кнопка «Синхр. Г1»).
5. Зарисуйте и объясните полученную осциллограмму, а также сравните с теоретической.
6. Повторите пункт 5 для частоты генератора Г1 500Гц.
7. Выключите осциллограф и моноблок.

Контрольные вопросы

1. В чем различие между гармоническими и негармоническими колебаниями?
2. Дайте определения периода, частоты, фазы колебаний.
3. Расскажите, в чем состоит метод фигур Лиссажу, примененный для определения частоты колебаний.

4. Определите по виду фигуры Лиссажу отношение частот колебаний.

5. Объясните, в каком случае в результате сложения колебаний получаются фигуры Лиссажу, а в каком биения?

6. Какие процессы называются периодическими?

7. Запишите дифференциальное уравнение гармонических колебаний и его решение.

8. Расскажите, как с помощью осциллографа определять длительность и частоты периодических сигналов.

9. Расскажите порядок операций, необходимых для измерения разности фаз.

10. Нарисуйте принципиальную схему установки для получения фигур Лиссажу.

Лабораторная работа № 5. Изучение электронно-дырочного перехода в полупроводниках

Цель: построение вольт-амперной характеристики полупроводникового диода и температурной зависимости тока дрейфа полупроводникового *p-n*-перехода.

Оборудование: регулируемый источник постоянного напряжения «0... +15 В», стабилизированный источник постоянного напряжения «-15 В», мини-модуль «*p-n*-переход», мультиметры.

1. Теоретические сведения

*Теория невырожденного *p-n*-перехода*

Зона контакта двух невырожденных полупроводников *p*- и *n*-типа, называемая *p-n*-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 *n*-типа основными носителями заряда являются электроны, отданные донорными примесями в зону проводимости, а неосновными – дырки. В полупроводнике *p*-типа, наоборот, основными носителями заряда являются дырки, образовавшиеся в валентной зоне при захвате электронов акцепторными примесями, а неосновными – электроны (рис. 5.1).

Вследствие существования градиента концентрации электронов и дырок в области *p-n*-перехода происходит процесс диффузии основных носителей в тот полупроводник, где их мало. При этом электроны из *n*-полупроводника уходят в *p*-полупроводник, оставляя неподвижные ионы доноров с положительным зарядом. Дырки из *p*-полупроводника уходят в *n*-полупроводник, оставляя неподвижные ионы акцепторов с отрицательным зарядом. На границе возникают области объемных зарядов, которые образуют двойной электрический слой толщиной 0,1–1 мкм с контактной разностью потенциалов U_k . На рис. 5.1 показано равновесное распределение потенциала электрического поля и потенциальной энергии электронов и дырок $W=q\varphi$ в *p-n*-переходе. Диффундируя, электроны и дырки рекомбинируют друг с другом.

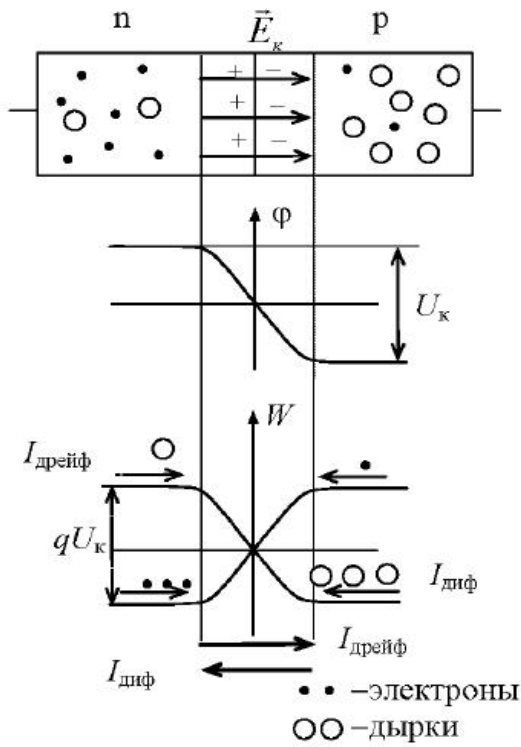


Рис. 5.1

Поэтому *p-n*-переход оказывается сильно обедненным носителями заряда и приобретает большое сопротивление. Контактное электрическое поле \vec{E}_k препятствует дальнейшей взаимной диффузии основных носителей. Возникает потенциальный барьер qU_k как для электронов, так и для дырок. Некоторому количеству основных носителей удастся преодолеть этот потенциальный барьер, возникает малый ток диффузии $I_{диф}$. Контактное поле способствует встречному дрейфу неосновных носителей, возникает ток дрейфа $I_{дрейф}$. При динамическом равновесии ток диффузии равен току дрейфа: $I_{диф} = I_{дрейф}$. Результирующий ток равен нулю. Количество основных носителей заряда, которые могут преодолеть потенциальный барьер вследствие теплового движения, определяется зако-

ном Больцмана. Поэтому сила тока диффузии, пропорциональная числу диффундировавших электронов и дырок, есть

$$I_{\text{дифф}} = I_0 \exp\left(-\frac{qU_{\text{к}}}{kT}\right). \quad (5.1)$$

Здесь I_0 – константа, зависящая от природы контактирующих полупроводников; $qU_{\text{к}}$ – высота потенциального барьера; kT – мера тепловой энергии.

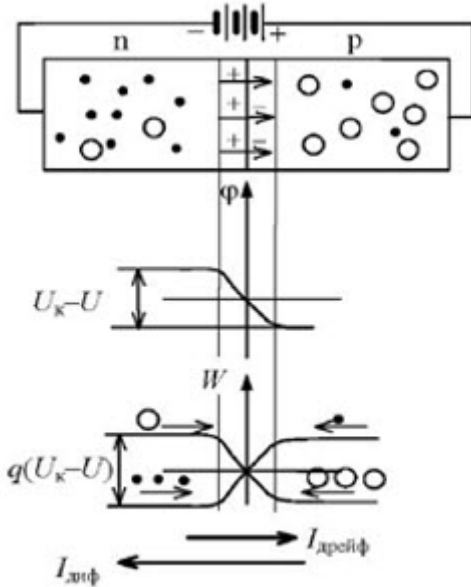


Рис. 5.2

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 (рис. 5.2). Ток дрейфа (неосновных носителей, увлекаемых полем) не изменяется, оставаясь малым, поскольку мала концентрация неосновных носителей заряда.

Уравнение результирующего тока через p - n -переход

$$\begin{aligned} I &= I_{\text{дифф}} - I_{\text{дрейф}} = I_0 \exp\left(-\frac{q(U_{\text{к}} - U)}{kT}\right) - I_0 \exp\left(-\frac{qU_{\text{к}}}{kT}\right) = \\ &= I_0 \exp\left(-\frac{qU_{\text{к}}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] = I_{\text{дрейф}} \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (5.2) \end{aligned}$$

Результирующее электрическое поле при $U > U_{\text{к}}$ «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. 5.3). 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 определяется формулой (5.2), в которой внешнюю разность потенциалов U следует считать отрицательной.

Зависимость силы тока через электронно-дырочный переход от приложенного напряжения (5.2) есть вольт-амперная характеристика (ВАХ) p - n -перехода (рис. 5.4). 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 I тока возрастает очень быстро, по экспоненциальному закону:

$$I \approx I_{\text{дрейф}} \exp\left(\frac{qU}{kT}\right), \quad (5.3)$$

так как током дрейфа, т.е. единицей в скобках уравнения (5.2), 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 ста-

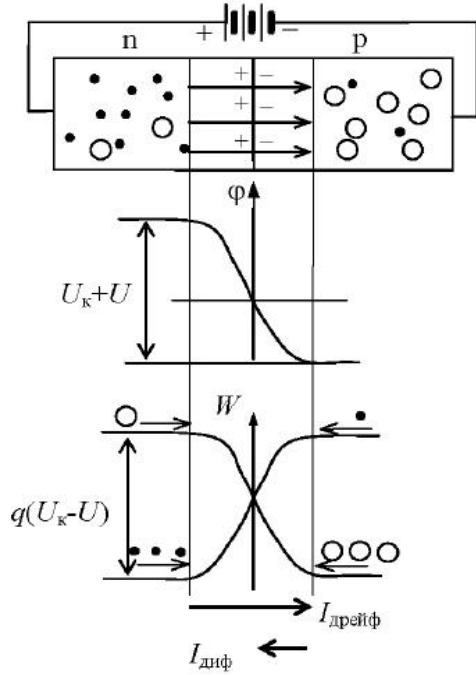


Рис. 5.3.

новится 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 p - n -переход является выпрямляющим контактом и используется для выпрямления переменного тока в полупроводниковых диодах.

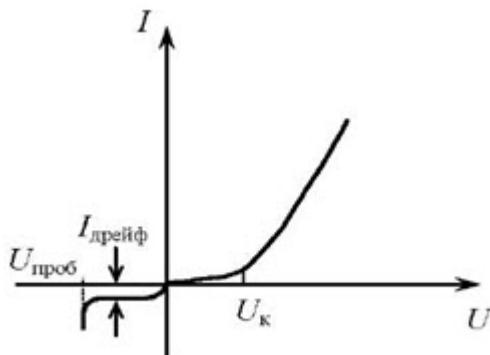


Рис. 5.4

2. Описание экспериментальной установки и метода измерений

Для построения вольт-амперной характеристики полупроводникового диода и температурной зависимости тока дрейфа полупроводникового p - n -перехода используется моноблок ЭиМ-М-Л15 и мини-модуль « p - n -переход».

Внешний вид лабораторной установки представлен на рис. 5.5.

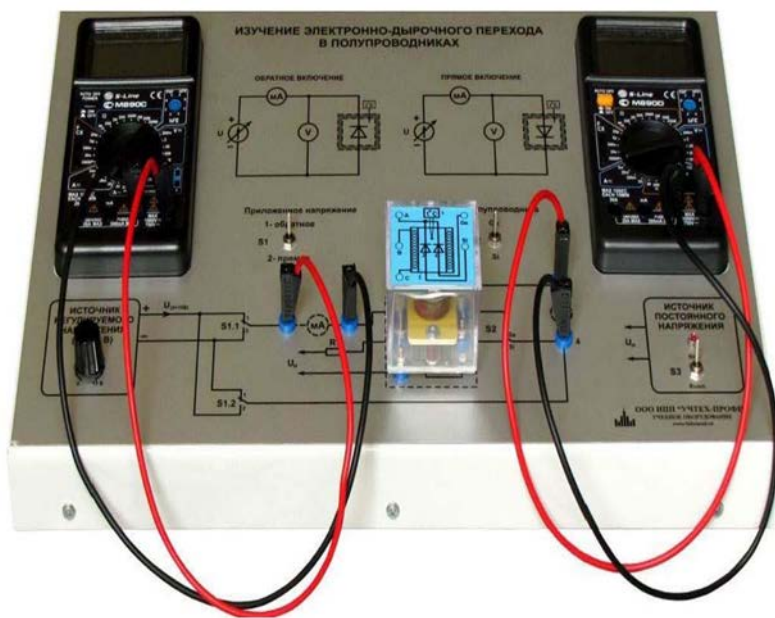


Рис. 5.5. Лабораторная установка «Изучение электронно-дырочного перехода в полупроводниках»

Моноблок содержит:

- регулируемый стабилизированный источник постоянного напряжения «0... +15 В»;
- источники стабилизированного постоянного напряжения;
- ключ (S1) для изменения полярности прикладываемого к диоду регулируемого напряжения;
- ключ (S2) для выбора исследуемого диода (Ge или Si);
- гнезда диаметром 4 мм для установки мини-модуля и подключения мультиметра;
- мультиметр – 2шт.;
- на лицевой панели изображены схема сборки эксперимента и функциональная схема проведения измерений для исследования вольт-амперной характеристики полупроводникового диода и температурной зависимости тока дрейфа полупроводникового $p-n$ -перехода.

Для проведения лабораторной работы используют мини-модуль «*p-n*-переход» (рис. 5.6), входящий в комплект поставки.

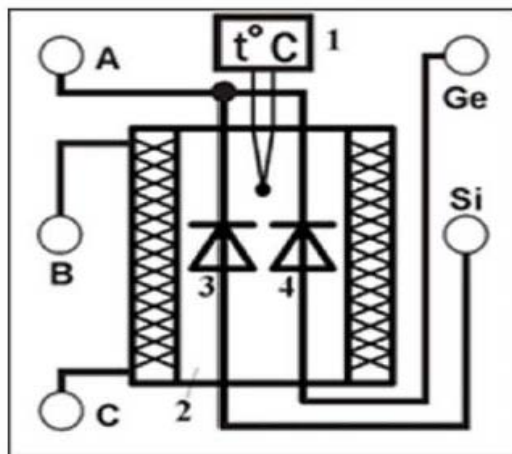


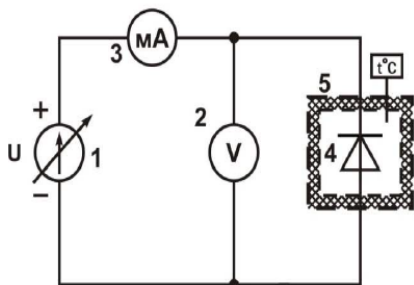
Рис. 5.6. Схема мини-блока «*p-n*-переход»: 1 – термопара с разъемом для подключения к мультиметру; 2 – электрическая печь; 3 – кремниевый Si диод; 4 – германиевый Ge диод

Полупроводниковые диоды: кремниевый 3 (Д220Б) и германиевый 4 (Д310) помещены в электрическую печь 2. Внутри печи введена термопара 1, сигнал с которой подается на клеммы разъема в верхней части блока, который соединяют специальным кабелем с мультиметром. При установке мини-модуля на моноблок к выводам В-С электрической печи подается напряжение нагрева U_n от источника постоянного напряжения.

Метод измерений

Для проведения измерений используются электрические схемы, приведенные на лицевой панели моноблока (рис. 5.7).

ОБРАТНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ



ПРЯМОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ

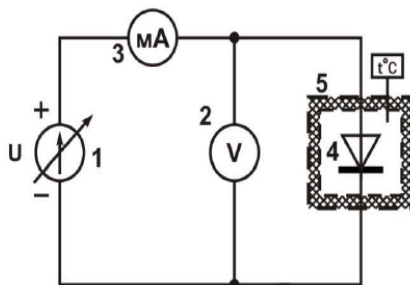


Рис. 5.7. Электрические схемы измерений

Элементы схем (рис. 5.7):

- 1) регулируемый источник постоянного напряжения (0...+15 В);
- 2) мультиметр (режим V – 2 В, входы COM, $V\Omega$);
- 3) мультиметр (режим A – 200 мА при измерении прямого тока и режим A – 2 мА при измерении обратного тока, входы COM, μA);
- 4) выпрямительный диод;
- 5) электронагреватель.

В работе используется диод германиевый Д-310, в котором электронно-дырочный переход образован сплавлением кристалла германия n -типа с индием. К диоду можно приложить либо прямое, либо обратное напряжение, которое измеряется вольтметром 2 (см. рис. 5.7). Сила тока определяется по миллиамперметру 3. Диод расположен внутри электронагревателя 5. Измерение температуры производится с помощью термопары, которая подключается к мультиметру, используемому в режиме измерения температуры.

3. Выполнение лабораторной работы

Задание 1. Изучение ВАХ диода.

1. Ознакомьтесь с устройством и принципом работы лабораторной установки.
2. Установите переключатель S3 в положение «Выкл.» – источник постоянного напряжения выключен.
3. Установите мини-блок « p - n -переход».
4. Выберите германиевый диод для исследования. Для этого установите переключатель S2 в положение Ge.

5. Соберите электрическую цепь по схеме, приведенной на панели моноблока и рис. 5.7 – прямое включение. Для этого установите переключатель S1 в положение 2. Мультиметр 1 используйте для измерения напряжения, мультиметр 2 используйте для измерения тока.
6. Ручку регулировки напряжения «0...15 В» на регулируемом источнике напряжения установите в крайнее левое положение – «0 В».
7. Установите:
 - мультиметр 1 – режим измерения напряжения (режим $V - 2\text{ В}$, входы COM, $V\Omega$);
 - мультиметр 2 – режим измерения тока (режим $A - 200\text{ mA}$ при измерении прямого тока, входы COM, μA).
8. Включите моноблок кнопкой «Сеть» на левой боковой поверхности корпуса.
9. Ручкой регулировки напряжения «0...15 В» на регулируемом источнике напряжения постепенно увеличивайте напряжение на диоде. Проведите измерения тока в диапазоне до 50 мА. Особое внимание надо обратить на область $U < 0,5\text{ В}$. Результаты запишите в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Прямая ветвь ВАХ			Обратная ветвь ВАХ	
$U, \text{ В}$	$I, \text{ mA}$	$\ln I$	$U, \text{ В}$	$I, \text{ mA}$
...	...			
...	...			
...	...			
	50			

10. Выключите моноблок кнопкой «Сеть» на левой боковой поверхности корпуса.
11. Ручку регулировки напряжения «0...15 В» на регулируемом источнике напряжения установите в крайнее левое положение – «0 В».
12. Измените полярность подключения (рис. 5.7 – обратное включение). Для этого установите переключатель S1 в положение 1. Поскольку обратный ток составляет несколько мкА, диапазон миллиамперметра установить на 2 мА.

13. Диапазон измерения напряжения (мультиметр 1) установить 20 V.
14. Включите моноблок кнопкой «Сеть» на левой боковой поверхности корпуса.
15. Увеличивая напряжение на диоде ручкой регулировки напряжения «0...15 В», проведите измерения для значений напряжения от 0 до 15 В. Результаты запишите в табл. 5.1.
16. Выключите моноблок кнопкой «Сеть» на левой боковой поверхности корпуса.
17. Выберите кремневый диод для исследования. Для этого установите переключатель S2 в положение Si.
18. Повторите п. 5–15.

Задание 2. Изучение температурной зависимости тока дрейфа диода.

1. Выберите германиевый диод для исследования. Для этого установите переключатель S2 в положение Ge.
2. Соберите электрическую цепь по схеме, приведенной на панели моноблока и рис. 5.7 – обратное включение. Для этого установите переключатель S1 в положение 1. Мультиметр 1 используйте для измерения температуры, мультиметр 2 используйте для измерения тока.
3. Установите:
 - мультиметр 1 – режим измерения температуры (режим °С, кабель для измерения температуры из комплекта подключить к мини-модулю и к разъему мультиметра для измерения температуры, при этом следует соблюдать полярность подсоединения термопары к мультиметру («+» провода к «+» прибора);
 - мультиметр 2 – режим измерения тока (режим $A - 2\text{ mA}$, входы СОМ, тА).
4. Включите моноблок кнопкой «Сеть» на левой боковой поверхности корпуса.
5. Ручку регулировки напряжения «0...15 В» на регулируемом источнике напряжения установите в крайнее правое положение.
6. В табл. 5.2 запишите значение обратного тока при комнатной температуре.

7. Включить нагрев, для этого переведите тумблер S3 в положение «Вкл».
8. По мере роста температуры диода обратный ток через диод будет расти. Температуру и значение обратного тока необходимо записывать в табл. 5.2. Нагревать диод до температуры 70°C.

Таблица 5.2

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

9. Выключите моноблок кнопкой «Сеть» на левой боковой поверхности корпуса.
10. Выберите кремневый диод для исследования. Для этого установите переключатель S2 в положение Si.
11. Повторите п. 3–9.

4. Обработка результатов измерений

1. По экспериментальным данным (см. табл. 5.1) 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 первым способом. На прямой ветви ВАХ отметить точку, где начинается быстрый рост тока (см. рис. 5.4). Это напряжение соответствует контактной разности потенциалов U_k . Оценить ее погрешность.
3. Оценить U_k вторым способом.

Логарифмируя (5.3), получим выражение

$$\ln I = \ln I_{\text{дрейф}} + \frac{q}{kT} \cdot U. \quad (5.4)$$

То есть $\ln I$ пропорционален прямому напряжению U , если $U > U_k$.

Определить $\ln I$ и построить график зависимости логарифма силы тока $\ln I$ от прямого напряжения U (рис. 5.8). Убедиться, что в области напряжений $U > U_k$ между точками 1 и 2 зависимость ли-

нейная. Оценить нижнюю границу напряжения, при котором наблюдается отклонение от линейного закона. Эта граница соответствует контактной разности потенциалов p - n -перехода U_k .

4. Оценить контактную разность потенциалов третьим способом.

Логарифмируя выражение (5.1), получаем линейную зависимость $\ln I_{\text{дрейф}}$ от $1/T$:

$$\ln I_{\text{дрейф}} = \ln I_0 - \left(\frac{qU_k}{k} \right) \cdot \frac{1}{T}. \quad (5.5)$$

Построить график зависимости натурального логарифма $\ln I_{\text{дрейф}}$ от $1/T$ (см. табл. 5.2).

Построить на нем прямую наилучшего соответствия. Определить ее угловой коэффициент b , который должен быть равен из (5.5)

$$b = \frac{qU_k}{k}, \quad (5.6)$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Определить контактную разность потенциалов U_k из (5.6).

5. Сравнить U_k , полученную тремя разными способами, со справочным значением $U_k = 0.35 \pm 0.05$ В и сделать выводы.

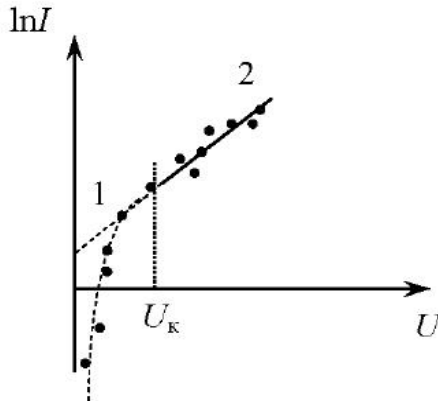


Рис. 5.8

Контрольные вопросы

1. Чем различаются полупроводники p - и n -типа?
2. Почему возникает разность потенциалов в области контакта полупроводников разного типа проводимости?
3. Назовите основные и неосновные носители заряда в полупроводниках: p -типа; n -типа.
4. От чего зависит ток дрейфа в области p - n -перехода?
5. Почему возникает диффузия основных носителей заряда в области p - n -перехода?
6. Какие существуют способы определения контактной разности потенциалов?
7. Почему p - n -переход пропускает ток в одном направлении и почти не пропускает ток в обратном?
8. Как соотносятся токи диффузии и дрейфа, если на диод не подано напряжение?

Лабораторная работа № 6.

Изучение зависимости сопротивления полупроводника от температуры

Цель: экспериментальное построение зависимостей сопротивления полупроводников от температуры, определение ширины запрещенной зоны и концентрации носителей для кремниевого и германиевого полупроводников.

Оборудование: учебный лабораторный стенд «Изучение зависимости сопротивления полупроводника от температуры. Определение ширины запрещенной зоны полупроводника».

1. Теоретические сведения

Полупроводники отличаются от металлов меньшей величиной удельной электропроводности при комнатной температуре, а также тем, что их электропроводность резко возрастает с повышением температуры (у металлов она при нагревании уменьшается). Полупроводники обладают высокой чувствительностью к содержанию примесей, к изменению температуры и давления, к воздействию различных излучений.

Электропроводность полупроводников хорошо объясняется зонной теорией твердого тела. В кристалле электронные энергетические уровни отдельных атомов образуют полосы (зоны) разрешенных значений энергий, разделенные запрещенными зонами. Схема энергетических зон химически чистого полупроводника, называемого «собственным», изображена на рис. 6.1.

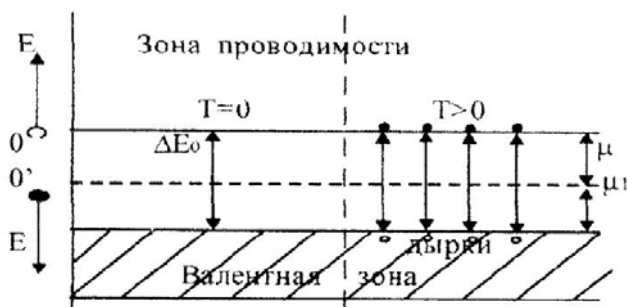


Рис. 6.1. Диаграмма энергетических зон собственного полупроводника

Все энергетические уровни в валентной зоне при $T=0\text{K}$ заняты электронами, а все уровни в зоне проводимости – свободны.

Ширина запрещенной зоны при 0 К называется энергией активации. Ширина запрещенной зоны является основным параметром, определяющим электрические свойства твердых тел. С увеличением температуры ширина запрещенной зоны уменьшается.

У полупроводников ширина запрещенной зоны мала, не превышает 1.5–2 эВ. Поэтому при любой температуре $T > 0$ К существует определенная вероятность теплового возбуждения электронов, вызывающего их переход из валентной зоны в зону проводимости (см. рис. 6.1). Одновременно в валентной зоне освобождаются валентные уровни – дырки. В собственных полупроводниках концентрация электронов в зоне проводимости равна концентрации дырок в валентной зоне. Движение электронов и дырок в зонах описывается законами квантовой механики. Анализ их поведения внутри разрешенных энергетических зон показывает, что электроны и дырки проводимости являются квазичастицами, введение которых упрощает описание свойств твердых тел в зонной теории.

Число электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне собственного полупроводника значительно меньше числа квантовых состояний, содержащихся в этих зонах. Поэтому функция распределения $f(E)$, определяющая вероятность того, что состояние с энергией E занято электроном при данной температуре T , значительно меньше единицы.

$$f(E) \ll 1. \quad (6.1)$$

Полупроводники, у которых электронный газ в зоне проводимости и дырочный газ в валентной зоне удовлетворяют условию (6.1), называются невырожденными. В этом случае распределение Ферми–Дирака переходит в классическое распределение Максвелла–Больцмана:

$$f(E) = e^{\frac{\mu}{kT}} e^{\frac{E}{kT}} = A e^{\frac{E}{kT}}, \quad (6.2)$$

где μ – энергия Ферми (или химический потенциал), определяющая приращение энергии системы частиц при увеличении числа частиц на единицу; k – постоянная Больцмана, равная $1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Чтобы найти зависимость электропроводности полупроводников от температуры, нужно, прежде всего, определить концентрацию свободных носителей, способных участвовать в процессе проводимости. Число квантовых состояний $z(E)dE$, заключенное в интервале dE :

$$z(E)dE = \frac{4\pi V(2m)^{3/2} E^{1/2}}{h^3} dE. \quad (6.3)$$

Для вычисления равновесной концентрации носителей заряда в зоне проводимости и в валентной зоне нужно найти число частиц dn в единице объема полупроводника в интервале энергии, заключенном между E и $(E+dE)$: $dn(E) = z(e)f(E)dE$, а затем проинтегрировать по всем значениям энергии, которые доступны частицам, т. е. от 0 до ∞ . Принимая за начало отсчета энергии электронов дно зоны проводимости, получим:

$$N_n = \int_0^{\infty} dn(E) = \frac{4\pi(\alpha m^*)}{h^3} e^{\frac{\mu}{kT}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{E}{kT}} E^{1/2} dE. \quad (6.4)$$

Принимая во внимание, что

$$\int_0^{\infty} e^{-\frac{E}{kT}} E^{1/2} dE = \frac{\sqrt{\pi}}{2} (kT)^{3/2}, \quad (6.5)$$

подставим это значение в формулу (6.4) и найдем число электронов проводимости:

$$N_n = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{\frac{\mu}{kT}}. \quad (6.6)$$

Принимая за начало отсчета энергии дырок потолок валентной зоны и проводя аналогичные расчеты, получим, что число дырок:

$$N_p = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{\frac{\mu}{kT}}. \quad (6.7)$$

В эти выражения входят эффективные массы электронов и дырок m_n^* и m_p^* . На зонной схеме (см. рис. 6.1) μ – расстояние от равновесного уровня Ферми до дна зоны проводимости, а μ' – расстояние от равновесного уровня Ферми до потолка валентной зоны. Если за нуль отсчета энергии для электронов и дырок принять дно зоны проводимости, то, как видно на рисунке,

$$\mu + \mu' = -\Delta E \quad \text{и} \quad \mu' = -\Delta E - \mu.$$

Так как в собственных полупроводниках носители тока возбуждаются всегда парами, то $N_n = N_p$. На основании этого получим равенство:

$$(m_n^*)^{3/2} e^{\frac{\mu}{kT}} = (m_p^*)^{3/2} e^{\frac{-E+\mu}{kT}}. \quad (6.8)$$

Логарифмируя (6.8) и произведя элементарные преобразования, получим:

$$\mu = -\frac{\Delta E_0}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p^*}{m_n^*}. \quad (6.9)$$

При $T=0\text{K}$ уровень Ферми в собственных полупроводниках лежит в середине запрещенной зоны. Подставив (6.9) в формулы (6.6) и (6.7), получим:

$$N_n \approx N_p = \frac{2 \left(2\pi \sqrt{m_n^* m_p^*} kT \right)^{\frac{-\Delta E}{2kT}}}{h^3}. \quad (6.10)$$

При $T=300\text{K}$ ширина запрещенной зоны германия 0.72 эВ, кремния 1.12 эВ. Собственная концентрация носителей заряда при этой температуре в германии $2.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, в кремнии $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Из общих представлений о механизме электрического тока для удельной электропроводности собственных полупроводников можно получить выражение:

$$\sigma = en(U_n + U_p), \quad (6.11)$$

где U_n , U_p – подвижность электронов и дырок; e – величина заряда электрона.

Подвижность носителей заряда U численно равна скорости носителей, приобретаемой ими под действием электрического поля единичной напряженности. Величина подвижности зависит от температуры и механизма рассеяния носителей заряда в полупроводнике. Последний определяется типом химической связи кристаллической решетки, наличием примесей и упругих кристаллических дефектов полупроводника. Для собственных полупроводников теоретические расчеты дают:

$$U_n = \alpha_n n T^{-\frac{3}{2}} \text{ и } U_p = \alpha_p p T^{-\frac{3}{2}},$$

где α_n и α_p – экспериментально определяемые константы.

Подставив значения n , U_n , U_p в формулу (6.11) и обозначив через σ_0 выражение, стоящее перед экспонентой и не зависящее от температуры, получим:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{-\Delta E}{2kT}}. \quad (6.12)$$

Сопротивление проводника определяется формулой:
 $R = \rho \frac{l}{S}$. Подставляя значение σ из формулы (6.12), найдем:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E_0}{2kT}}, \text{ где } R_0 = \frac{1}{\sigma_0 S}. \quad (6.13)$$

Формула (6.13) лежит в основе одного из методов определения ширины запрещенной зоны полупроводников. Логарифмируя (6.13), находим:

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E_0}{2kT}.$$

Экспериментальную зависимость сопротивления от температуры удобно изображать графически в координатах $\ln R$ и $1/T$. График представляет собой прямую линию, тангенс угла наклона которой к оси $1/T$ равен:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\ln R(T_2) - \ln R(T_1)}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = \frac{\Delta E_0}{2k},$$

откуда определяем энергию активации:

$$\Delta E_0 = 2k \operatorname{tg} \alpha. \quad (6.14)$$

2. Описание экспериментальной установки

Лабораторная установка конструктивно выполнена в идеологии единой модульной конструкции, состоящей из единого блока, содержащего объекты исследования – два образца легированного полупроводникового материала (кремний Si и германий Ge), микропроцессорной системы автоматизации эксперимента, безопасной системы нагрева и охлаждения образцов, исключаяющей возможности обучающихся прикоснуться к опасно нагретым частям лабораторной установки, а также все устройства и источники питания, необходимые для выполнения цикла лабораторных заданий.

Управление установкой осуществляется с помощью регулятора, установленного на лицевой панели управления лабораторного стенда. Установка снабжена микропроцессорной системой управления, контроля и измерения необходимых параметров. Все необходимые экспериментальные данные выводятся на экран передней панели установки, а также посредством USB соединения и ориги-

нальной управляющей программы на внешний персональный компьютер.

На правой боковой поверхности лабораторного стенда расположен вентилятор устройства охлаждения образцов, на левой боковой поверхности – патрон плавкого предохранителя и разъем подключения кабеля электропитания.

Питание лабораторного стенда осуществляется от однофазной сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц посредством подключения кабеля электропитания к стандартной розетке EURO с заземленным центральным электродом.

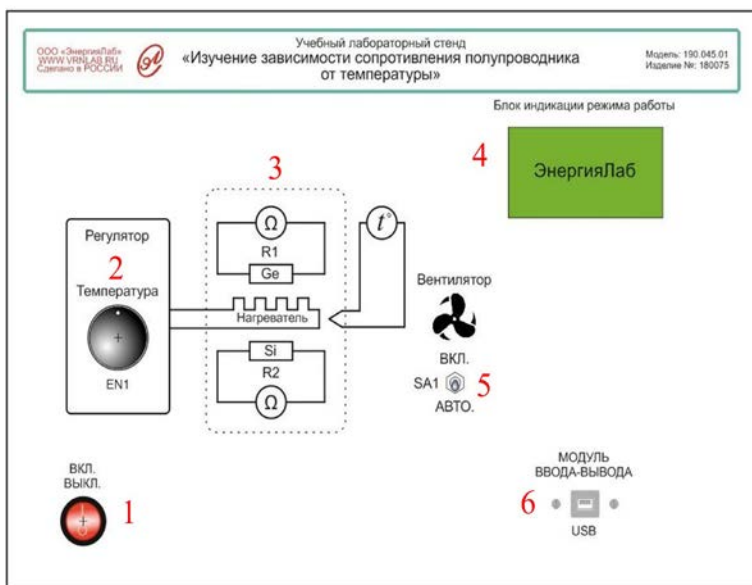


Рис. 6.2. Внешний вид лабораторного стенда «Изучение зависимости сопротивления полупроводника от температуры»

Цифрами обозначены:

1. Переключатель электропитания лабораторного стенда. В верхнем положении переключателя сетевое электропитание стенда включено, в нижнем – выключено.
2. Цифровой многооборотный регулятор (энкодер) EN1.
3. «Температура» установки требуемой температуры нагрева образца. Нагрев осуществляется встроенным нагревателем, причем текущая температура образцов и относительная

мощность нагревателя (в % от максимальной) выводится на экран установки. Вследствие тепловой инерции время нагрева образца до заданной температуры может достигать двух минут.

4. Схема экспериментальной цепи.
5. Многофункциональный индикатор информационно-измерительной системы лабораторного стенда.

На экран выводится:

- а) «Температура ___ °С» – текущая температура нагрева образцов;
 - б) «R1(Ge)___Ом» – текущая величина сопротивления образца из легированного германия;
 - в) «R1(Si)___Ом» – текущая величина сопротивления образца из легированного кремния;
 - г) «Мощность _____%» – текущая относительная мощность нагревателя в процентах от максимальной;
 - д) «Регулятор _____ °С» – величина требуемой температуры нагрева экспериментальных образцов, устанавливается с помощью регулятора «Температура».
6. Переключатель «SA1» установки режима работы вентилятора охлаждения образцов. В нижнем положении «Авто» вентилятор включается в случае, когда температура образцов превышает температуру, заданную регулятором. В верхнем положении «Вкл» вентилятор постоянно включен.
- Данный режим используется при необходимости быстрого охлаждения образцов для проведения серии экспериментов. Во время проведения лабораторных заданий рекомендуется установить переключатель в нижнее положение «Авто».
7. Разъем USB «Модуль ввода-вывода» для подключения внешнего компьютера с управляющей программой для автоматической обработки результатов эксперимента.

3. Выполнение лабораторной работы

Лабораторный стенд должен располагаться на ровной поверхности лабораторного стола. Размеры лабораторного стола должны обеспечивать свободный доступ студентов к передней панели лабораторного стенда.

Подключить кабель электропитания лабораторного стенда к стандартной сетевой электророзетке (220 В, 50 Гц) стандарта EURO с заземленным центральным электродом.

Примечание: с целью повышения наглядности проведения экспериментов конструкцией лабораторной установки предусмотрена возможность подключения внешнего компьютера с последующей визуализацией экспериментальных данных с помощью оригинальной управляющей программы. Обмен информацией компьютера и лабораторного стенда осуществляется с помощью USB кабеля, подключаемого к разьему «Модуль ввода-вывода» (6 рис. 6.2).

Установить в верхнее положение переключатель электропитания лабораторной установки (1 рис. 6.2), при этом должен начать светиться экран установки (4 рис. 6.2). После заставки приветствия на экран лабораторной установки в реальном масштабе времени будут выводиться экспериментальные данные:

а) «Температура ___ °С» – текущая температура нагрева образцов;

б) «R1(Ge)___ Ом» – текущая величина сопротивления образца из легированного германия;

в) «R1(Si)___ Ом» – текущая величина сопротивления образца из легированного кремния;

г) «Мощность _____%» – текущая относительная мощность нагревателя в процентах от максимальной;

д) «Регулятор _____ °С» – величина требуемой температуры нагрева экспериментальных образцов, устанавливается с помощью регулятора «Температура».

Установить в нижнее положение «Авто» переключатель SA1 (5 рис. 6.2) управления вентилятором охлаждения установки.

Выполнение экспериментальных исследований

Плавно поворачивая по часовой стрелке регулятор «Температура» (2 рис. 6.2) и наблюдая за показаниями экрана «Регулятор», установить температуру 30 °С. Далее наблюдать за показаниями экрана «Температура». При достижении образцом заданной температуры занести значения сопротивления образцов в табл. 6.1 и 6.2.

Провести экспериментальные измерения сопротивления образцов в диапазоне температур от 30 до 70 °С с шагом 10 °С. Экспериментальные данные занести в табл. 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1. Экспериментальная зависимость сопротивления образца из кремния (Si) от температуры

Температура образца, t °C	T , К	$1/T$	R , Ом	$\ln R$
30				
40				
50				
60				
70				

Таблица 6.2. Экспериментальная зависимость сопротивления образца из германия (Ge) от температуры

Температура образца, t °C	T , К	$1/T$	R , Ом	$\ln R$
30				
40				
50				
60				
70				

- Для каждого экспериментального образца построить графические зависимости $R = f(T)$ и $\ln R = f(1/T)$.
- По графику $\ln R = f(1/T)$ определить ширину запрещенной зоны образца полупроводника E_0 по формуле (6.14), определяя $t_{\text{га}}$ из экспериментального графика.
- По формуле (6.9) рассчитать величину энергии Ферми для данного полупроводника при комнатной температуре. Так как при этой температуре

$$\frac{\Delta E}{2} \gg \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p^*}{m_n^*},$$

то вторым слагаемым можно пренебречь, считая что

$$\mu \approx -\frac{\Delta E_0}{2}.$$

- По формуле (6.6) найти концентрацию электронов в зоне проводимости при комнатной температуре, для простоты считая $m_n^* = m_e$, где m_e – масса покоя электрона.
- Сделать соответствующие выводы и занести их в отчет.

Лабораторная работа № 7. Изучение явления гистерезиса

Цель: определение основных характеристик ферромагнетика и потерь энергии при перемагничивании ферромагнетика.

Оборудование: лабораторный стенд «Изучение явления гистерезиса ферромагнетиков», осциллограф.

1. Теоретические сведения

Ферромагнитные материалы часто применяются в трансформаторах, дросселях, машинах переменного тока; в радиоэлектронике, где они подвергаются периодическому перемагничиванию. Изучение магнитных характеристик ферромагнетиков в переменных полях представляет большой практический интерес. Характерной особенностью ферромагнетиков является нелинейная зависимость между магнитной индукцией B и напряженностью намагничивающего поля H .

Такая зависимость для предварительно размагниченого ферромагнетика дана на рис. 7.1 кривой $0-1$. Она называется основной или *начальной кривой намагничивания*. Если теперь начать уменьшать напряженность H намагничивающего поля, то зависимость B от H будет представлена кривой $1-2$. Происходит отставание изменения индукции от изменения напряженности поля. Это явление называется магнитным гистерезисом.

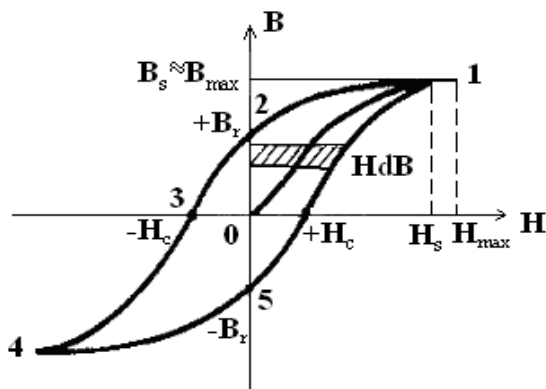


Рис. 7.1. Зависимость между индукцией B и напряженностью H магнитного поля в ферромагнетике

При $H = 0$ намагничивание не исчезает и характеризуется величиной остаточной магнитной индукции B_r . Для размагничивания ферромагнетика нужно создать магнитное поле противоположного направления. При увеличении напряженности этого поля от нуля изменение индукции изобразится кривой 2-3. Напряженность поля H_c , при которой индукция магнитного поля становится равной нулю, называется коэрцитивной (задерживающей) силой. При дальнейшем изменении напряженности поля в обратном направлении индукция будет изменяться в соответствии с кривой 3-4.

В переменном по величине и направлению магнитном поле магнитная индукция изменяется в соответствии с кривой 1-2-3-4-5-1, которая называется *петлей гистерезиса*. Если амплитудное значение напряженности переменного намагничивающего поля равно или превышает напряженность поля, намагничивающего ферромагнетик до насыщения ($H_{\max} \geq H_s$), то петля гистерезиса называется максимальной. При $H_{\max} \leq H_s$ насыщение не достигается, получают частные петли гистерезиса, лежащие внутри максимальной петли. В связи с неоднозначной зависимостью B от H понятие магнитной проницаемости μ можно применять лишь к основной кривой намагничивания. Относительная магнитная проницаемость является функцией напряженности поля.

Ферромагнетизм обусловлен спиновыми магнитными моментами электронов. В атомах ферромагнетика спины определенной группы электронов ($3d$ -электронов в металлах группы железа и $4f$ -электронов в редкоземельных металлах) не скомпенсированы. Благодаря этому спиновые магнитные моменты атомов достигают значительной величины. В отсутствие внешнего поля ферромагнетик состоит из большого числа малых (но макроскопических) областей спонтанного намагничивания – доменов. В пределах каждого домена магнитные моменты атомов строго ориентированы. При отсутствии внешнего магнитного поля полный магнитный поток ферромагнетика равен нулю. В достаточно сильных магнитных полях магнитные моменты всех доменов устанавливаются по полю. В этом состоянии ферромагнетик намагничен до насыщения. При перемагничивании ферромагнетика происходит изменение его доменной структуры. Работа, необходимая для этого, совершается за счет энергии внешнего магнитного поля. Образец при перемаг-

ничивании нагревается, и тем сильнее, чем больше площадь петли гистерезиса (потери энергии на гистерезис).

Элементарная работа, необходимая для перемагничивания единицы объема образца $dA_{\text{ед.об.}} = \vec{B}d\vec{H}$, равна площади заштрихованной полоски на рис. 7.1. Тогда полная энергия, теряемая за один цикл перемагничивания образца и рассчитанная на единицу его объема, численно равна площади петли гистерезиса:

$$A_{\text{ед.об.}} = \oint \vec{B}d\vec{H} . \quad (7.1)$$

2. Описание экспериментальной установки

Внешний вид экспериментальной установки изображен на рис. 7.2.

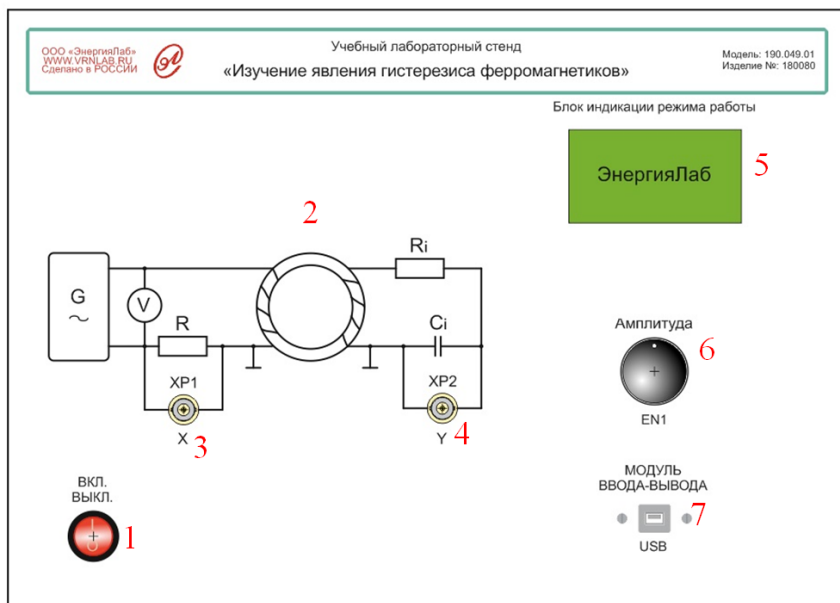


Рис. 7.2. Внешний вид лабораторного стенда «Изучение явления гистерезиса ферромагнетиков»

Здесь цифрами обозначены:

1. Переключатель электропитания лабораторного стенда. В верхнем положении переключателя сетевое электропитание стенда включено, в нижнем – выключено.

2. Схема экспериментальной цепи.
3. Разъем ХР1 подключения канала «Х» внешнего осциллографа.
4. Разъем ХР2 подключения канала «У» внешнего осциллографа.
5. Многофункциональный индикатор информационно-измерительной системы лабораторного стенда.
6. Цифровой многооборотный регулятор (энкодер) EN1 «Амплитуда» установки требуемой амплитуды опорного сигнала. При повороте регулятора шаг перестройки амплитуды составляет 0,1 В, при одновременном нажатии и повороте – 0,5 В.

7. Технологический разъем USB, применяемый для обновления версии программного обеспечения лабораторного стенда. В процессе выполнения лабораторных заданий не используется.

Лабораторная установка конструктивно выполнена в идеологии единой модульной конструкции, состоящей из единого блока, содержащего объект исследования – модель магнитомягкого материала (сплав феррита ZnO никель цинковый), специализированный цифровой генератор опорного сигнала частотой 1 кГц с возможностью оперативной регулировки уровня сигнала, все согласующие устройства и источники питания, необходимые для выполнения цикла лабораторных заданий.

Управление установкой осуществляется с помощью регулятора, установленного на лицевой панели управления лабораторного стенда. Установка снабжена микропроцессорной системой управления, контроля и измерения необходимых параметров. Для визуализации петли гистерезиса используется осциллограф учебный ОСУ-10.

Питание лабораторного стенда осуществляется от однофазной сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц посредством подключения кабеля электропитания к стандартной розетке EURO с заземленным центральным электродом.

Схема установки представлена на рис. 7.3. Петля гистерезиса наблюдается на экране электронного осциллографа (ЭО) (рис. 7.3).

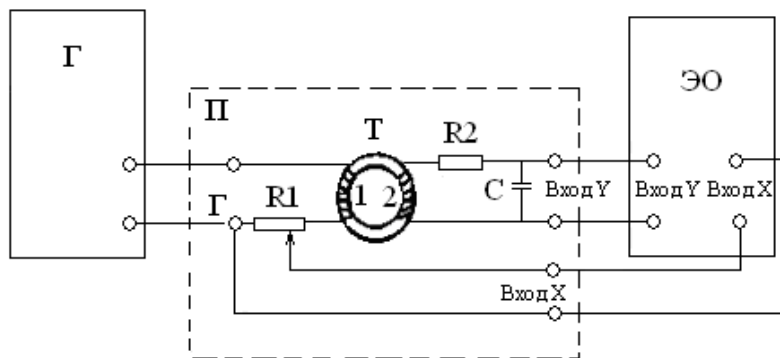


Рис. 7.3. Схема экспериментальной цепи

На панели П укреплены исследуемый образец Т с двумя обмотками сопротивления и конденсатор. Г – генератор переменного напряжения синусоидальной формы. Чтобы получить на экране ЭО петлю гистерезиса, нужно на его «Вход X» подать сигнал, пропорциональный напряженности H намагничивающего поля, а на «Вход Y» – сигнал, пропорциональный магнитной индукции B в образце.

Исследуемый образец выполнен в виде тороида, на поверхности которого намотаны две обмотки 1 и 2 с числом витков N_1 и N_2 соответственно. Обмотка 1 через потенциометр R_1 с сопротивлением R_1 соединена с выходом генератора Г. Средняя напряженность намагничивающего поля в тороиде

$$H = \frac{N_1}{l} I_1. \quad (7.2)$$

Здесь $l = 2\pi(r_1 + r_2)/2 = \pi(r_1 + r_2)$ – длина средней линии тороида; r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы тороида; I_1 – сила тока в первичной обмотке 1.

На «Вход X» ЭО подается напряжение U_1 , величина которого регулируется управляемым генератором. Напряжение U_1 пропорционально силе тока I_1 : $U_1 = I_1 R_1'$, где R_1' – сопротивление части потенциометра, напряжение с которой подается на «Вход X» ЭО. Выразив I_1 из формулы (7.2), получим

$$U_1 = \frac{l R_1'}{N_1} H. \quad (7.3)$$

Так как в обмотке 1 тороида протекает переменный ток, то напряженность намагничивающего поля будет изменяться в некотором интервале значений. При этом во вторичной обмотке 2 будет возбуждаться э.д.с. индукции:

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt},$$

где Φ – поток вектора магнитной индукции через сечение тороида S . Ввиду того, что напряжение на вторичной обмотке пропорционально не B , а dB/dt , между вторичной обмоткой и «Входом Y » осциллографа включают дополнительное интегрирующее звено, состоящее из резистора R_2 с большим сопротивлением, где I_2 – сила тока во вторичной обмотке R_2 , и конденсатора с большой емкостью C . Пренебрегая падением напряжения на вторичной обмотке, получим $\mathcal{E}_2 = I_2 R_2 + U_2$, где I_2 – сила тока во вторичной обмотке; U_2 – напряжение на конденсаторе C . Если $I_2 R_2 \gg U_2$, то

$$I_2 \cong \frac{\mathcal{E}_2}{R_2} = \frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt}. \quad (7.4)$$

Мгновенное значение падения напряжения на конденсаторе с учетом (7.4) равно

$$U_2 = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{N_2 S}{R_2 C} \int \frac{dB}{dt} dt = \frac{N_2 S}{R_2 C} B,$$

откуда

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_2. \quad (7.5)$$

Из формул (7.3) и (7.5) видно, что напряжение U_1 пропорционально напряженности намагничивающего поля H ; а напряжение U_2 пропорционально индукции B магнитного поля в образце. Если напряжение U_1 подать на горизонтально отклоняющие пластины («Вход X ») ЭО, а напряжение U_2 на вертикально отклоняющие пластины («Вход Y »), то электронный луч в направлении оси X будет отклоняться пропорционально H , а в направлении оси Y – пропорционально B :

$$H = A_x X, \quad (7.6)$$

$$B = A_y Y, \quad (7.7)$$

где A_x и A_y – коэффициенты пропорциональности. За полный цикл изменения H луч опишет замкнутую петлю гистерезиса.

Для определения величины напряженности H намагничивающего поля следует измерить силу тока I_1 в первичной обмотке. Вольтметр на панели лабораторной установки измеряет эффективное значение выходного напряжения: $U = U_a / \sqrt{2}$. Поэтому

$$I_{1a} = \frac{\sqrt{2}U}{R_1}, \quad (7.8)$$

где I_{1a} – амплитудное значение силы тока в первичной обмотке; R_1 – сопротивление резистора $R1$. (Сопротивлением первичной обмотки можно пренебречь по сравнению с R_1 .) Из формул (7.2) и (7.8) получаем рабочую формулу для определения амплитудного значения напряженности намагничивающего поля:

$$H_{\max} = \frac{N_1}{l} I_{1a} = \frac{\sqrt{2}N_1}{\pi(r_1 + r_2)R_1} U. \quad (7.9)$$

Индукция магнитного поля B определяется по формуле (7.5). Напряжение U_2 , входящее в эту формулу, измеряется с помощью ЭО с калиброванным усилителем вертикального отклонения луча: $U_2 = K \cdot Y$, где K – коэффициент вертикального отклонения, имеющий смысл цены деления вертикальной шкалы осциллографа («Вольт/дел.»); Y – отклонение луча по вертикали, выраженное в больших делениях шкалы.

3. Выполнение лабораторной работы

Лабораторный стенд должен располагаться на ровной поверхности лабораторного стола. Справа от лабораторной установки расположить осциллограф. Размеры лабораторного стола должны обеспечивать свободный доступ обучающихся к передней панели лабораторного стенда и органам управления осциллографа.

- Подключить кабели электропитания лабораторного стенда и осциллографа к стандартным сетевым электророзеткам (220 В, 50 Гц) стандарта EURO с заземленным центральным электродом.
- Коаксиальным кабелем соединить разъем XP1 (3 рис. 7.2) с контактом входа «X» осциллографа.
- Коаксиальным кабелем соединить разъем XP2 (4 рис. 7.2) с контактом входа «Y» осциллографа.
- Установить режим «X-Y» развертки осциллографа.

- Включить электропитание лабораторного стенда и осциллографа. Выждать около одной минуты для прогрева приборов.

Задание № 1. Определение магнитных характеристик ферромагнетика по предельной петле гистерезиса.

1. Наблюдая за показаниями экрана (5 рис. 7.2) лабораторной установки, плавно поворачивая регулятор «Амплитуда» (6 рис. 7.2) по часовой стрелке, установить выходное напряжение генератора равным 10 В.

2. После появления на экране ЭО петли гистерезиса добиться, чтобы петля имела участок насыщения. Петля должна быть расположена симметрично относительно центра экрана и занимать его большую часть. Размер петли по вертикали изменяется с помощью переключателя «Вольт/дел.», размер петли по горизонтали регулируется с помощью регулятора «Амплитуда» (6 рис. 7.2).

3. Вычислить по формуле (9) значение H_{\max} и занести результат в табл. 7.1.

$N_1 = 1500$ витков; $N_2 = 1000$ витков; $R_1 = 1$ Ом ; $R_2 = 1$ кОм; $C = 0,1$ мкФ; $r_1 = 4$ мм; $r_2 = 5$ мм.

Таблица 7.1

$U, \text{В}$	$H_{\max}, \text{А/м}$	$ee', \text{ дел.}$	$dd', \text{ дел.}$	$cc', \text{ дел.}$	$H_S, \text{А/м}$	$H_C, \text{А/м}$
...
...

4. Измерить по горизонтальной шкале экрана ЭО длины отрезков ee' , dd' , cc' (рис. 7.4) и занести результаты в табл. 7.1. (Длины отрезков выразить в больших делениях шкалы с точностью до десятых долей деления.) Из формулы (7.6) и рис. 7.4 следует, что

$$H_S = H_{\max} \frac{dd'}{ee'}$$

$$H_C = H_{\max} \frac{cc'}{ee'}$$

4. Вычислить значения H_S и H_C и занести их в табл. 7.1.

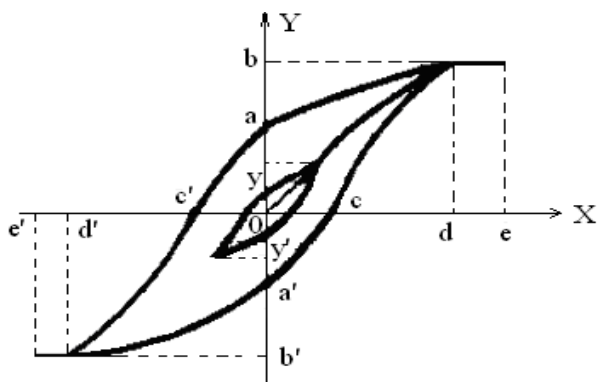


Рис. 7.4. К измерению параметров петли гистерезиса

5. Для определения B_r и B_s измерить по вертикальной шкале экрана ЭО длины отрезков aa' и bb' (см. рис. 7.4). Выразить их в больших делениях шкалы с учетом десятых долей деления. В табл. 7.2 занести также значение коэффициента вертикального отклонения K , который задается с помощью переключателя «Вольт/дел.».

6. Вычислить остаточную магнитную индукцию B_r , используя формулу (7.5):

$$B_r = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{2r}.$$

Здесь S – площадь поперечного сечения образца,
 $U_{2r} = KY_r = K \frac{aa'}{2}$.

7. Значение B_r занести в табл. 7.2.

Таблица 7.2

К, В/дел.	aa' , делен.	U_{2r} , В	B_r , Тл	bb' , дел.	B_s , Тл

Вычислить индукцию насыщения B_s . Из формулы (7.7) и рис. 7.4 следует, что $B_s = B_r \frac{bb'}{aa'}$.

Задание № 2. Снятие основной кривой намагничивания.

1. Наблюдая за показаниями экрана (5 рис. 7.2) лабораторной установки, плавно поворачивая регулятор «Амплитуда» (6 рис. 7.2) против часовой стрелки, установить выходное напряжение генератора равным 0.1 В, при этом петля гистерезиса на экране стянется в точку.

2. Наблюдая за показаниями экрана (5 рис. 7.2) лабораторной установки, плавно поворачивая регулятор «Амплитуда» (6 рис. 7.1) по часовой стрелке, установить выходное напряжение генератора равным 1 В.

3. Измерить по вертикальной шкале экрана ЭО длину отрезка yy' (см. рис. 7.4), т.е. вертикальный размер частной петли гистерезиса. При этом удобно сдвинуть петлю таким образом, чтобы нижняя ее вершина лежала на одной из горизонтальных линий сетки, а верхняя – на вертикальной шкале экрана ЭО. Длину отрезка yy' выразить в больших делениях вертикальной шкалы с учетом десятых долей деления. В табл. 7.3 записать значение U (для вычисления напряженности H намагничивающего поля), а также значение коэффициента вертикального отклонения K и длину отрезка yy' (для вычисления индукции магнитного поля B).

Таблица 7.3

Определение H		Определение B		
$U, В$	$H, А/м$	$K, В/дел.$	$yy', дел.$	$B, Тл$
1,0				
2,0				
3,0				
4,0				
5,0				
6,0				
7,0				
8,0				
9,0				
10,0				

4. Увеличивая выходное напряжение генератора от 1 до 10 В через 1 В, выполнить каждый раз измерения yy' .

Задание № 3. Определение потерь энергии при перемагничивании ферромагнетика.

Выполняется на основе измерений заданий № 1 и № 2.

1.1. Вычислить погрешности измерения H_{\max} , H_C , H_S , B_r , B_S как погрешности косвенных измерений. Например, относительная погрешность измерения B_r вычисляется по формуле:

$$\frac{\Delta B_r}{B_r} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)^2 + \frac{\Delta r_1^2 + \Delta r_2^2}{(r_2 - r_1)^2} + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{2r}}{U_{2r}}\right)^2}.$$

Относительная погрешность измерения U , связанная с классом точности осциллографа, составляет 10%. Погрешности измерения остальных величин указаны на установке.

1.2. Сравнить полученные значения магнитных характеристик с табличными данными и определить, к какому классу материалов относится исследуемый ферромагнетик:

– *магнитно-жесткие материалы*: $H_C = 4 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^5$ А/м,
 $B_r = 0,4 \div 1,3$ Тл;

– *магнитно-мягкие материалы*: $H_C = 0,4 \div 110$ А/м,
 $B_S = 0,04 \div 0,8$ Тл.

2. Вычислить амплитудные значения напряженности H намагничивающего поля для частных петель гистерезиса по формуле (7.9) и результаты занести в табл. 7.3.

2.1. Вычислить значения индукции магнитного поля B для вершин частных потерь, гистерезиса, используя формулу (7.5):

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_2 = \frac{R_2 C}{N_2 (r_2 - r_1) h} K \frac{yy'}{2}.$$

Результаты занести в табл. 7.3.

2.2. Построить график зависимости $B = B(H)$ – основную кривую намагничивания, экстраполируя ее до начала координат (см. кривую θ - I на рис. 7.1).

2.3. По графику зависимости $B = B(H)$ найти значения B , соответствующие шести-семи значениям H с интервалом 20–30 А/м. Эти значения H и B занести в табл. 7.4. Вычислить магнитную проницаемость μ : $\mu = B/(\mu_0 H)$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

2.4. Построить график зависимости $\mu = \mu(H)$. Сделать вывод о зависимости магнитной проницаемости μ ферромагнетика от напряженности намагничивающего поля.

Таблица 7.4

$H, \text{А/м}$										
$B, \text{Тл}$										
μ										

3. Энергия $A_{\text{ед.об}}$, теряемая в единице объема ферромагнитного образца за один цикл перемагничивания, определяется уравнением (7.1). Если частота генератора ν , то энергия, теряемая за одну секунду в единице объема,

$$Q = \nu \cdot \int HdB.$$

Подставляя $H = A_x X$ (7.6) и $B = A_y Y$ (7.7), получим

$$Q = \nu A_x A_y \int XdY = \nu A_x A_y \sigma, \quad (7.10)$$

где $\sigma = \int XdY$ представляет собой площадь петли гистерезиса. Она может быть определена графически как число клеток шкалы экрана ЭО, ограниченных петлей. Для определения Q необходимо произвести следующие действия.

3.1. По результатам измерений, выполненных в задании 1, построить предельную петлю гистерезиса, для чего на листе миллиметровой бумаги построить координатную сетку, аналогичную шкале ЭО с одинаковым размером делений по горизонтали и вертикали (по горизонтали 10 делений, по вертикали – 6). От начала координат отложить отрезки $oc = oc' = cc' / 2$ и отрезки $oa = oa' = aa' / 2$, отметив точки петли c, c' и a, a' (см. рис. 7.4). По координатам $X = \pm dd' / 2$ и $Y = \pm bb' / 2$ найти положение вершин предельной петли гистерезиса. Через отмеченные точки провести петлю гистерезиса.

3.2. Подсчитать число клеток σ координатной сетки, ограниченной петлей.

3.3. Вычислить значения коэффициентов A_x и A_y , используя данные табл. 7.1 и 7.2:

$$A_x = \frac{H_{\text{max}}}{ee'} 2, \quad A_y = \frac{B_r}{aa'} 2.$$

3.4. Зная частоту ν генератора, A_x, A_y и σ , вычислить по формуле (7.10) энергию Q , теряемую в 1 м^3 ферромагнетика за одну секунду.

Лабораторная работа № 8. Изучение эффекта Холла в полупроводниках

Цель: изучение зависимости индукции магнитного поля соленоида от тока соленоида, а также напряжения и тока датчика Холла от индукции магнитного поля соленоида.

Оборудование: учебный лабораторный стенд «Изучение эффекта Холла в полупроводниках».

1. Теоретические сведения

Для количественной характеристики электрического тока в проводниках вводятся понятия силы тока \vec{I} и плотности тока \vec{j} . При равномерном распределении плотности тока по сечению проводника плотность тока

$$\vec{j} = \frac{\vec{I}}{S} = en\vec{v}, \quad (8.1)$$

где S – площадь поперечного сечения проводника; e – заряд носителей тока; n – их концентрация; \vec{v} – средняя скорость направленного движения подвижных носителей (дрейфовая скорость).

Плотность тока \vec{j} в каждой точке проводника связана с напряженностью электрического поля \vec{E} в этой точке законом Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E}, \quad (8.2)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника.

Для однородного проводника длиной l :

$$\rho = \frac{rS}{l}, \quad (8.3)$$

где r – сопротивление этого проводника.

Если по проводнику идет ток, то на каждый подвижный носитель действуют сила со стороны электрического поля $F_{эл} \sim E$ и сила трения $F_{тр} \sim v$. При стационарном движении носителя (с постоянной скоростью \vec{v}) $F_{эл} = F_{тр}$ и, следовательно, $\vec{v} \sim \vec{E}$. Коэффициент пропорциональности в этой зависимости называется подвижностью μ , т. е.

$$\vec{v} = \mu \vec{E}. \quad (8.4)$$

Из соотношений (8.1), (8.2), (8.4) следует, что

$$\mu = \frac{1}{\rho n e}. \quad (8.5)$$

Важнейшее применение находит теория электрического сопротивления полупроводников и металлов. К полупроводникам принято относить твердые вещества с удельным сопротивлением $\rho \sim (10^{-6} \div 10^8)$ Ом·м. У металлов при комнатной температуре $\rho \sim (10^{-8} \div 10^{-6})$ Ом·м.

Таблица 8.1. **Характерные значения концентрации n и подвижности μ носителей тока в полупроводниках и металлах**

Тип твердого тела	Удельное сопротивление ρ , Ом·м	Концентрация подвижных носителей n , м ⁻³	Подвижность носителей тока μ , м ² /В·с
Полупроводники	$10^{-6} \div 10^8$	$10^{19} \div 10^{25}$	$10^{-4} \div 10^1$
Металлы	$10^{-8} \div 10^{-6}$	$10^{28} \div 10^{29}$	$10^{-4} \div 10^{-3}$

Следует отметить, что значения подвижностей тока в полупроводниках могут превышать подвижности электронов в металлах. Значительная разница удельных сопротивлений полупроводников и металлов обусловлена существенным различием в значениях концентрации свободных носителей заряда (см. формулу (8.5)). Во всех полупроводниках и металлах наблюдается эффект Холла, который является одним из наиболее эффективных современных методов измерения характеристик носителей тока в этих веществах.

Если проводящий образец в виде прямоугольной пластины толщиной d , шириной a и длиной l поместить в магнитное поле с индукцией B и пропустить по нему ток с силой I , как показано на рис. 8.2, то в нем появится разность потенциалов:

$$U_x = R \frac{IB}{d}, \quad (8.6)$$

где R – постоянная Холла. Этот эффект обусловлен силой Лоренца, которая действует со стороны магнитного поля на подвижные носители тока, дрейфующие в электрическом поле со скоростью v . При этом направление этой силы не зависит от знака заряда носителей, что позволяет по знаку холловской разности потенциалов установить знак носителей тока.

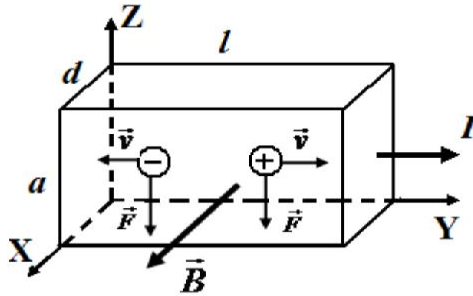


Рис. 8.1. Эффект Холла в полупроводнике

При изменении направления магнитного поля на обратное или при изменении направления тока, протекающего через образец, на обратное разность потенциалов U_x (э.д.с. Холла) меняет знак на противоположный.

Если основной вклад в эффект вносит один из носителей (электроны в металлах, или электроны, или дырки в полупроводниках), то для расчета постоянной Холла можно пользоваться выражением:

$$R = \frac{1}{ne}, \quad (8.7)$$

где e – элементарный заряд (модуль заряда электрона).

2. Описание экспериментальной установки

Лабораторная установка конструктивно выполнена в идеологии единой модульной конструкции, состоящей из единого блока, содержащего объект исследования: прецизионный полупроводниковый датчик Холла SS494B [1], магнитной системы в виде электромагнита (длинного соленоида), генерирующего однородное магнитное с возможностью изменения напряженности и полярности, микропроцессорной системы автоматизации эксперимента, а также все устройства и источники питания, необходимые для выполнения цикла лабораторных заданий.

Управление установкой осуществляется с помощью регулятора, установленного на лицевой панели управления лабораторного стенда. Установка снабжена микропроцессорной системой управления, контроля и измерения необходимых параметров. Все необ-

ходимые экспериментальные данные выводятся на экран передней панели установки, а также посредством USB соединения и оригинальной управляющей программы на внешний персональный компьютер.

Лабораторный стенд выполнен по открытой идеологии, для чего на переднюю панель стенда выведены контрольные контакты экспериментальной схемы, что позволяет (при необходимости) подключать к стенду внешние измерительные приборы и оборудование.

На левой боковой поверхности лабораторного стенда расположен патрон плавкого предохранителя и разъем подключения кабеля электропитания.

Питание лабораторного стенда осуществляется от однофазной сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц посредством подключения кабеля электропитания к стандартной розетке EURO с заземленным центральным электродом.



Рис. 8.2. Внешний вид учебного лабораторного стенда «Изучение эффекта Холла в полупроводниках»

Здесь цифрами обозначены:

1. Переключатель электропитания лабораторного стенда. В верхнем положении переключателя сетевое электропитание стенда включено, в нижнем – выключено.

2. Переключатель полярности включения соленоида магнитной системы. В верхнем положении соленоид включен (условно) в положительной полярности, в нижнем – в отрицательной.

3. Схема экспериментальной цепи.

4. Многофункциональный индикатор информационно-измерительной системы лабораторного стенда. На экран выводятся:

а) «Параметры катушки»:

«U ____ В» – напряжение на контактах соленоида;

«I ____ А» – ток соленоида;

б) «Параметры датчика»:

«U ____ В» – напряжение на контактах датчика Холла;

«I ____ А» – ток датчика Холла;

«V ____ Т» – расчетная (на основании показаний датчика Холла) напряженность магнитного поля.

5. Регулятор установки напряжения на контактах соленоида.

6. Разъем USB «Модуль ввода-вывода» для подключения внешнего компьютера с управляющей программой для автоматической обработки результатов эксперимента.

3. Выполнение лабораторной работы

Лабораторный стенд должен располагаться на ровной поверхности лабораторного стола. Размеры лабораторного стола должны обеспечивать свободный доступ обучающихся к передней панели лабораторного стенда.

Подключить кабель электропитания лабораторного стенда к стандартной сетевой электророзетке (220 В, 50 Гц) стандарта EURO с заземленным центральным электродом.

Примечание: в целях повышения наглядности проведения экспериментов конструкцией лабораторной установки предусмотрена возможность подключения внешнего компьютера с последующей визуализацией экспериментальных данных с помощью оригинальной управляющей программы. Обмен информацией компьютера и лабораторного стенда осуществляется с помощью USB кабеля, подключаемого к разьему «Модуль ввода-вывода» (6 рис. 8.2).

Установить в верхнее положение переключатель электропитания лабораторной установки (1 рис. 8.2), при этом должен начать светиться экран установки (4 рис. 8.2). После заставки приветствия на экран лабораторной установки в реальном масштабе времени будут выводиться экспериментальные данные:

а) «Параметры катушки»:

«U ____ В» – напряжение на контактах соленоида;

«I ____ А» – ток соленоида;

б) «Параметры датчика»:

«U ____ В» – напряжение на контактах датчика Холла;

«I ____ А» – ток датчика Холла;

«В ____ Т» – расчетная (на основании показаний датчика Холла) напряженность магнитного поля.

Выполнение измерений

Установить в верхнее положение «1» переключатель SA1 (2 рис. 8.1) полярности включения соленоида.

Провести экспериментальное исследование датчика Холла при прямом включении соленоида.

Плавно поворачивая по часовой стрелке регулятор EN1 « U_c » (5 рис. 8.2) установки напряжения питания соленоида, наблюдать за показаниями экрана «Блок индикации режимов работы». Занести экспериментальные данные в табл. 8.2:

Таблица 8.2. Экспериментальные данные датчика Холла при прямом включении соленоида

Напряжение катушки соленоида U , В	Ток катушки соленоида I , А	Напряжение датчика U , В	Ток датчика I , А	Индукция магнитного поля B , Т

Плавно поворачивая против часовой стрелки регулятор EN1 « U_c » (5 рис. 8.2) установки напряжения питания соленоида, наблюдая за показаниями экрана «Блок индикации режимов работы», установить напряжение на соленоиде равным нулю.

Установить в нижнее положение «2» переключатель SA1 (2 рис. 8.2.) полярности включения соленоида.

Провести аналогичные исследования датчика Холла при обратном включении соленоида.

Занести экспериментальные данные в табл. 8.3.

Таблица 8.3. Экспериментальные данные датчика Холла при обратном включении соленоида

Напряжение катушки соленоида $U, В$	Ток катушки соленоида $I, А$	Напряжение датчика $U, В$	Ток датчика $I,$ $А$	Индукция магнитного поля $B, Т$

На основании экспериментальных данных построить зависимости индукции магнитного поля соленоида от тока соленоида, а также напряжения и тока датчика Холла от индукции магнитного поля соленоида.

Сделать соответствующие выводы и занести их в отчет.

Список рекомендованной литературы

1. Трофимова, Т. И. Курс физики : учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 18-е изд., стер. – Москва : Академия, 2010. – 516 с.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики: в 4 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика : учебное пособие / И. И. Савельев ; под общей ред. В. И. Савельева. – Москва : КНОРУС, 2009. – 576 с.
3. Лабораторный практикум по электричеству и магнетизму. Учебно-методическое пособие для студентов физических направлений и направления «Химия, физика и механика материалов» / составители: И. В. Милютин, С. Н. Костенков ; УдГУ. – Ижевск : Изд-во «Удмуртский университет», 2012. – 48 с.
4. Электричество и магнетизм: лабораторный практикум / под ред. Е. Н. Котликова и С. Я. Щербака. – Санкт-Петербург : ГУАП, 2010. – 83 с.
5. Электричество и магнетизм: лаб. практикум / под ред. А. В. Копыльцова. – Санкт-Петербург : ГУАП, 2021. – 103 с.

Приложение. Оформление титульного листа

Государственный университет «Дубна»
Филиал «Протвино»
Кафедра общеобразовательных дисциплин

Лабораторная работа № _____

название работы

Выполнил: студенты

_____ группы

_____ курса

(Ф.И.О.)

Руководитель:

Дата

защиты: _____

Оценка: _____

(подпись руководителя)

Протвино, 202_____ год

Содержание

Введение	3
Оформление отчета	3
Лабораторная работа № 1. Осциллограф	5
1. Основные сведения	5
2. Настройки панели управления	7
3. Выполнение измерений.....	9
Лабораторная работа № 2. Изучение затухающих электрических колебаний.....	11
1. Теоретические сведения.....	11
2. Описание экспериментальной установки и метода измерений.....	13
3. Выполнение лабораторной работы.....	16
4. Обработка результатов измерений.....	17
Лабораторная работа № 3. Взаимная индукция двух соленоидов	19
1. Теоретические сведения.....	19
2. Описание экспериментальной установки.....	21
3. Выполнение лабораторной работы	23
Лабораторная работа № 4. Сложение гармонических колебаний.....	26
1. Теоретические сведения.....	26
2. Описание экспериментальной установки.....	29
3. Выполнение лабораторной работы.....	30
Лабораторная работа № 5. Изучение электронно-дырочного перехода в полупроводниках.....	36
1. Теоретические сведения.....	36
2. Описание экспериментальной установки и метода измерений.....	40
3. Выполнение лабораторной работы.....	43
4. Обработка результатов измерений.....	46
Лабораторная работа № 6. Изучение зависимости сопротивления полупроводника от температуры.....	49
1. Теоретические сведения.....	49
2. Описание экспериментальной установки.....	53
3. Выполнение лабораторной работы	55
Лабораторная работа № 7. Изучение явления гистерезиса	58
1. Теоретические сведения.....	58
2. Описание экспериментальной установки.....	60
3. Выполнение лабораторной работы.....	64

Лабораторная работа № 8. Изучение эффекта Холла

в полупроводниках	70
1. Теоретические сведения	70
2. Описание экспериментальной установки	72
3. Выполнение лабораторной работы	74
Список рекомендованной литературы	77
Приложение. Оформление титульного листа	78