

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга

Г.Ф. Карлова

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

**Методические указания к лабораторному практикуму
для студентов - экологов всех форм обучения**

2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой РЭТЭМ
_____ В.И. Туев
«___» _____ 2012 г.

Методические указания к лабораторному практикуму по курсу
«Основы электроники» для студентов-экологов всех форм обучения

Разработчик:
доцент, к.ф.-м.н. каф. РЭТЭМ
_____ Г.Ф. Карлова
«___» _____ 2012 г.

Карлова Г.Ф. Основы электроники : методические указания к лабораторному практикуму / Г.Ф. Карлова ; ТУСУР. – Томск, 2012. – 86 с.

Содержит описания девяти лабораторных работ по основным разделам курса «Основы электроники», правила работы и требования по технике безопасности, требования к оформлению отчетов. В описании работ содержатся необходимые теоретические аспекты и методика выполнения, контрольные вопросы. Ко всему циклу лабораторных работ прилагается общий список рекомендуемой литературы.

Указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности «Экология и природопользование» всех форм обучения ТУСУРа; а также преподавателям, студентам и аспирантам технических вузов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Требования к технике безопасности	6
Порядок оформления работ.....	8
Лабораторная работа № 1	
Проверка основных законов, действующих при протекании постоянного тока. Классификация условий труда при воздействии постоянного электрического поля	9
Лабораторная работа № 2	
Определение индуктивности катушки, ёмкости конденсатора и проверка закона Ома для переменного тока. Классификация условий труда при воздействии переменного с частотой 50 Гц электрического и магнитного полей.....	17
Лабораторная работа № 3	
Изучение зависимости ЭДС электромагнитной индукции кругового тока от расстояния вдоль оси от его центра.Классификация условий труда при воздействии электромагнитных полей радиочастотного диапазона	28
Лабораторная работа № 4	
Полупроводниковый диод.....	28
Лабораторная работа № 5	
Биполярный транзистор.....	45
Лабораторная работа № 6	
Усилительный каскад на биполярном транзисторе	50
Лабораторная работа № 7	
Изучение характеристик лазера и его использование для измерения размеров микрочастиц в матрице.....	58
Лабораторная работа № 8	
Полевой транзистор	66
Лабораторная работа № 9	
Исследование магнитных полей с помощью датчиков на основе эффекта Холла. Классификация условий труда при воздействии постоянного магнитного поля	73
Литература	85
Приложение А	
Пример оформления титульного листа.....	86

ВВЕДЕНИЕ

«Основы электроники» – предмет в системе высшего образования студентов по специальности «Экология». Основная задача курса – формирование у студентов целостного систематизированного представления об основах электроники и принципах построения приборов, которые специалисты – экологи будут использовать в своей трудовой деятельности.

Изучение данной дисциплины дает возможность понять, что такое современная электроника; овладеть научным методом; стать всесторонне образованным специалистом, разбирающимся в сущности построения приборов, в том числе применяемых в экологии.

Пособие ставит своей целью быть максимально полезным и доступным для студентов ТУСУРа по специальности «Экология». Оно содержит 8 лабораторных работ по дисциплине «Основы электроники». К каждой лабораторной работе дано теоретическое введение, в котором кратко обоснованы основные понятия и закономерности, связанные с работой.

При выполнении лабораторных работ студент должен продемонстрировать:

- владение соответствующим понятийным и терминологическим аппаратом;
- знакомство с учебно-методической и дополнительной литературой по заданной теме;
- умение найти методы решения поставленной задачи из материала, представленного преподавателем или найденного самостоятельно.

Перед выполнением лабораторной работы студенты изучают принцип исследуемых и применяемых в работе устройств, их параметры и характеристики. Составляют методику исследования изучаемого устройства, которое им предлагает преподаватель, оформляют теоретическую часть отчета с необходимыми расчетами, а также методику измерений с выбранными схемами измерений и таблицами для занесения измеряемых значений величин. Также прорабатывают требования по технике безопасности.

К лабораторной работе допускаются только те студенты, которые прошли индивидуальное собеседование с преподавателем и получившие допуск.

Выполнение лабораторных работ имеет большое значение для усвоения теоретического курса «Концепции современного естествознания» и получения необходимых практических навыков.

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Перед началом лабораторных работ студенты должны получить инструктаж по технике безопасности в лаборатории и ознакомиться с правилами эксплуатации приборов и другого оборудования, используемого при выполнении работ. Инструктаж проводит преподаватель, ведущий занятия. После проведения инструктажа студент расписывается в регистрационном журнале о том, что он ознакомлен с правилами безопасной работы в лаборатории и обязуется их выполнять. Студенты, не прошедшие инструктаж, к работе не допускаются. Студенты, замеченные в нарушении настоящих правил, отстраняются от выполнения лабораторных работ.

Требования безопасности перед началом и окончанием работы

Каждый студент должен:

1. Знать расположение общих рубильников силовой сети напряжением 220 Вольт и частотой 50 Гц для того, чтобы в случае необходимости быстро отключить питание от лабораторных установок.
2. Изучить описание лабораторной работы и инструкции к используемым приборам.
3. Ознакомиться с макетом установки.
4. Проверить наличие заземления на каждом приборе, подлежащем заземлению. В случае отсутствия заземления сообщить об этом преподавателю или зав. лабораторией.

Запрещается:

- Включать в сеть приборы, вращать ручки настройки без разрешения преподавателя.
 - Переставлять приборы из установки.
 - Разбирать схемы, вскрывать приборы и т.д.
 - Начинать проведение эксперимента без разрешения преподавателя.
 - Загромождать рабочее место и установку одеждой, сумками и др. посторонними предметами.
5. Перед началом эксперимента получить допуск у преподавателя.
 6. В присутствии преподавателя включить приборы, входящие в установку, в соответствии с инструкциями к приборам и описанием лабораторной работы.

Если приборы не работают, сообщить об этом преподавателю или зав. лабораторией.

7. При нарушении нормальной работы прибора (сильное зашкаливание, характерный запах горелого и т.п.) немедленно отключить прибор и сообщить об этом преподавателю или зав. лабораторией.

Запрещается:

- Работать с неисправными приборами.
- Самим проводить устранение неисправностей.
- Оставлять без наблюдения включенные приборы.

8. Если работа выполнена полностью и правильно, то по указанию преподавателя выключить приборы в соответствии с инструкцией и привести в порядок рабочее место.

Требования безопасности в аварийных ситуациях

1. При появлении запаха гари, дыма или возгорания принять меры по обнаружению источника возгорания и его ликвидации.

2. В случае пожара обесточить помещение, вызвать по телефону 01 пожарную охрану, произвести эвакуацию людей, сообщить администрации о случившемся и приступить к тушению пожара с помощью имеющихся средств пожаротушения.

3. В случае поражения человека электрическим током, необходимо быстро освободить пострадавшего от действия тока и вызвать врача. Если пострадавший находится без сознания, то нужно привести его в сознание, давая нюхать нашатырный спирт; если пострадавший плохо дышит, начать делать искусственное дыхание и массаж сердца и продолжать их делать до прибытия врача.

4. В случае затопления помещения водой необходимо обесточить помещение, вызвать сантехника, вынести ценное оборудование и при необходимости сообщить администрации о случившемся.

ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ РАБОТ

В процессе выполнения лабораторной работы студент должен наблюдать за ходом эксперимента, отмечая все его особенности: изменение цвета, тепловые эффекты, изменение показаний приборов, выделение газа и т.д. Результаты наблюдений записывают в лабораторный журнал, придерживаясь определенной последовательности:

- название лабораторной работы, дата выполнения;
- цель работы;
- краткая теория вопроса;
- результаты эксперимента;
- выводы по результатам работы.

Записи в лабораторном журнале производят чернилами.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ ОС ТУСУР 6.1-97*.

Пример оформления титульного листа приводится в приложении А.

Для оформления Отчета также необходимо ознакомиться со следующими стандартами:

ГОСТ 7.12-93 ССИБИД. Сокращение русских слов и словосочетаний в библиографическом описании произведений печати.

ГОСТ 7.32-91 ССИБИД. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Проверка основных законов, действующих при протекании постоянного тока. Классификация условий труда при воздействии постоянного электрического поля

Цель работы: дать представление студентам об основных законах и единицах измерения электрических величин в системе СИ; экспериментально проверить закон Ома и закон Джоуля-Ленца; ознакомиться с классификацией условий труда при воздействии электростатического поля

Проверка закона Ома

1. Введение

Ом, Георг Симон (1787-1854), немецкий физик в 1826-27 гг. установил количественную связь между силой тока, сопротивлением электрической цепи и напряжением, действующим в цепи (закон Ома) [1].

Для участка электрической цепи закон Ома гласит: падение напряжения на данном участке цепи прямо пропорционально силе тока и электрическому сопротивлению участка. Закон Ома для замкнутой неразветвленной цепи: сила тока прямо пропорциональна электродвижущей силе и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.

2. Теоретические сведения

Для участка электрической цепи закон Ома гласит: падение напряжения на данном участке цепи прямо пропорционально силе тока и электрическому сопротивлению участка. Обозначая ток I , сопротивление участка R и напряжение U , имеем:

$$U = IR \quad (1.1)$$

или в другой форме

$$I = \frac{U}{R}. \quad (1.2)$$

Этот вывод относится к участку цепи, не содержащему источников тока.

Можно доказать, что тот же закон имеет место и при наличии на участке источников тока. Действительно, при этом работа производится не только электрическими, но также и сторонними силами.

Например, при зарядке аккумулятора напряжение на нём положительное (т.е. знак напряжения совпадает со знаком тока), а ЭДС его отрицательна, так как аккумулятор включён встречно. Поэтому $U + E < U$, и работа по перемещению носителей заряда меньше полной работы электрических сил. По закону Ома для участка цепи, содержащего источник тока с ЭДС = E :

$$I = \frac{(U + E)}{R} \quad (1.3)$$

Закон Ома справедлив как для постоянного, так и для переменного тока. Зависимость тока от напряжения носит название вольт - амперной характеристики и в координатах ток – напряжение представляет собой прямую линию, наклон которой определяется сопротивлением резистора.

3. Принадлежности к лабораторной работе

1. Регулируемый источник питания.
2. Измерительные приборы – амперметр, вольтметр.
3. Набор резисторов.
4. Соединительные провода.

4. Порядок выполнения работы

1. При выполнении работы необходимо вести протокол измерений, в котором отражаются все условия проведения опытов и получения результатов, используемых в последующих расчётах и обработке результатов измерений.
2. Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации измерительных приборов.
3. Собрать электрическую схему, приведённую на рисунке 5.1.

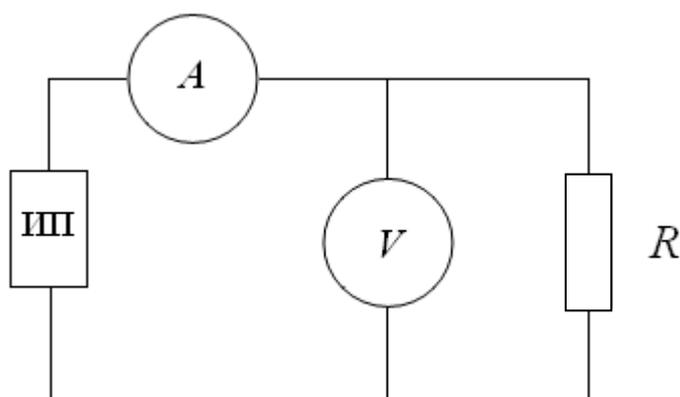


Рисунок 1.1 – Структурная схема лабораторной установки:

A – амперметр; V – вольтметр; R – резистор; ИП – источник питания

4. Включить источник питания, подать на резистор начальное напряжение по заданию преподавателя и измерить ток и напряжение. Данные записать в таблицу.

5. Увеличивая подаваемое напряжение, повторить п. 4. Число снимаемых точек должно быть не менее 10.

6. Построить вольт - амперную характеристику резистора и по наклону характеристики определить величину резистора.

7. Провести проверку закона Ома для каждого из предложенных резисторов.

8. Определить погрешность вычисления величины R .

9. Написать отчет, в котором отразить полученные результаты в виде таблиц и графиков. В заключении обязательно сделать выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. В чем состоит содержание лабораторной работы? Каковы ожидаемые результаты измерений и расчетов?

2. Сформулируйте закон Ома и напишите его математическую форму.

3. Сформулируйте закон Ома для полной цепи и напишите его математическую форму.

4. Укажите единицы измерения в системе СИ для силы тока I , сопротивления участка R и напряжения U .

Проверка закона Джоуля-Ленца

1. Введение

Джоуль, Джеймс Прескотт (1818-1889), английский физик, экспериментально обосновал закон сохранения энергии, независимо от Ю. Майера и Г. Гельмгольца; разрабатывал кинетическую теорию газов. Ленц Эмилий Христианович (1804-1865) – русский физик, академик. Э. Ленц установил правило в области электромагнетизма, названное его именем, разработал вместе с Якоби методы расчёта электромагнитов. Занимался также физико-географическими исследованиями, участвовал в кругосветном плавании, в экспедициях на Кавказ и др.

Д. Джоуль и Э.Х. Ленц независимо друг от друга установили закон выделения теплоты в проводнике при прохождении электрического тока, который и называется законом Джоуля-Ленца [1]. Этот закон сыграл большую роль в исторической подготовке открытия закона сохранения и превращения энергии.

Закон Джоуля–Ленца устанавливает, что количество тепла, выделяемого электрическим током в проводнике, прямо пропорционально сопротивлению проводника R , квадрату силы тока I и времени его прохождения t :

$$Q = RI^2t \quad (1.6)$$

2. Теоретические сведения

Русский физик Ленц и английский физик Джоуль, измеряя количество теплоты, выделяемой током в различных случаях, установили следующий закон (закон Джоуля-Ленца): количество теплоты, выделяемой током на участке цепи, пропорционально квадрату тока, времени его прохождения и сопротивлению участка.

Обозначая ток I , сопротивление участка R , время t и количество теплоты Q , имеем:

$$Q = I^2Rt. \quad (1.7)$$

В этой формуле, если I выражен в А, t – в сек, R – в Ом, то количество теплоты Q выразится в Дж (напомним, что 1 Дж равен 0,24 кал).

По закону Ома напряжение $U = IR$. Подставляя вместо U произведение IR , получаем закон Джоуля-Ленца в виде

$$Q = IUt \quad (1.8)$$

Этот вывод относится к участку цепи, не содержащему источников тока.

Можно доказать, что тот же закон имеет место и при наличии на участке источников тока. Действительно, при этом работа производится не только электрическими, но также и сторонними силами. Поэтому формула (3.2) должна быть заменена следующей формулой

$$Q = I(U + E)t. \quad (1.9)$$

Например, при зарядке аккумулятора напряжение на нём положительное (т.е. знак напряжения совпадает со знаком тока), а ЭДС его отрицательна, так как аккумулятор включён встречно. Поэтому $U + E < U$, и работа по перемещению носителей заряда меньше полной работы электрических сил. По закону Ома для участка цепи, содержащего источник тока:

$$I = (U + E) / R, \quad (1.10)$$

откуда

$$IR = U + E. \quad (1.11)$$

Подставляя (3.5) в формулу (3.3), имеем:

$$Q = I^2 R t. \quad (1.12)$$

Итак, закон Джоуля-Ленца имеет место всегда, независимо от того, включает участок цепи источник тока или нет.

3. Принадлежности к лабораторной работе

1. Регулируемый источник питания.
2. Измерительные приборы – амперметр, вольтметр.
3. Резистор.
4. Колба с водой, термометр, секундомер.
5. Соединительные провода.

4. Порядок выполнения работы

1. При выполнении работы необходимо вести протокол измерений, в котором отражаются все условия проведения опытов и получения результатов, используемых в последующих расчётах и обработке результатов измерений.
2. Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации измерительных приборов.
3. Отмерить мерным цилиндром объём $V = (100 \div 300)$ миллилитров воды и залить её в колбу.
4. Градусником измерить температуру воды в колбе T_1 .
5. Собрать электрическую схему, приведённую на рисунке 1.1.

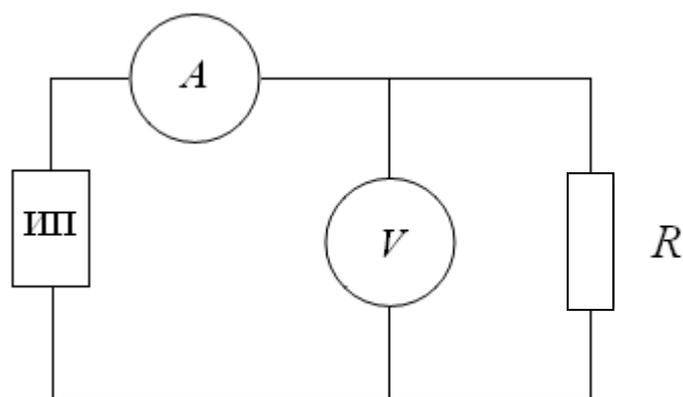


Рисунок 1.2 – Структурная схема лабораторной установки:
A – амперметр ; *V* – вольтметр ; *R* – резистор; ИП – источник питания

6. Погрузить резистор в колбу с водой.
7. Включить секундомер при включении источника питания.
8. Включить источник питания и измерить ток в цепи и напряжение на резисторе

9. Пропускать ток через резистор в течение 50-60 минут, измеряя через каждые 10 мин. температуру воды, напряжение и ток. Записать конечную температуру воды T_k .

10. Провести проверку закона Джоуля-Ленца для каждого из интервалов времени.

11. Количество теплоты, необходимое для того чтобы нагреть тело, равно

$$Q_1 = cm(T_k - T_1), \text{ кал} \quad (1.13)$$

где c – удельная теплоёмкость (для воды $c = 4,18 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)); m – масса тела ($m = \rho \cdot V$); ρ – плотность тела (ρ воды = 10^3 кг/м³). Вычислить количество теплоты Q_1 , полученное водой при протекании тока через резистор, по формуле (1.13) и сравнить его с Q по формуле (1.12).

12. Написать отчет, в котором отразить полученные результаты в виде таблиц и графиков. В заключении обязательно сделать выводы по работе.

Определение класса условий труда при воздействии электростатического поля

Оценка и нормирование электростатического поля (ЭСП) осуществляется по уровню электрического поля дифференцированно в зависимости от времени его воздействия на работника за смену.

Уровень ЭСП оценивают в единицах напряженности электрического поля (E) в кВ/м.

Предельно допустимый уровень напряженности электростатического поля ($E_{\text{пду}}$) при воздействии ≤ 1 час за смену устанавливается равным 60 кВ/м.

При воздействии ЭСП более 1 часа за смену $E_{\text{пду}}$ определяются по формуле:

$$E_{\text{пду}} = \frac{60}{\sqrt{t}}, \quad (1.4)$$

где t – время воздействия (час).

В диапазоне напряженностей 20-60 кВ/м допустимое время пребывания персонала в ЭСП без средств защиты ($t_{\text{доп}}$) определяется по формуле:

$$t_{\text{доп}} = \left(\frac{60}{E_{\text{факт}}} \right)^2, \quad (1.5)$$

где $E_{\text{факт}}$ – измеренное значение напряженности ЭСП (кВ/м).

При напряженностях ЭСП, превышающих 60 кВ/м, работа без применения средств защиты не допускается.

При напряженностях ЭСП менее 20 кВ/м время пребывания в электростатических полях не регламентируется.

Полученные данные согласуются с [2] и приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Классы условий труда при действии неионизирующих электромагнитных излучений (электромагнитные поля и излучения)

Фактор	Класс условий труда						
	Оптимальный	Допустимый	Вредный				Опасный (экстрем.)
			3.1	3.2	3.3	3.4	
1	2	3.1	3.2	3.3	3.4	4	
Превышение ПДУ (раз)							
Электростатическое Поле [3]	естеств. фон	ПДУ ¹	3	5	10	> 10	

¹ Значения ПДУ, с которыми проводится сравнение измеренных на рабочих местах величин ЭМИ, определяются в зависимости от времени воздействия фактора в течение рабочего дня.

6. Контрольные вопросы

1. В чем состоит содержание лабораторной работы? Каковы ожидаемые результаты измерений и расчетов?
2. Сформулируйте закон Ома и напишите его математическую форму.
3. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца и напишите его математическую форму.
4. Укажите единицы измерения в системе СИ для силы тока I , сопротивления участка R , времени t и количества теплоты Q .
5. Определите класс условий труда при работе с используемыми в заданиях электростатическими полями.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Определение индуктивности катушки, ёмкости конденсатора и проверка закона Ома для переменного тока. Классификация условий труда при воздействии переменных с частотой 50 Гц электрического и магнитного полей

Цель работы: изучение основных закономерностей электрических цепей переменного тока и знакомство с простейшими способами измерения индуктивности и емкости; ознакомление с классификацией условий труда при воздействии переменных с частотой 50 Гц электрического и магнитного полей.

1. Теоретическая часть

1.1. Цепи переменного тока

Под действием переменной электродвижущей силы (ЭДС) в электрической цепи, в ней возникает переменный ток.

Переменным называется такой ток, который изменяется по направлению и по величине. В данной работе рассматривается только такой переменный ток, величина которого изменяется периодически по синусоидальному закону. Рассмотрение синусоидального тока вызвано тем обстоятельством, что все крупные электростанции вырабатывают переменные токи, весьма близкие к синусоидальным токам.

Переменный ток в металлах представляет собой движение свободных электронов то в одном, то в противоположном направлении. При синусоидальном токе характер этого движения совпадает с гармоническими колебаниями. Таким образом, синусоидальный переменный ток имеет период T – время одного полного колебания и частоту ν – число полных колебаний за единицу времени. Между этими величинами имеется зависимость

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad T = \frac{1}{\nu}. \quad (2.1)$$

Циклическая частота равна

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad (2.2)$$

Цепь переменного тока, в отличие от цепи постоянного тока, допускает включение конденсатора. Если обкладки конденсатора присоединить к источнику постоянного тока, то в цепи пойдет быстро уменьшающийся ток, который прекратится, когда на обкладках конденсатора возникнет разность потенциалов, компенсирующая ЭДС источника тока. Если же обкладки конденсатора

присоединить к источнику переменной ЭДС, то они непрерывно будут перезаряжаться, и в цепи все время будет идти ток.

Соединим последовательно конденсатор, емкость которого C , с катушкой, имеющей активное сопротивление R и индуктивность L (сопротивление проводящих проводов будем считать малым по сравнению с R); к концам этой цепи M и N (рис. 2.1) приложим переменную ЭДС

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin \omega t, \quad (2.3)$$

где $\varepsilon(t)$ – мгновенное значение ЭДС; ε_0 – максимальная (амплитудная) ЭДС; ω – циклическая частота переменной ЭДС; t – время.

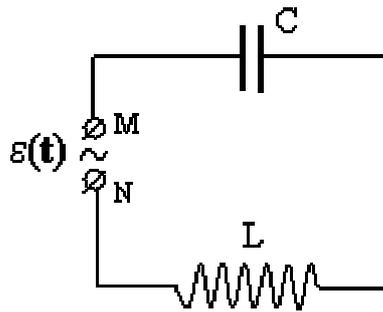


Рисунок 2.1. Схема контура на переменном токе

В цепи кроме ЭДС ε действует еще и ЭДС самоиндукции, равная $-L \frac{dI}{dt}$, где I – сила тока. Таким образом, в цепи действует полная ЭДС [4], равная

$$\varepsilon - L \frac{dI}{dt}.$$

Согласно второму правилу Кирхгофа, алгебраическая сумма падений потенциала в контуре (цепи) $IR + U$ (U – разность потенциалов между обкладками конденсатора) равна алгебраической сумме ЭДС в контуре. Следовательно,

$$IR + U = \varepsilon - L \frac{dI}{dt}. \quad (2.4)$$

Если q – заряд конденсатора, то

$$U = \frac{q}{C}. \quad (2.5)$$

Ток в цепи равен увеличению заряда конденсатора за единицу времени

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (2.6)$$

Из (2.4) с учётом (2.3) и (2.5), получаем

$$L \frac{dI}{dt} + IR + \frac{q}{C} = \varepsilon_0 \sin \omega t. \quad (2.7)$$

Дифференцируя последнее уравнение по времени и учитывая (2.6), получим

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = \varepsilon_0 \omega \cos \omega t. \quad (2.8)$$

Уравнение (2.8) представляет собой дифференциальное уравнение, решением которого является такая функция силы тока от времени $I(t)$, при подстановке которой в (2.8) левая часть уравнения тождественно (для всех значений t) становится равной правой части. Решение уравнения (2.8) для установившегося процесса имеет вид

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi). \quad (2.9)$$

где I – мгновенное значение переменного тока; I_0 – максимальное (амплитудное) значение тока; φ – начальная фаза тока, причем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - (1/\omega C)}{R}. \quad (2.10)$$

Амплитудное значение тока выражается через параметры цепи следующим образом:

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - (1/\omega C))^2}}. \quad (2.11)$$

Подставляя выражение для I из (2.9) в уравнение (2.8), можно убедиться, что (2.9) тождественно удовлетворит (2.8), если принять во внимание формулы (2.10) и (2.11).

Из (2.9) следует, что в цепи течет переменный ток, частота которого равна частоте приложенной ЭДС ω , но ток сдвинут по фазе относительно ЭДС на величину φ . Таким образом, в цепи устанавливаются вынужденные незатухающие колебания.

Формула (2.11), выражающая зависимость амплитуды тока I_0 от амплитуды ЭДС ε_0 , по своей форме напоминает закон Ома, причем роль сопротивления играет величина

$$z = \sqrt{R^2 + (\omega L - (1/\omega C))^2}, \quad (2.12)$$

называемая *полным сопротивлением* или *импедансом* цепи. Поэтому выражение (2.12) называют законом Ома для переменного тока.

В данной работе активное сопротивление R катушки определяется при помощи закона Ома для участка цепи постоянного тока.

В полученные формулы для переменного тока входят амплитудные (максимальные) значения тока I_0 и ЭДС ε_0 . Но амперметры и вольтметры в цепи переменного тока измеряют не амплитудные значения тока и напряжения, а эффективные (действующие) значения этих величин. Переменный ток, проходя через проводник с активным сопротивлением R , выделяет в этом проводнике за некоторый промежуток времени t определенное количество тепла. Под эффективной величиной переменного тока $I_{\text{эф}}$ понимают величину такого постоянного тока, который, проходя через то же сопротивление R , выделяет в проводнике за время t такое же количество тепла, как и переменный ток. Расчет показывает, что для синусоидальных токов

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}. \quad (2.13)$$

Аналогично определяется эффективное напряжение

$$U_{\text{эф}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}. \quad (2.14)$$

где U_0 – амплитудное значение напряжения, а эффективная ЭДС переменного тока

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}}. \quad (2.15)$$

Из формул (2.13) и (2.15) следует, что

$$\frac{\varepsilon_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}} = \frac{\varepsilon_0}{I_0}, \quad (2.16)$$

поэтому в формулу закона Ома для переменного тока (8) можно вместо величин I_0 и ε_0 соответственно подставить величины $I_{\text{эф}}$ и $\varepsilon_{\text{эф}}$.

Если к точкам М и N (рис. 1) подключить вольтметр, то он практически покажет $\varepsilon_{\text{эф}}$, если сопротивление источника переменной ЭДС мало по сравнению с сопротивлением внешнего участка цепи. Если же сопротивление источника ЭДС велико, то подключенный к точкам М и N вольтметр покажет падение напряжения $U_{\text{эф}}$ на внешней цепи. В соответствии с изложенным, закон Ома для переменного тока получит вид

$$I_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{эф}}}{\sqrt{R^2 + (\omega L - (1/\omega C))^2}}. \quad (2.17)$$

Рассмотрим два частных случая.

1. **В цепи отсутствует конденсатор.** Это значит, что конденсатор отключается и вместо него цепь замыкается проводником, падение потенциала на ко-

тором практически равно нулю, то есть величина U в уравнении (2.4) равна нулю. Условие $U = 0$ удовлетворяется, если во всех выражениях, содержащих величину C , перейти к пределу $C \rightarrow \infty$.

При $C \rightarrow \infty$ из формул (2.9), (2.10), (2.12) и (2.17) соответственно получаем

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad (2.18)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}, \quad (2.19)$$

$$z_L = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}, \quad (2.20)$$

$$I_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{эф}}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}. \quad (2.21)$$

где z_L – полное сопротивление цепи при отсутствии в ней конденсатора. Величина ωL называется индуктивным сопротивлением. Из сопоставления уравнений (2.3) и (2.18) следует, что ток отстает по фазе от напряжения, то есть фаза тока на величину φ меньше фазы напряжения.

Из (2.20) и (2.21) получаем

$$z_L = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}, \quad (2.22)$$

$$z_L = \frac{\sqrt{z_L^2 - R^2}}{\omega}. \quad (2.23)$$

2. В цепи отсутствует катушка: следовательно, $L = 0$.

При $L = 0$ из формул (2.9), (2.10) и (2.17) соответственно имеем

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.24)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega CR}, \quad (2.25)$$

$$I_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{эф}}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}. \quad (2.26)$$

Из сопоставления уравнений (2.3) и (2.24) следует, что ток опережает напряжение по фазе на величину φ , т.е. фаза тока больше фазы напряжений.

Считая активное сопротивление R соединительных проводов малым по сравнению с общим сопротивлением цепи ($R = 0$), из формулы (2.12) получаем

$$z_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (2.27)$$

где z_C – общее сопротивление цепи при $L = 0$ и $R = 0$. Величина z_C называется емкостным сопротивлением.

Из (2.26) при $R = 0$ имеем

$$z_C = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}, \quad (2.28)$$

а из (2.27) получаем

$$C = \frac{1}{\omega z_C}, \quad (2.29)$$

Следует отметить, что при $R \rightarrow 0$ из (2.25) имеем $\text{tg } \varphi \rightarrow \infty$. Это значит, что $\varphi = \pi/2$, то есть в данном случае ток опережает напряжение по фазу на $\pi/2$.

Сопротивления z , z_L , z_C , так же как и активное сопротивление R , в системе СИ выражается в Омах.

1.2. Определение класса условий труда при воздействии поля промышленной частоты 50 Гц

Оценка воздействия электромагнитных полей на человека

Оценка электромагнитных полей промышленной частоты (ЭМП ПЧ) (50 Гц) осуществляется отдельно по напряженности электрического поля (E) в кВ/м, напряженности магнитного поля (H) в А/м или индукции магнитного поля (B), в мкТл. Нормирование электромагнитных полей 50 Гц на рабочих местах персонала дифференцировано в зависимости от времени пребывания в электромагнитном поле.

Предельно допустимый уровень напряженности ЭП на рабочем месте в течение всей смены устанавливается равным 5 кВ/м [5].

При напряженностях в интервале больше 5 и до 20 кВ/м включительно допустимое время пребывания в ЭП T (час) рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{50}{E} - 2, \quad (2.30)$$

где E – напряженность ЭП в контролируемой зоне, кВ/м; T – допустимое время пребывания в ЭП при соответствующем уровне напряженности, ч.

При напряженности свыше 20 и до 25 кВ/м допустимое время пребывания в ЭП составляет 10 мин [5,6].

Пребывание в ЭП с напряженностью более 25 кВ/м без применения средств защиты не допускается.

Допустимое время пребывания в ЭП может быть реализовано одноразово или дробно в течение рабочего дня. В остальное рабочее время необходимо находиться вне зоны влияния ЭП или применять средства защиты.

Приведенной время $T_{пр}$ пребывания персонала в течение рабочего дня в зонах с различной напряженностью ЭП вычисляют по формуле:

$$T_{пр} = 8 \left(\frac{t_{E1}}{T_{E1}} + \frac{t_{E2}}{T_{E2}} + \dots + \frac{t_{En}}{T_{En}} \right), \quad (2.31)$$

где $T_{пр}$ – приведенное время, эквивалентное по биологическому эффекту пребыванию в ЭП нижней границы нормируемой напряженности; $t_{E1}, t_{E2}, \dots, t_{En}$ – время пребывания в контролируемых зонах с напряженностью E_1, E_2, \dots, E_n , ч; $T_{E1}, T_{E2}, \dots, T_{En}$ – допустимое время пребывания для соответствующих контролируемых зон.

Приведенное время не должно превышать 8 ч.

Количество контролируемых зон определяется перепадом уровней напряженности ЭП на рабочем месте. Различие в уровнях напряженности ЭП контролируемых зон устанавливается 1 кВ/м.

Требования действительны при условии, что проведение работ не связано с подъемом на высоту, исключена возможность воздействия электрических разрядов на персонал, а также при условии защитного заземления всех изолированных от земли предметов, конструкций, частей оборудования, машин и механизмов, к которым возможно прикосновение работающих в зоне влияния ЭП.

2. Экспериментальная часть

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение активного сопротивления R катушки.

1. Собрать схему (рис. 2.3).

На схеме М и N – точки, к которым подключается источник постоянного тока (выпрямитель, включаемый в городскую электрическую сеть); А и V – амперметр и вольтметр постоянного тока; К – катушка. На выпрямителе имеется ручка реостата, с помощью которой можно изменять напряжение, подаваемое на точки М и N.

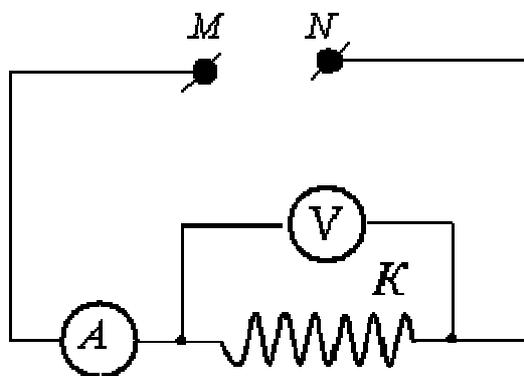


Рисунок 2.3

2. Ставят ручку реостата в такое положение, при котором он имеет максимальное сопротивление.
3. Подключают к точкам М и N схемы выпрямитель, отключенный от сети.
4. Подключают выпрямитель к сети.
5. Медленно перемещая ручку реостата, ставят ее в такое положение, чтобы стрелки амперметра и вольтметра дали достаточные для отсчета отклонения; записывают показания амперметра I_{Π} и вольтметра U_{Π} ; по формуле закона Ома для участка цепи постоянного тока

$$R = \frac{U_{\Pi}}{I_{\Pi}} \quad (2.33)$$

определяют активное сопротивление катушки R .

6. Продолжая уменьшать сопротивление реостата, определяют еще две пары значений величин I_{Π} и U_{Π} и, подставляя в формулу (2.33), определяют величину R .
7. Определяют среднее значение активного сопротивления катушки

$$R = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3}, \quad (2.34)$$

где R_1, R_2, R_3 – результаты, полученные по формуле (27) для трех измерений.

8. Обычным способом определяют абсолютную и относительную ошибки измерений.
9. Результаты измерений заносят в таблицу 1.

Таблица 2.3

$U_{\Pi}, \text{В}$			
$I_{\Pi}, \text{А}$			
$R = \frac{U_{\Pi}}{I_{\Pi}}, \text{Ом}$			

Задание 2. Определение индуктивности L катушки.

Провода, идущие от точек М и N схему (рис. 2), отключают от зажимов источника постоянного тока и подключают к зажимам источника переменного тока, на котором имеется ручка реостата. Ручка реостата при этом должна находиться в таком положении, когда реостат имеет максимальное сопротивление. При выполнении данного упражнения используют амперметр и вольтметр переменного тока. Замкнув цепь источника переменного тока, выполняют операции, изложенные в пунктах 5, 6, 7 и 8 первого упражнения.

В данном случае амперметр и вольтметр будут уже показывать эффективные значения и напряжения ($I_{\text{эф}}$ и $U_{\text{эф}}$). По формуле (2.22) определяют величину z_L . Опыт выполняют три раза и вычисляют среднее значение этой величины $z_{L\text{ср}}$ по формуле, аналогичной (2.34); затем величину $z_{L\text{ср}}$ подставляют в формулу (2.23) и полагая $\nu = 50$ Гц, определяют индуктивность катушки L .

Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица 2.4

$U_{\text{эф}}, \text{В}$			
$I_{\text{эф}}, \text{А}$			
$z = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}, \text{Ом}$			

Задание 3. Определение емкости C конденсатора.

Собирают схему согласно рис. 2.4.

На схеме 2.4 обозначения те же, что и на схеме рис. 2.3, только вместо катушки K включен конденсатор C .

К точкам M и N подключается источник переменного тока, выполняются все операции, указанные в упражнении 2, и определяются величины $I_{\text{эф}}$ и $U_{\text{эф}}$. По формуле (2.28) три раза определяется величина Z_C и затем по формуле, аналогичной (2.34), определяется среднее значение этой величины $Z_{C\text{ср}}$. Величину $Z_{C\text{ср}}$ подставляют в формулу (2.29) определяют емкость C конденсатора.

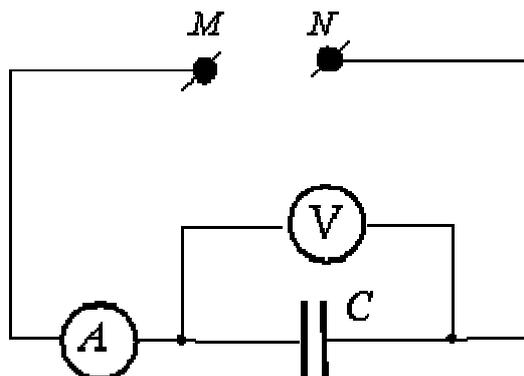


Рисунок 2.4

Результаты измерений заносят в таблицу.

Таблица 2.4

$U_{\text{эф}}, \text{В}$			
$I_{\text{эф}}, \text{А}$			
$z = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}, \text{Ом}$			

Задание 4. Проверка закона Ома для переменного тока

Собрать схему согласно рис. 2.5.

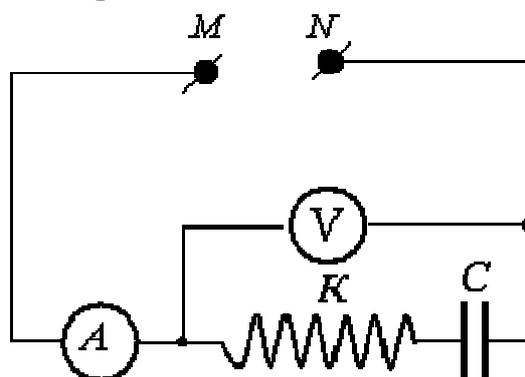


Рисунок 2.5

На схеме обозначения прежние. К точкам М и N подключается источник переменного тока.

Из формулы (2.17) имеем

$$z = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}. \quad (2.35)$$

При помощи тех же операций, как и в упражнениях 2 и 3, определяют величину полного сопротивления цепи Z и вычисляют среднее значение этой величины $Z_{\text{ср}}$. Результат измерений заносят в таблицу.

Таблица 2.5

$U_{\text{эф}}, \text{В}$			
$I_{\text{эф}}, \text{А}$			
$z = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}, \text{Ом}$			

Величину $Z_{\text{ср}}$ сопоставляют с величиной, вычисленной по формуле (2.12), при подстановке в нее значений величин R , L и C , полученных в 1, 2 и 3 заданиях.

3. Контрольные вопросы

1. Что такое электрический ток и каковы условия его возникновения?
2. Что такое эффективное напряжение?
3. Какие виды заряженных частиц вам известны?
4. Какая сила заставляет заряженные частицы двигаться направленно?
5. Каков физический смысл электрического сопротивления R ?
6. Как зависит электрическое сопротивление металлического проводника от температуры?

7. На каком из последовательно соединённых R с различным электрическим сопротивлением выделяется наибольшее количество теплоты за одинаковое Δt ?

8. На каком из параллельно соединённых R с различным электрическим сопротивлением выделяется наибольшее количество теплоты за одинаковое Δt ?

9. Сформулируйте первое правило Кирхгофа. Частным случаем какого более общего физического закона оно является?

10. Сформулируйте второе правило Кирхгофа и примените его к заданной преподавателем замкнутой электрической цепи.

11. Рассчитайте общее электрическое сопротивление заданной преподавателем разветвлённой электрической цепи.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Изучение зависимости ЭДС электромагнитной индукции кругового тока от расстояния вдоль оси от его центра. Классификация условий труда при воздействии электромагнитных полей радиочастотного диапазона

Цель работы: изучение магнитного поля на оси кругового витка с током; экспериментальная проверка закона Био-Савара-Лапласа.

1. Основные расчетные формулы

В работе использовано явление электромагнитной индукции [3]. Это явление заключается в том, что если катушку, состоящую из некоторого числа витков, пронизывает изменяющийся во времени магнитный поток, то в ней возникает ЭДС индукции, прямо пропорциональная скорости изменения этого потока и числу витков.

Выражение для расчета амплитудного значения магнитной индукции B_m в любой точке на оси z катушки:

$$B_m = \frac{E_m}{S\omega N}, \quad (3.1)$$

где E_m – амплитудное значение ЭДС индукции, измеренное с помощью осциллографа; S – площадь поперечного сечения измерительной катушки ($S = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$); $\omega = 2\pi\nu$, где ν – частота переменного напряжения, питающего круговой виток ($\nu = 50 \text{ Гц}$); N – число витков измерительной катушки ($N = 5000$).

Относительная погрешность косвенных измерений амплитудного значения магнитной индукции B_m

$$\varepsilon(B_m) = \sqrt{\varepsilon^2(E_m) + \varepsilon^2(S) + \varepsilon^2(\omega) + \varepsilon^2(N)}, \quad (3.2)$$

где $\varepsilon(E_m)$ – относительная погрешность величины E_m ; $\varepsilon(S)$ – относительная погрешность величины S ; $\varepsilon(\omega)$ – относительная погрешность величины ω ; $\varepsilon(N)$ – относительная погрешность величины N .

Абсолютная погрешность косвенных измерений B

$$\sigma(B_m) = \varepsilon(B_m) \cdot B_m, \quad (3.3)$$

где .

$$\sigma(E_m^{-2/3}) = \frac{2}{3} E_m^{-5/3} \sigma(E_m), \quad (3.4)$$

где $\sigma(E_m^{-2/3})$ – абсолютная погрешность величины $E_m^{-2/3}$.

$$\sigma(z^2) = 2z\sigma(z), \quad (3.5)$$

где $\sigma(z^2)$ – абсолютная погрешность величины z^2 .

2. Описание экспериментальной установки и методики измерений

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.1.

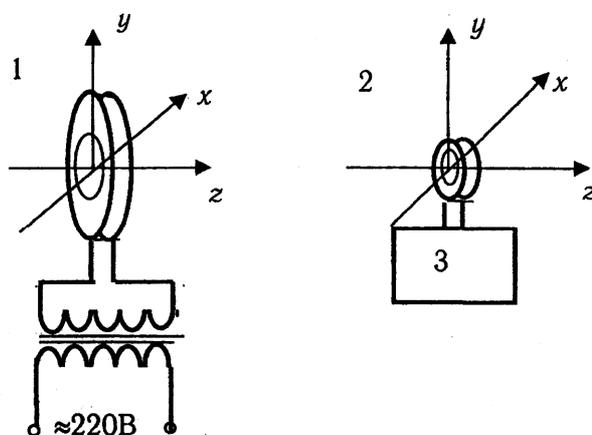


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки

1 – катушка с током, создающая магнитное поле; 2 – измерительная катушка;
3 – осциллограф

Методика эксперимента заключается в следующем. Вблизи центра кругового тока определяется положение измерительной катушки, при котором сигнал на экране осциллографа максимален. Затем перемещая измерительную катушку вдоль оси кругового тока через 1 см, снимается зависимость ЭДС индукции от расстояния.

3. Классификация условий труда при воздействии электромагнитных полей радиочастот

Предельно допустимые уровни напряженности периодических (синусоидальных) магнитных полей (МП) устанавливаются для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия и приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – ПДУ воздействия периодического магнитного поля частотой 50 Гц

Время пребывания, час	Допустимые уровни МП, H [А/м] / B [мкТл] при воздействии	
	Общем	Локальном
≤ 1	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

Допустимая напряженность МП внутри временных интервалов определяется в соответствии с кривой интерполяции, приведенной на рис. 2.2 [5,6].

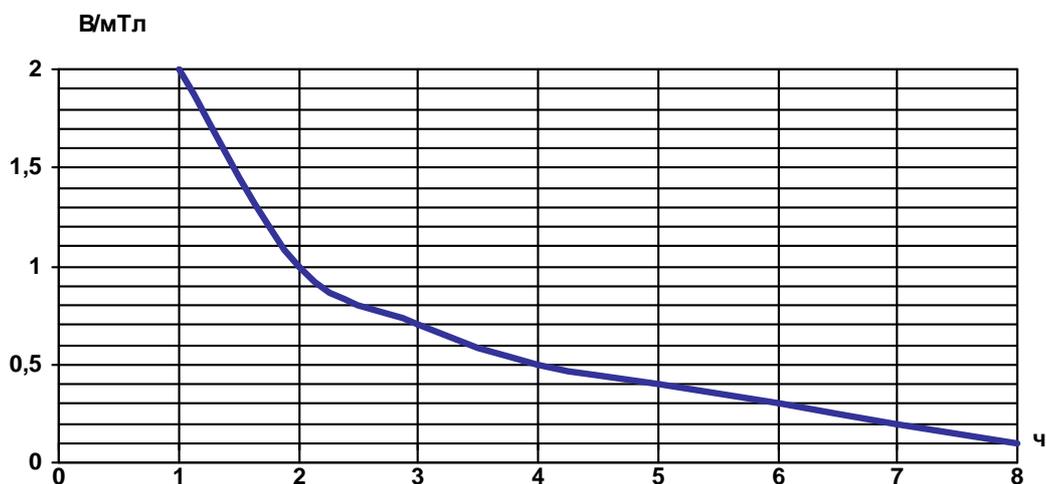


Рисунок 2.2 – График интерполяции ПДУ магнитных полей частотой 50 Гц

При необходимости пребывания персонала в зонах с различной напряженностью (индукцией) МП общее время выполнения работ в этих зонах не должно превышать предельно допустимое для зоны с максимальной напряженностью.

Допустимое время пребывания может быть реализовано однократно или дробно в течение рабочего дня.

Режимы воздействующих на человека электромагнитных импульсов

Для условий воздействия импульсных магнитных полей 50 Гц (таблица 2.2) предельно допустимые уровни амплитудного значения напряженности поля ($H_{пду}$) дифференцированы в зависимости от общей продолжительности воздействия за рабочую смену (T) и характеристики импульсных режимов генерации [7]:

режим I – импульсное с $\tau_{и} \geq 0,02$ с, $t_{п} \leq 2$ с;

режим II – импульсное с 1 с $\leq \tau_{и} \leq 60$ с, $t_{п} > 2$ с;

режим III – импульсное с $0,02$ с $\leq \tau_{и} < 1$ с, $t_{п} > 2$ с,

где $\tau_{и}$ – длительность импульса на уровне половинного значения максимальной амплитуды, с; $t_{п}$ – длительность паузы между импульсами, с.

Таблица 2.2 – ПДУ воздействия импульсных магнитных полей частотой 50 Гц в зависимости от режима генерации

T, ч	$H_{пду}$, А/м		
	Режим I	Режим II	Режим III
$\leq 1,0$	6000	8000	10000
$\leq 1,5$	5000	7500	9500
$\leq 2,0$	4900	6900	8900
$\leq 2,5$	4500	6500	8500

$\leq 3,0$	4000	6000	8000
$\leq 3,5$	3600	5600	7600
$\leq 4,0$	3200	5200	7200
$\leq 4,5$	2900	4900	6900
$\leq 5,0$	2500	4500	6500
$\leq 5,5$	2300	4300	6300
$\leq 6,0$	2000	4000	6000
$\leq 6,5$	1800	3800	5800
$\leq 7,0$	1600	3600	5600
$\leq 7,5$	1500	3500	5500
$\leq 8,0$	1400	3400	5400

Контроль за значениями напряженности электрических и магнитных полей должен осуществляться на рабочих местах персонала, обслуживающего электроустановки переменного тока (линии электропередачи, распределительные устройства и др.), электросварочное оборудование, высоковольтное электрооборудование промышленного, научного и медицинского назначения и др.

Контроль уровней ЭМП частотой 50 Гц осуществляется отдельно для ЭП и МП.

В электроустановках с однофазными источниками ЭМП контролируются действующие (эффективные) значения ЭП и МП

$$E = E_M \sqrt{2}, \quad H = H_M \sqrt{2}, \quad (2.32)$$

где E_M и H_M – амплитудные значения напряженностей ЭП и МП.

В электроустановках с двух- и более фазными источниками ЭМП контролируются действующие (эффективные) значения напряженностей E_{\max} и H_{\max} , где E_{\max} и H_{\max} – действующие значения напряженностей по большей полуоси эллипса или эллипсоида.

Измерения и расчет напряженности ЭП частотой 50 Гц должны производиться при наибольшем рабочем напряжении электроустановки или измеренные значения должны пересчитываться на это напряжение путем умножения измеренного значения на отношение U_{\max}/U , где U_{\max} – наибольшее рабочее напряжение электроустановки, U – напряжение электроустановки при измерениях.

Измерения и расчет напряженности (индукции) МП частотой 50 Гц должны производиться при максимальном рабочем токе электроустановки, или измеренные значения должны пересчитываться на максимальный рабочий ток (I_{\max}) путем умножения измеренных значений на отношение I_{\max}/I , где I – ток электроустановки при измерениях.

Измерения рекомендуется производить приборами с трех координатным индукционным датчиком, обеспечивающим автоматическое измерение модуля напряженности МП при любой ориентации датчика в пространстве с допустимой относительной погрешностью +10%.

При использовании средств измерения приборов направленного приема (преобразователем Холла и т.п.) необходимо осуществлять поиск максимального регистрируемого значения путем ориентации датчика в каждой точке в разных плоскостях.

4. Порядок выполнения работы

3.1. Измерить максимальную величину сигнала на экране осциллографа при расположении измерительной катушки вблизи центра кругового тока. Это положение измерительной катушки принять за начало отсчета ($z = 0$).

3.2. Изменяя расстояние z , измерить величину сигнала E_m . Результаты прямых и косвенных измерений привести в таблице 3.1. Записать величины относительной погрешности $\varepsilon(S) = 0,1$; $\varepsilon(N) = 0,01$; $\varepsilon(\omega) = 0,01$; $\varepsilon(E_m) = 0,1$ и абсолютной погрешности $\sigma(z) = 0,25$ см в примечании таблицы

Таблица 3.1 – Результаты прямых и косвенных измерений

z , см	E_m , В	$E_m^{-2/3}$, $B^{-2/3}$	z^2 , см ²	Примечания

3.3. По формуле (3.1) определить индукцию магнитного поля B_m для $z = 0$.

3.4. По формуле (3.2) вычислить относительную погрешность B_m .

3.5. По формуле (3.3) вычислить абсолютная погрешность B_m .

3.6. Рассчитать по формулам (3.4) и (3.5) значения систематических погрешностей и составить таблицу 2.

Таблица 3.2 – Значения систематических погрешностей

Номер точки	$\sigma(E_m^{-2/3})$, $B^{-2/3}$	$\sigma(z^2)$, см ²

--	--	--

3.7. Используя экспериментальные данные, приведенные в таблице 3.1, построить зависимость $E_m = f(z)$, а затем зависимость $E_m^{-2/3} = f(z^2)$. Для проверки соответствия экспериментальной зависимости $E_m = f(z)$ теоретической применяется метод линеаризации.

3.8. Проанализировать результаты проделанной работы и сделать выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое электромагнитная индукция?
2. Какова трактовка явления электромагнитной индукции Дж. Максвеллом?
3. Что такое закон Био-Савара?
4. Как изменяется магнитное поле при удалении от источника?
5. В чём заключается метод линеаризации при обработке данных?
6. Каковы нормы условий труда при воздействии электромагнитных полей радиочастотного диапазона?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Полупроводниковый диод

Цель работы: изучить основные свойства, характеристики и параметры полупроводниковых диодов и экспериментально исследовать их вольт - амперные характеристики (ВАХ).

1. Основные теоретические сведения

1.1. Физические процессы в $p-n$ -переходе

Основным элементом большинства полупроводниковых приборов является электронно-дырочный переход ($p-n$ -переход), представляющий собой переходный слой между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет электронную электропроводность, а другая — дырочную.

Образование $p-n$ перехода. $P-n$ переход в равновесном состоянии

Рассмотрим подробнее процесс образования $p-n$ перехода [8]. Равновесным называют такое состояние перехода, когда отсутствует внешнее напряжение. Напомним, что в p -области имеются два вида основных носителей заряда: неподвижные отрицательно заряженные ионы атомов акцепторной примеси \ominus и свободные положительно заряженные дырки; а в n -области имеются также два вида основных носителей заряда: неподвижные положительно заряженные ионы атомов акцепторной примеси \oplus и свободные отрицательно заряженные электроны.

До соприкосновения p и n областей электроны дырки и ионы примесей распределены равномерно. При контакте на границе p и n областей возникает градиент концентрации свободных носителей заряда и диффузия. Под действием диффузии электроны из n -области переходят в p и рекомбинируют там с дырками. Дырки из p -области переходят в n -область и рекомбинируют там с электронами. В результате такого движения свободных носителей заряда в пограничной области их концентрация убывает почти до нуля и в тоже время в p области образуется отрицательный пространственный заряд ионов акцепторной примеси, а в n -области положительный пространственный заряд ионов донорной примеси. Между этими зарядами возни-

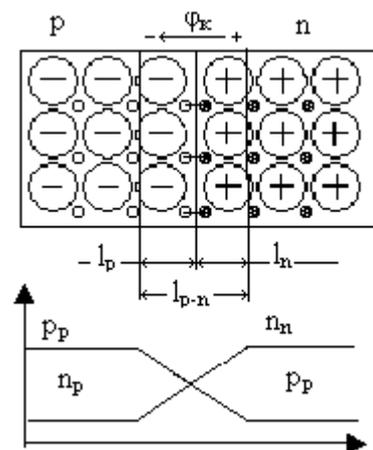


Рисунок 4.1

кает контактная разность потенциалов φ_k и электрическое поле E_k , которое препятствует диффузии свободных носителей заряда из глубины p - и n -областей через p - n -переход. Таким образом область, объединённая свободными носителями заряда со своим электрическим полем и называется p - n -переходом. P - n -переход характеризуется двумя основными параметрами: высотой потенциального барьера и шириной p - n -перехода.

Высота потенциального барьера. Она равна контактной разности потенциалов φ_k . Это разность потенциалов в переходе, обусловленная градиентом концентрации носителей заряда. Это энергия, которой должен обладать свободный заряд, чтобы преодолеть потенциальный барьер:

$$\varphi_k = \varphi_p - \varphi_n = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_b}{n_i^2} = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{p_n} = \varphi_T \ln \frac{p_p}{p_n}, \quad (4.1)$$

где k – постоянная Больцмана; e – заряд электрона; T – температура; N_a и N_b – концентрации акцепторов и доноров в дырочной и электронной областях соответственно; p_p и p_n – концентрации дырок в p - и n -областях соответственно; n_i – собственная концентрация носителей заряда в нелегированном полупроводнике, $\varphi_T = kT/e$ – температурный потенциал. При температуре $T = 27^\circ\text{C}$ $\varphi_T = 0,025$ В, для германиевого перехода $\varphi_k = 0,6$ В, для кремниевого перехода $\varphi_k = 0,8$ В.

Ширина p - n -перехода (рис. 4.1) – это приграничная область, обеднённая носителями заряда, которая располагается в p - и n -областях: $l_{p-n} = l_p + l_n$:

$$l_{p-n} = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\varphi_k}{e} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_D} \right)}, \quad (4.2)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость материала полупроводника; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная свободного пространства.

Толщина электронно-дырочных переходов имеет порядок (0,1-10) мкм. Если $N_A = N_D$, то $l_p = l_n$ и p - n -переход называется симметричным, если $N_A > N_D$ ($N_A < N_D$), то $l_p < l_n$ ($l_p > l_n$) и p - n -переход называется несимметричным, причём он в основном располагается в области полупроводника с меньшей концентрацией примеси.

В равновесном состоянии (без внешнего напряжения) через p - n переход движутся два встречных потока зарядов (протекают два тока). Это дрейфовый ток неосновных носителей заряда и диффузионный ток, который связан с основными носителями заряда. Так как внешнее напряжение отсутствует и тока во внешней цепи нет, то дрейфовый ток и диффузионный ток взаимно уравновешиваются, и результирующий ток равен нулю

$$I_{др} + I_{диф} = 0.$$

Это соотношение называют условие динамического равновесия процессов диффузии и дрейфа в изолированном (равновесном) $p-n$ -переходе.

Поверхность, по которой контактируют p - и n -области, называется металлургической границей. Реально она имеет конечную толщину – δ_m . Если $\delta_m \ll l_{p-n}$, то $p-n$ -переход называют резким. Если $\delta_m \gg l_{p-n}$, то $p-n$ -переход называют плавным.

Р-п переход при внешнем напряжении, приложенном к нему

Внешнее напряжение нарушает динамическое равновесие токов в $p-n$ -переходе. $P-n$ -переход переходит в неравновесное состояние. В зависимости от полярности напряжения приложенного к областям в $p-n$ -перехода возможно два режима работы.

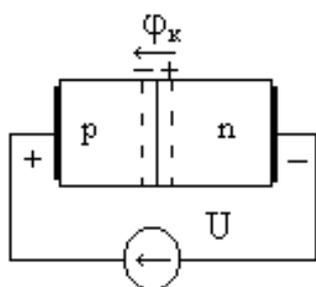


Рисунок 4.2

1) **Прямое смещение $p-n$ перехода.** $P-n$ -переход считается смещённым в прямом направлении, если положительный полюс источника питания подсоединен к p -области, а отрицательный к n -области (рис.2)

При прямом смещении напряжения ϕ_k и U направлены встречно, результирующее напряжение на $p-n$ -переходе убывает до величины $\phi_k - U$. Это приводит к

тому, что напряженность электрического поля убывает, и возобновляется процесс диффузии основных носителей заряда. Кроме того, прямое смещение уменьшает ширину $p-n$ -перехода, т.к. $l_{p-n} \approx (\phi_k - U)^{1/2}$. Ток диффузии, ток основных носителей заряда, становится много больше дрейфового. Через $p-n$ -переход протекает прямой ток

$$I_{p-n} = I_{пр} = I_{диф} + I_{др} \cong I_{диф}. \quad (3)$$

При протекании прямого тока основные носители заряда p -области переходят в n -область, где становятся неосновными. Диффузионный процесс введения основных носителей заряда в область, где они становятся неосновными, называется *инжекцией*, а прямой ток – диффузионным током или током инжекции. Для компенсации неосновных носителей заряда, накапливающихся в p и n -областях, во внешней цепи возникает электронный ток от источника напряжения, т.е. принцип электронейтральности сохраняется. При увеличении U ток резко возрастает: $I_{пр} = I_0 e^{U/\phi_T}$, ϕ_T – температурный потенциал, и может дости-

гать больших величин т.к. связан с основными носителями, концентрация которых велика.

2) **Обратное смещение** возникает, когда к p -области приложен минус, а к n -области плюс внешнего источника напряжения (рис.3).

Такое внешнее напряжение U включено также как ϕ_k . Оно увеличивает высоту потенциального барьера до величины $\phi_k + U$; напряженность электрического поля возрастает; ширина p - n перехода возрастает, т.к. $l_{p-n} \approx (\phi_k + U)^{1/2}$; процесс диффузии полностью прекращается, и через p - n -переход протекает дрейфовый ток, ток неосновных носителей заряда. Такой ток p - n -перехода называют обратным, а

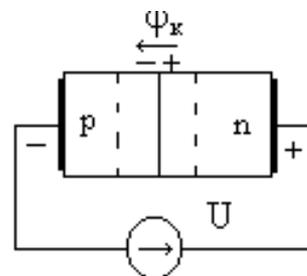


Рисунок 4.3

поскольку он связан с неосновными носителями заряда, которые возникают за счет термогенерации, то его называют тепловым током и обозначают I_0 , т.е.

$$I_{p-n} = I_{обр} = I_{диф} + I_{др} \cong I_{др} = I_0. \quad (4)$$

Этот ток мал по величине, т.к. связан с неосновными носителями заряда, концентрация которых мала. Таким образом, p - n -переход обладает односторонней проводимостью.

При обратном смещении концентрация неосновных носителей заряда на границе перехода несколько снижается по сравнению с равновесной. Это приводит к диффузии неосновных носителей заряда из глубины p - и n -областей к границе p - n -перехода. Достигнув ее, неосновные носители попадают в сильное электрическое поле и переносятся через p - n -переход, где становятся основными носителями заряда. Диффузия неосновных носителей заряда к границе p - n -перехода и дрейф через него в область, где они становятся основными носителями заряда, называется *экстракцией*. Экстракция и создает обратный ток p - n -перехода – это ток неосновных носителей заряда. Величина обратного тока сильно зависит: от температуры окружающей среды, материала полупроводника и площади p - n -перехода.

1.2. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый прибор с одним p - n -переходом, имеющий два омических вывода, называют *полупроводниковым диодом*. Одна из областей p - n -структуры (p^+), называемая эмиттером, имеет большую концентрацию основных носителей заряда, чем другая область, называемая базой. *Статическая вольтамперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода* изображена на

рис. 4.4. Здесь же пунктиром показана теоретическая ВАХ электронно-дырочного перехода, определяемая соотношением

$$I = I_0(e^{U/(m\phi_m)} - 1), \quad (4.5)$$

где I_0 – обратный ток насыщения (ток экстракции, обусловленный неосновными носителями заряда; значение его очень мало); U – напряжение на p - n -переходе; $\phi_m = kT/e$ – температурный потенциал (k – постоянная Больцмана, T – температура, e – заряд электрона); m – поправочный коэффициент: $m = 1$ для германиевых p - n -переходов и $m = 2$ для кремниевых p - n -переходов при малом токе).

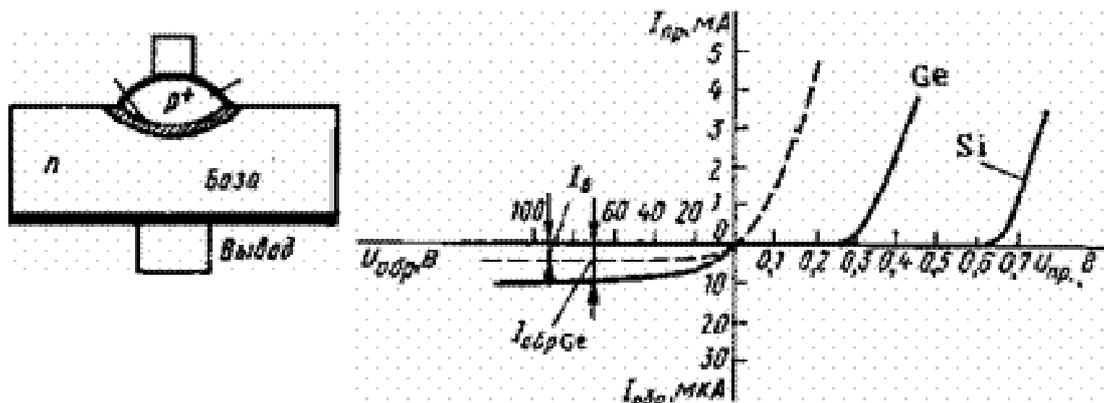


Рисунок 4.4

Кремниевые диоды имеют существенно меньшее значение обратного тока по сравнению с германиевыми вследствие более низкой концентрации неосновных носителей заряда. Обратная ветвь ВАХ у кремниевых диодов при данном масштабе практически сливается с осью абсцисс. Прямая ветвь ВАХ у кремниевых диодов расположена значительно правее, чем у германиевых.

Если через германиевый диод протекает постоянный ток, при изменении температуры падение напряжения на диоде изменяется приблизительно на 2,5 мВ/С:

$$dU/dT = -2,5 \text{ В/С}. \quad (4.6)$$

Максимально допустимое увеличение обратного тока диода определяет максимально допустимую температуру диода, которая составляет 80 – 100°C для германиевых диодов и 150 – 200°C для кремниевых. Минимально допустимая температура диода лежит в пределах 60 – 70°C.

Дифференциальным сопротивлением диода называют отношение приращения напряжения на диоде к вызванному им приращению тока:

$$r_{\text{диф}} = dU/dI \quad (4.7)$$

Тогда из (4.5) следует, что для p - n -перехода $r_{\text{диф}} @ \phi_m/I$.

Емкости диода. Принято говорить об общей емкости диода C_d , измеренной между выводами диода при заданном напряжении смещения и частоте.

Общая емкость диода равна сумме барьерной емкости C_b , диффузионной емкости $C_{диф}$ и емкости корпуса прибора C_k (рис. 4.5).

Барьерная (зарядная) емкость обусловлена нескомпенсированным объемным зарядом ионов примесей, сосредоточенными по обе стороны от границы $p-n$ -перехода.

Модельным аналогом барьерной емкости может служить емкость плоского конденсатора, обкладками которого являются p - и n -области, а диэлектриком служит $p-n$ -переход, практически не имеющий подвижных зарядов. Значение барьерной емкости колеблется от десятков до сотен пикофард; изменение этой емкости при изменении напряжения может достигать десятикратной величины.

Диффузионная емкость. Изменение величины объемного заряда неравновесных электронов и дырок, вызванное изменением прямого тока, можно рассматривать как следствие наличия так называемой диффузионной емкости, которая включена параллельно барьерной емкости.

Значения диффузионной емкости могут иметь порядок от сотен до тысяч пикофард. Поэтому при прямом напряжении емкость $p-n$ -перехода определяется преимущественно диффузионной емкостью, а при обратном напряжении – барьерной емкостью.

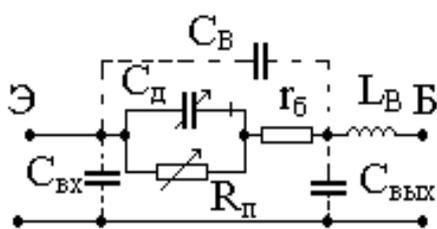


Рисунок 4.5

Схема замещения полупроводникового диода изображена на рис. 4.5. Здесь C_d – общая емкость диода, зависящая от режима; R_n – сопротивление перехода, значение которого определяют с помощью статической ВАХ диода ($R_n = U/I$); r_b – распределенное электрическое сопротивление базы диода и выводов.

Иногда схему замещения дополняют емкостью между выводами диода C_b , емкостями $C_{вх}$ и $C_{вых}$ (показаны пунктиром) и индуктивностью выводов L_b .

2. Задания на теоретические расчёты

1. Построить теоретическую ВАХ, представив её выражение согласно (4.5) для $m = 1$ в виде: $U = \phi_m \ln [I/I_0 + 1]$ и приняв $I_0 = 0,1$ мА, $\phi_m = 0,026$ В.

При построении прямой ветви подставить положительные значения токов от 0 до 10 мА (5-6 точек). Обратную ветвь ВАХ удобнее строить по формуле (8), подставляя значения обратных напряжений от 0 до –10 В и вычисля значения токов.

2. Определить значения дифференциального сопротивления диода в двух выбранных точках на прямой ветви ВАХ выпрямительного диода Д9Б по формуле (4.7).

3. Экспериментальная часть

3.1. Описание экспериментальной установки

Снятие вольт - амперной характеристики полупроводникового диода производится при помощи макета, внешний вид которого показан на рис. 4.6.

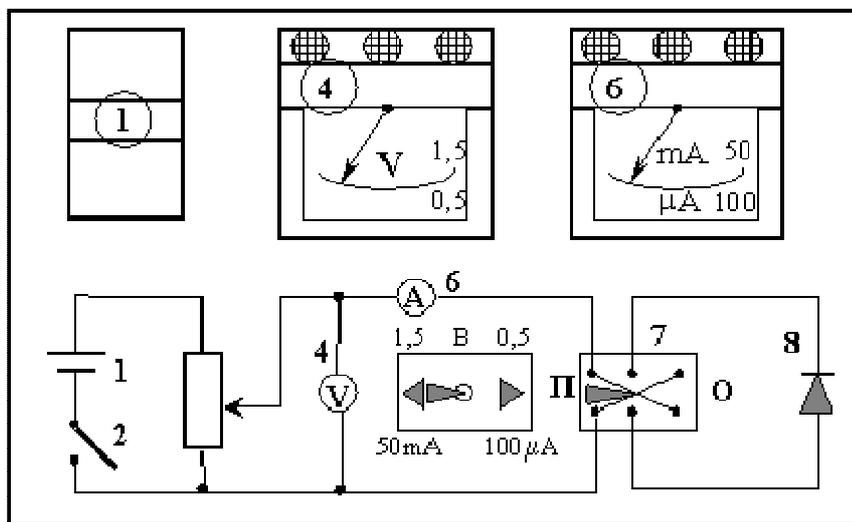


Рисунок 4.6

В верхней части макета расположены источник тока 1, вольтметр 4, амперметр 6. Вольтметр и амперметр имеют по две шкалы, то есть имеют по два диапазона измерений. Вольтметр: верхняя шкала – диапазон измерений от 0 до 1,5 вольт; нижняя шкала – диапазон измерений от 0 до 0,5

вольт. Амперметр: верхняя шкала – диапазон измерений от 0 до 50 миллиампер (mA); нижняя шкала – диапазон измерений от 0 до 100 микроампер (μA).

В дальнейшем верхние шкалы измерительных приборов будем называть первыми диапазонами, а нижние шкалы – вторыми диапазонами. Переключение диапазонов осуществляется переключателем (или тумблером) 5. При переключении тумблера влево включаются первые диапазоны вольтметра и амперметра, при переключении тумблера вправо включаются вторые диапазоны. Цепь замыкается тумблером 2. Напряжение в цепи регулируется поворотом ручки потенциометра 3. При вращении ручки 3 по часовой стрелке напряжение увеличивается, при вращении против часовой стрелки уменьшается. Напряжение на исследуемом диоде 8 измеряется вольтметром 4, а ток, текущий через диод, амперметром 6. Тумблером 7 можно осуществить либо прямое, либо обратное включение диода. При положении «П» ток через диод идет в прямом направлении, при положении «О» – в обратном.

3.2. Порядок выполнения работы

Задание 1. Снять статическую вольт - амперную характеристику (ВАХ) полупроводникового диода при прямом включении.

1. Установить ручку потенциометра 3 в крайнее левое положение.

2. Переключите вольтметр и амперметр на первый диапазон измерений (левое положение тумблера 5).

3. Переключите тумблер 7 в положение «П».

4. Тумблером 2 замкните цепь.

5. Осторожно вращая ручку потенциометра 3 по часовой стрелке, увеличивайте напряжение в цепи и через каждый 0,1 В записывайте в таблицу 1 показания амперметра и вольтметра. Напряжение увеличивайте до тех пор, пока показания амперметра не достигнет величины 40 или 50 мА. При этом необходимо снять примерно 8 показаний измерительных приборов.

6. Окончив измерения, установите ручку потенциометра 3 в крайнее левое положение и тумблером 2 разомкните цепь.

Таблица 4.1

$U, \text{В}$						
$I, \text{мА}$						

Задание 2. Снять вольтамперную характеристику полупроводникового диода при его обратном включении.

1. Переключите вольтметр и амперметр на второй диапазон измерений (правое положение тумблера 7).

2. Переключите тумблер 7 в положение «О».

3. Тумблером 2 замкните цепь.

4. Осторожно вращая ручку потенциометра 3 по часовой стрелке, увеличивайте напряжение в цепи. Через каждый 0,02 В записывайте в таблицу 2 показания амперметра и вольтметра. После достижения напряжением величины 0,1 В показания измерительных приборов снимать при значениях напряжения 0,2 В; 0,3 В; 0,4 В; 0,5 В.

5. Окончив измерения, установите ручку потенциометра 3 в крайнее левое положение и тумблером 2 разомкните цепь.

Таблица 4.1

$U, \text{В}$						
$I, \mu\text{А}$						

Задание 3. По полученным данным построить график $I_{np}(U_{np})$ и $I_{обр}(U_{обр})$, то есть вольтамперную характеристику диода, откладывая по горизонтальной оси вправо от начала координат прямое напряжение, а влево обратное; по вер-

тикальной оси откладывают вверх от начала координат прямой ток, а вниз – обратный.

Получается график, изображенный на рис. 2 (без соблюдения масштаба).

3.1. Рассчитать дифференциальное сопротивление диода по графику прямой ветви ВАХ по формуле $R_{\text{диф}} = \Delta U / \Delta I \Big|_{I_{\text{пр}} = \text{const}}$, при $I_{\text{пр}} = 8 \text{ мА}$. Проведите ту же процедуру для $I_{\text{пр}} = 4 \text{ мА}$, $I_{\text{пр}} = 2 \text{ мА}$ и $I_{\text{пр}} = 0,5 \text{ мА}$. Результаты расчетов запишите в отчет: $R_{\text{диф}} = \Delta U / \Delta I \Big|_{I_{\text{пр}} = 8 \text{ мА}} = \dots$. Построить график зависимости $R_{\text{диф}} = f(I_{\text{пр}})$.

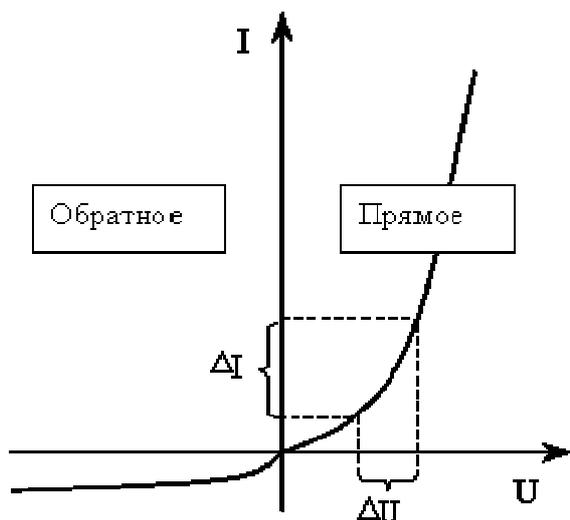


Рисунок 4.7

3.2. Вычислить статическое сопротивление диода на постоянном токе по формуле $R_{\text{стат}} = U_0 / I_0$ при $I_0 = 8 \text{ мА}$ и занесите результат в отчет.

3.3. Вычислить дифференциальное сопротивление диода при обратном напряжении 5, 10 В и запишите результаты в отчет.

Задание 4

4.1. Сравнить экспериментальную и расчётную ВАХ.

4.2. Сравнить экспериментальную и расчётную величину дифференциального сопротивления диода.

4.3. Сделать выводы.

Задание 5. Снять статическую вольт-амперную характеристику (ВАХ) диода, используя осциллограф. Это наиболее быстрый и удобный способ исследования ВАХ, непосредственно наблюдая ее на экране осциллографа.

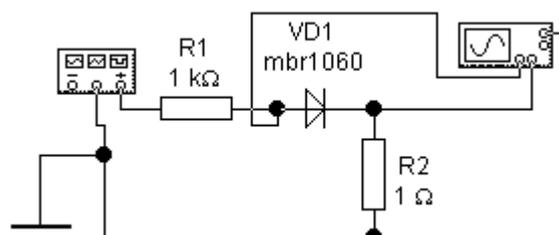


Рисунок 4.8

4.1. Собрать схему, приведенную на рис. 4.8.

4.2. Получить на экране осциллографа изображение ВАХ. Для этого: на выходе генератора установить треугольный сигнал с амплитудой 10 В, частотой 10 Гц и скважностью 50%.

Осциллограф поставить в режим В/А. При таком подключении координата точки луча по горизонтальной оси осциллографа будет пропорциональна напряжению, подаваемому на А-вход, а по вертикальной – току через диод. По-

сколько напряжение в вольтах на резисторе 1 Ом численно равно току через диод в амперах ($I = U/R = U/1 = U$), по вертикальной оси можно непосредственно считывать значения тока. Это и позволит получить вольтамперную характеристику непосредственно на экране осциллографа. Таким образом, ток и напряжение в каждой точке ВАХ вычисляются из соотношений: $I = Y K_{y \text{ канВ}}$, $U = X K_{y \text{ канА}}$, где Y, X – координата точки луча, в делениях шкалы осциллографа; $K_{y \text{ канА}}, K_{y \text{ канВ}}$ – масштабные множители осциллографа по оси Y каналов А и В, причем в размерности множителя канала В $K_{y \text{ канВ}}$ 1 мВ соответствует 1 мА.

Подобрать значения $K_{y \text{ канА}}, K_{y \text{ канВ}}$ так, чтобы луч не выходил за пределы экрана, а изображение ВАХ было по возможности максимальным. Осевые линии на сетке экрана совпадают с осями ВАХ.

4.3. Снять статическую ВАХ диода в режиме большого сигнала, когда амплитуда сигнала превышает максимальное допустимое обратное напряжение т.е. $U_m > |U_{\text{обр.max}}|$.

Установить на выходе генератора треугольный сигнал с амплитудой 40 В, смещением -10 В, частотой 1 Гц и получить на экране осциллографа изображение ВАХ (рис. 4.9).

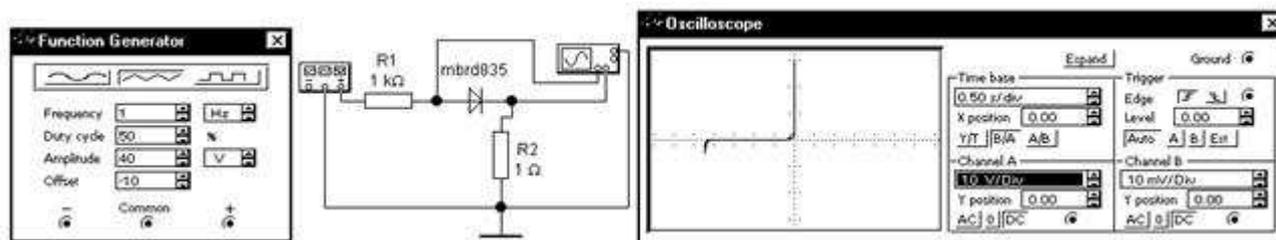


Рисунок 4.9

Зарисовать в отчет статическую ВАХ с нанесением по осям координат масштабов соответствующих значениям токов и напряжений. Определить максимальное допустимое обратное напряжение ($U_{\text{обр.max}}$).

4. Контрольные вопросы

1. Каковы отличия проводимости полупроводников и металлов?
2. Какие частицы являются *основными носителями заряда* в полупроводниках *n*-типа? Как создают полупроводники *n*-типа?
3. Какие частицы являются *основными носителями заряда* полупроводниках *p*-типа? Как создают полупроводники *p*-типа?
4. Чем объясняется большая температурная зависимость проводимости примесных полупроводников?

5. Что такое *p-n*-переход? Опишите процесс формирования *p-n*-перехода и причину его стабильности в отсутствии внешних воздействий.
6. Что такое *запирающий слой* и в чём состоит особенность электрического сопротивления этого слоя?
7. Какое подключение диода к источнику тока называют *прямым*, а какое – *обратным*?
8. Чем объясняется наличие тока (небольшой величины) через полупроводниковый диод при его обратном подключении к источнику тока?
9. Каково основное свойство и назначение полупроводникового диода?
10. Почему величина барьерной емкости зависит от приложенного напряжения?
11. Какова физическая природа диффузионной емкости *p-n*-перехода?
12. Перечислить основные параметры диодов.
13. Нарисовать схему и объяснить способ снятия ВАХ диодов с помощью амперметра и вольтметра.
14. Нарисовать схему и объяснить способ снятия ВАХ диодов с помощью осциллографа.
15. Чем отличаются ВАХ идеального *p-n*-перехода и реального диода.
16. Записать уравнение ВАХ выпрямительного диода, график ВАХ и его пояснение.
17. Дать определение дифференциального сопротивления диода и объяснить графически способ его определения.
18. Нарисовать ВАХ стабилитрона и определить рабочий участок ВАХ при стабилизации напряжения.
19. Нарисовать схему и объяснить работу однополупериодного выпрямителя.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Биполярный транзистор

Цель работы: изучить принцип действия биполярного транзистора и его основные параметры.

1. Теоретическая часть

1.1. Физические процессы в транзисторе

Устройство биполярного транзистора показано на рис.5.1. Он представляет собой полупроводниковый кристалл, в котором созданы три области, причём крайние из них имеют один тип проводимости, а средняя область – другой. Другое определение транзистора: это прибор с двумя переходами, у которых одна часть является общей. На рис. 5.1 один (эмиттерный) переход обозначен ЭП, а другой (коллекторный) – КП. Существуют два вида транзисторов: *n-p-n* (на рис. 5.1) и *p-n-p*. Средняя область транзистора называется базой, одна крайняя область называется эмиттером, другая – коллектором. Для работы транзистора необходимо выполнение условия

$$W_B < l_B, \quad (5.1)$$

где W_B – толщина базы, l_B – средняя длина диффузионного пробега неосновных носителей в области базы, т.е. средняя длина пути неосновных носителей от их возникновения до рекомбинации за счёт теплового движения. Для выполнения условия (5.1) область базы делается тонкой. Кроме того, концентрация носителей заряда в базе должна быть значительно меньше, чем в коллекторе и эмиттере. При анализе работы транзистора токи в цепях базы, эмиттера и коллектора обозначают соответственно I_B , $I_Э$, I_K .

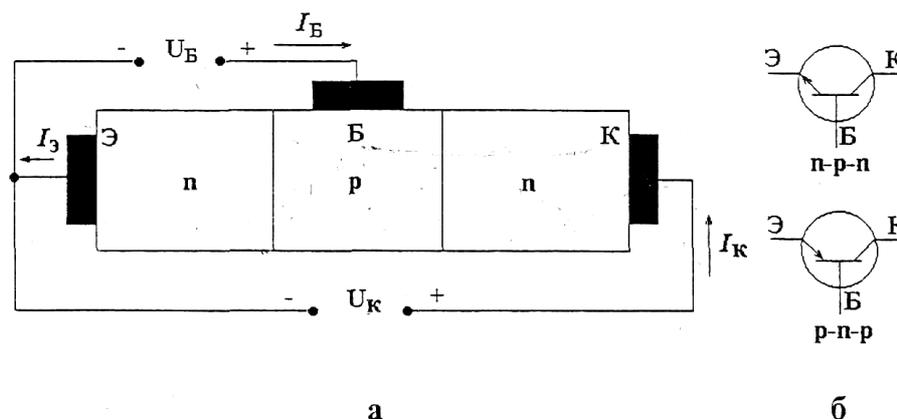


Рисунок 5.1

Рассмотрим как работает транзистор в статическом режиме (без нагрузки). Когда включены только источники постоянных питающих напряжений U_K и U_B . Полярность включения источника U_B такова, что на эмиттерный переход подаётся прямое напряжение. Поэтому для получения нормального тока через этот

переход достаточно напряжения порядка десятых долей вольта. Источник U_K включен между эмиттером и коллектором и, следовательно, напряжение U_K приложено к обоим переходам, причём полярность этого напряжения такова, что коллекторный переход включен в обратном направлении. Поскольку сопротивление коллекторного перехода, включенного в обратном направлении, очень велико, то можно считать, что напряжение на коллекторном переходе равно U_K .

При подаче входного прямого напряжения U_B понижается потенциальный барьер в эмиттерном переходе и возникает ток через этот переход I_E . При этом электроны поступают (инжектируются) из эмиттера в базу, а затем за счёт диффузии движутся через базу к коллекторному переходу. Электроны в базе являются неосновными носителями. Электроны, достигшие коллекторного перехода, ускоряются электрическим полем этого перехода и поступают в коллектор. В результате через транзистор течёт ток, называемый коллекторным I_K . Если условие (5.1) выполнено, то большинство электронов, проходя через базу, не успевают рекомбинировать с дырками базы и достигает коллекторного перехода. Лишь небольшая часть электронов рекомбинирует в базе. Так как в установленном режиме концентрация дырок в базе должна быть неизменной, а при рекомбинации некоторое количество дырок каждую секунду исчезает, то такое же количество дырок возникает за счёт того, что из базы уходит к плюсу источника U_B такое же количество электронов. Поскольку ток коллектора меньше тока эмиттера, то в соответствии с первым законом Кирхгофа

$$I_E = I_K + I_B. \quad (5.2)$$

Практически I_B составляет не более 10 процентов тока эмиттера, поэтому

$$I_E \sim I_K. \quad (5.3)$$

Для того, чтобы ток в базе был как можно меньше, базу, как мы уже говорили, делают тонкой и уменьшают в ней концентрацию примесей, которая определяет концентрацию дырок в ней. При этом меньшее количество электронов будет рекомбинировать в базе.

1.2. Характеристики и параметры транзисторов

Зависимости между токами и напряжениями в транзисторах выражаются их статическими характеристиками. Наиболее удобно рассматривать семейство входных характеристик

$$I_B = f(U_B) \text{ при } U_K = const$$

и выходных

$$I_K = f(U_K) \text{ при } I_B = const.$$

Рассмотрим основные характеристики для схемы с общим эмиттером. На рис. 5.2 приведены входные характеристики $I_B = f(U_B)$ при $U_K = const$. Характе-

ристика для $U_K = 0$ идёт из начала координат, так как ток отсутствует при нулевых напряжениях. Изменения U_K мало влияют на ток в базе, поэтому входные характеристики для разных значений $U_K > 0$ расположены очень близко друг к другу. Поэтому в справочниках приводится обычно лишь одна входная характеристика для некоторого рекомендуемого значения U_K . Семейство выходных характеристик $I_K = f(U_K)$ показано на рис. 5.3 для различных постоянных значений входного тока базы. При увеличении U_K характеристики идут с небольшим подъёмом, что означает сравнительно малое влияние U_K на ток коллектора.

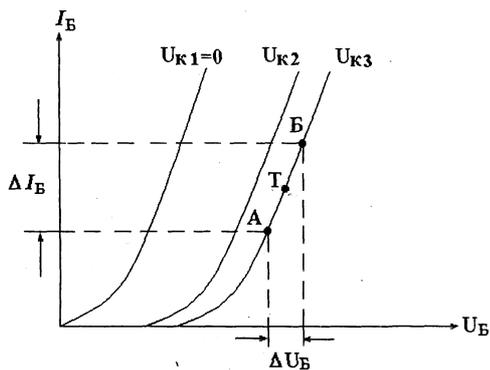


Рисунок 5.2.

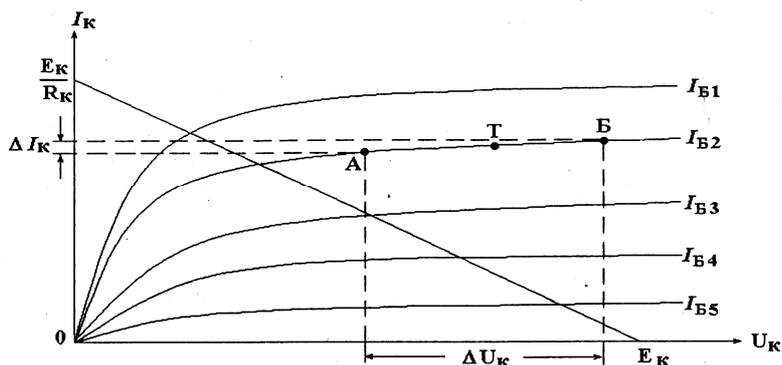


Рисунок 5.3

Хотя для расчёта схем с транзисторами достаточно иметь входные и выходные характеристики, иногда пользуются ещё характеристиками передачи или переходными характеристиками, которые показывают зависимость

$$I_K = f(I_B) \text{ при } U_K = const.$$

Эти характеристики для двух различных значений напряжения даны на рис. 5.4. Из рисунка видно, что между токами I_K и I_B зависимость близка к линейной.

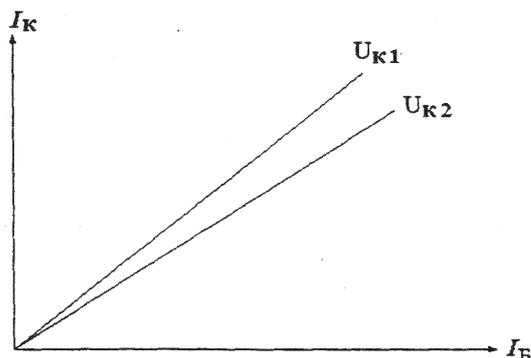


Рисунок 5.4

Изменение напряжения U_K мало влияет на I_K , и характеристики передачи для различных U_K расположены очень близко друг к другу. Поэтому в справочниках проводятся обычно лишь одна из характеристик для некоторого среднего значения U_K .

На основе представленных характеристик вычисляются параметры, которые используются при расчётах усилительных схем на транзисторах.

1. Входное сопротивление

$$R_{вх} = \frac{dU_B}{dI_B}, U_K = const. \quad (5.4)$$

В справочниках эта величина обозначается h_{11} . Так как входная характеристика транзистора имеет резко выраженный нелинейный характер, то эти величины определяются при заданных U_B и I_B .

2. Коэффициент усиления по току β (в справочниках h_{11})

$$\beta = \frac{dI_K}{dI_B}, U_K = const. \quad (5.5)$$

представляет собой тангенс угла наклона зависимости $I_K = f(I_B)$. Поскольку эта зависимость близка к линейной, величина β практически постоянна.

3. Выходное сопротивление транзистора

$$R_{\text{вых}} = \frac{dU_K}{dI_K}, I_B = const. \quad (5.6)$$

В справочниках приводится величина, обратная $R_{\text{вых}}$, она обозначается h_{22}

$$h_{22} = \frac{1}{R_{\text{вых}}} = \frac{dI_K}{dU_K}, I_B = const. \quad (5.7)$$

2. Экспериментальная часть

Макет установки для снятия характеристик транзистора представлен на рис. 5.5.

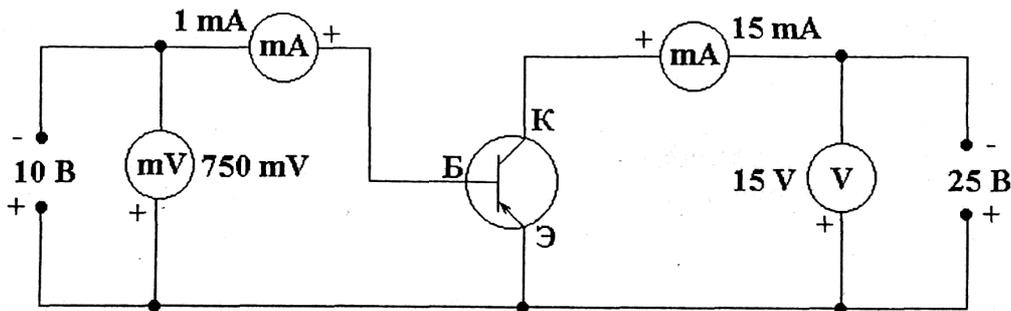


Рисунок 5.5

Задание 1. По заданному значению максимальной мощности рассчитать и построить кривую предельной мощности. Для этого определить максимальные значения тока коллектора $I_{K\text{max}}$ при следующих величинах коллекторного напряжения: 4 В, 6 В, 8 В, 10 В, 12 В, 14 В и 16 В и вычислить соответственно значения предельной мощности.

Задание 2. Снять входные характеристики транзистора $I_B = f(U_B)$ для значений коллекторного напряжения $U_K = 5$ В. Значения входного напряжения изменять через 50 мВ, при этом следить, чтобы ток коллектора не превышал $I_{K\text{max}}$. Результаты занести в таблицу. Построить график.

Задание 3. Используя входную характеристику для $U_K = 5$ В, определить входное сопротивление транзистора при $I_B = 0,5$ мА (рисунок 5.2).

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_B}{\Delta I_B}$$

Задание 4. Снять семейство выходных характеристик $I_K = f(U_K)$ при $I_B = 0, 20, 40, 60, 81$ мА. U_K менять от 0,5 до 15 В. Следить, чтобы напряжение

на коллекторе не превышало 15 В, а $P_K = I_K \cdot U_K$ не превышало P_{Kmax} . Результаты занести в таблицу, построить график.

Таблица 5.1

I_B , мА	U_K , В	0,5	1	2	3	4	5	7	9	11	13	15
0,2	I_K , мА											
0,4	I_K , мА											
0,6	I_K , мА											
0,8	I_K , мА											
1,0	I_K , мА											

Задание 5. Определить выходное сопротивление при $U_K = 7$ В, $I_B = 0,6$ мА (рисунок 5.3).

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_K}{\Delta I_K}$$

Задание 6. Снять характеристику передачи $I_K = f(I_B)$ при $U_K = 5, 10$ В, I_B изменять через 0,1 мА от 0 до 1 мА.

Результаты занести в таблицу. Построить график.

Таблица 5.2

U_K , В	I_B , мА	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
5	I_K , мА										
10	I_K , мА										

Задание 7. Определить коэффициент передачи тока $\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$, $U_K = 5$ В, $I_B = 0,6$ мА.

Основные данные транзистора МП-26:

$$U_{Kmax} = 15 \text{ В}$$

$$I_{Kmax} = 50 \text{ мА}$$

$$P_{Kmax} = 200 \text{ мВт}$$

3. Контрольные вопросы

1. Назначение и устройство биполярного транзистора.
2. Типы транзисторов и их условные обозначения.
3. Принцип работы биполярного транзистора.
4. Основные характеристики биполярных транзисторов.
5. Параметры транзисторов и методика их определения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Усилительный каскад на биполярном транзисторе

Цель работы: рассчитать, собрать и исследовать усилительный каскад на биполярном транзисторе.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Схема и принцип работы усилительного каскада

Для усиления электрических сигналов в цепь коллектора транзистора включается нагрузка (в простейшем случае активная), а входной сигнал подается в цепь базы транзистора (рисунок 6.1).

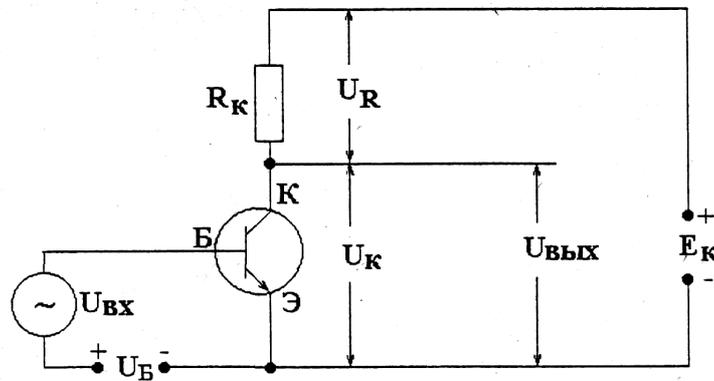


Рисунок 6.1

При включении источников напряжения E_K и U_B через транзистор будет течь ток I_{K0} . Если теперь на вход усилительного каскада подать переменное напряжение, то ток через транзистор будет изменяться в соответствии с $U_{вх}$. Это приведет к изменению напряжения на нагрузке R_K , в результате чего будет изменяться напряжение U_K на коллекторе транзистора (относительно общего провода). Переменная составляющая коллекторного напряжения представляет собой выходной сигнал $U_{вых}$.

Выразим коэффициент усиления каскада через параметры транзистора и параметры схемы.

Напряжение на базе транзистора

$$U_B = U_{вх} + U_{B0}, \quad (6.1)$$

U_{B0} – постоянное напряжение на базе транзистора.

Поскольку $U_{вх}$ изменяется, то ток через транзистор можно представить в виде:

$$I_K = I_{K0} + i_K, \quad (6.2)$$

i_K – переменная составляющая тока через транзистор.

Изменение тока приводит к изменению напряжения на коллекторе и можно считать, что:

$$U_K = U_{K0} + U_{\text{ВЫХ}}, \quad (6.3)$$

U_{K0} – постоянное напряжение на коллекторе транзистора.

Если амплитуда входного и выходного напряжения мала по сравнению с постоянным напряжением на базе и коллекторе (режим малого сигнала), то можно считать:

$$\begin{aligned} U_{\text{ВХ}} &= dU_B & U_B &= U_{B0} + dU_B \\ U_{\text{ВХ}} &= dU_K & U_K &= U_{K0} + dU_K \\ i_K &= dI_K & I_K &= I_{K0} + dI_K \end{aligned}$$

Из рисунка 6.1 видно, что

$$U_K + U_R = E_K, \quad (6.4)$$

где U_K – напряжение на транзисторе, U_R – напряжение на нагрузке, E_K – напряжение питания.

При расчетах считаем напряжение питания постоянным, $E_K = \text{const.}$ Дифференцируя (6.4), получим:

$$dU_K = -dU_R. \quad (6.5)$$

Используя закон Ома и зная, что токи через транзистор и резистор R_K одинаковы (последовательное включение), можно записать

$$U_R = I_K R_K. \quad (6.6)$$

Подставляя это выражение в (6.5), получим

$$dU_R = -R_K dI_K. \quad (6.7)$$

Из этого выражения следует, что при увеличении тока через транзистор напряжение на его коллекторе уменьшается (относительно общего провода). Поскольку увеличение входного напряжения увеличивает ток через транзистор, это означает, что входное и выходное напряжения изменяются в противофазе.

1.2. Коэффициент усиления каскада с активной нагрузкой

Коэффициентом усиления по напряжению называется отношение амплитуды выходного напряжения к амплитуде входного.

$$k = \frac{U_{0\text{ВЫХ}}}{U_{0\text{ВХ}}} \quad (6.8)$$

k – коэффициент усиления по напряжению, $U_{0\text{ВЫХ}}$ – амплитуда выходного напряжения, $U_{0\text{ВХ}}$ – амплитуда входного напряжения.

Поскольку входное и выходное напряжение противофазны, то выражение (6.8) можно записать в виде

$$k = -\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \quad (6.9)$$

с учетом (6.7)

$$k = -\frac{dU_{\text{К}}}{dU_{\text{Б}}} = \frac{dI_{\text{К}} R_{\text{К}}}{dU_{\text{Б}}} \quad (6.10)$$

Введем понятие входного сопротивления транзистора

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{dU_{\text{Б}}}{dI_{\text{Б}}} \quad (6.11)$$

$I_{\text{Б}}$ – ток в цепи базы. Тогда

$$dU_{\text{Б}} = R_{\text{ВХ}} \cdot dI_{\text{Б}}. \quad (6.12)$$

Подставляя в (6.10) получим

$$k = \frac{dI_{\text{К}} R_{\text{К}}}{dI_{\text{Б}} R_{\text{ВХ}}}. \quad (6.13)$$

Поскольку

$$\frac{dI_{\text{К}}}{dI_{\text{Б}}} = \beta,$$

где β – статический коэффициент усиления транзистора по току, то

$$k = \beta \frac{R_{\text{К}}}{R_{\text{ВХ}}}. \quad (6.14)$$

Видно, что коэффициент усиления пропорционален сопротивлению нагрузки и статическому коэффициенту усиления по току.

1.3. Практические схемы транзисторных каскадов

При конструировании практических схем транзисторных каскадов необходимо обеспечить:

- заданный коэффициент усиления k ;
- заданный постоянный ток через транзистор $I_{\text{К0}}$;
- температурную стабилизацию тока, т.е. малую зависимость $I_{\text{К0}}$ при изменении окружающей температуры.

Рассмотрим две наиболее часто используемых схемы транзисторных каскадов. При этом считаем заданным напряжение питания $E_{\text{К}}$ и известными параметры транзистора β и $R_{\text{ВХ}}$ (приводятся в справочниках).

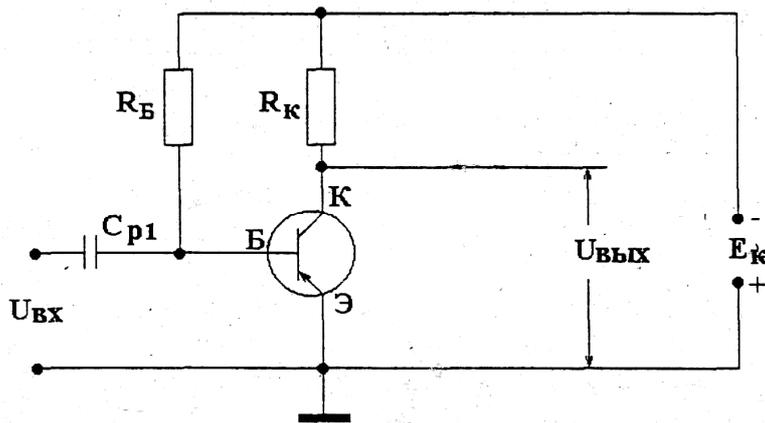


Рисунок 6.2

В схеме, изображенной на рисунке 6.2, коэффициент усиления определяется резистором R_K . Если коэффициент усиления задан, то величину этого резистора можно рассчитывать по формуле (6.14). Постоянный ток через транзистор определяется величиной резистора R_B .

Можно видеть (рисунок 6.2), что напряжение на резисторе R_B равно $E_K - U_{ЭБ0}$, где $U_{ЭБ0}$ – постоянное напряжение между эмиттером и базой транзистора.

Поэтому

$$I_{Б0} = \frac{E_K - U_{ЭБ0}}{R_B}. \quad (6.15)$$

Поскольку $U_{ЭБ0}$ – напряжение на $p-n$ -переходе, включенном в прямом направлении, мало ($U_{ЭБ0} \ll E_K$), то

$$I_{Б0} = \frac{E_K}{R_B}. \quad (6.16)$$

Так как $I_{К0} = \beta I_{Б0}$, то

$$I_{К0} = \beta \frac{E_K}{R_B}. \quad (6.17)$$

Формула позволяет рассчитывать величину резистора R_B по известному $I_{К0}$. Поскольку β слабо зависит от температуры, а ток базы поддерживается постоянным за счет резистора R_B , то в данной схеме ток $I_{К0}$ мало зависит от температуры, т.е. данная схема обеспечивает температурную стабилизацию тока через транзистор.

Достоинством этой схемы является малое количество элементов, а недостатком является то, что резистор R_B рассчитывается (или подбирается) для каждого конкретного транзистора. Поэтому такая схема редко используется при промышленном производстве радиоаппаратуры.

Гораздо чаще используется схема, приведенная на рисунке 8.

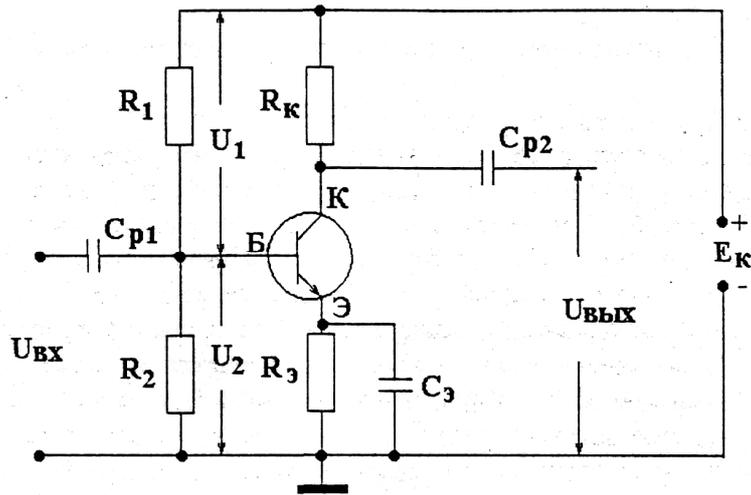


Рисунок 6.3

Коэффициент усиления определяется сопротивлением резистора R_K , величину которого рассчитывают по формуле (6.14).

Напряжение на базе транзистора (относительно общего провода) поддерживается постоянным с помощью делителя напряжения, образованного резисторами R_1 и R_2 . Для того, чтобы это напряжение мало зависело от тока базы, ток через резисторы (ток делителя I_d) должен быть достаточно велик.

$$I_d \gg I_{Б0}$$

На практике $I_d = (3 \div 5) I_{Б0}$. Напряжение U_2 выбирают из условия

$$U_{ЭБ0} \ll U_2 \ll E_K. \quad (6.18)$$

Обычно это напряжение равно нескольким вольтам. Расчет схемы производят следующим образом.

По заданному I_{K0} определяют $I_{Б0}$

$$I_{Б0} = \frac{I_{K0}}{\beta}. \quad (6.19)$$

Из условий, приведенных выше, выбирают ток делителя I_d и напряжение U_2 . Через резистор R_2 протекает только ток делителя и напряжение на нем равно U_2 , поэтому

$$R_2 = \frac{U_2}{I_{Б0}}. \quad (6.20)$$

Через резистор R_1 протекают токи I_d и $I_{Б0}$ и напряжение на нем

$$U_1 = E - U_2, \text{ поэтому}$$

$$R_1 = \frac{E - U_2}{I_{Б0} + I_d}. \quad (6.21)$$

Величина тока через транзистор будет определяться величиной резистора R_3

$$I_{Э0} = I_{К0} = \frac{U_2 - U_{ЭБ0}}{R_3}. \quad (6.22)$$

Из формулы (6.22) с учетом (6.18) можно найти величину резистора R_3 :

$$R_3 = \frac{U_2}{I_{К0}}. \quad (6.23)$$

Резистор R_3 обеспечивает температурную стабилизацию тока через транзистор. Увеличение тока приводит к увеличению напряжения на эмиттере (относительно общего провода). Поскольку $U_2 = const$, то разность потенциалов между базой и эмиттером транзистора уменьшается и, следовательно, уменьшается ток через транзистор. В то же время наличие резистора R_3 приводит к появлению отрицательной обратной связи, что эквивалентно уменьшению коэффициента усиления. Для уменьшения этого эффекта параллельно резистору R_3 включает конденсатор из условия:

$$R_3 \ll \frac{1}{\omega_H C_3}, \quad (6.24)$$

где $\omega_H = 2\pi f_H$ – нижняя граничная частота.

1.4. Полоса пропускания транзисторного каскада

Полосой пропускания называется интервал частот, в пределах которого коэффициент усиления уменьшается не более чем в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с максимальным значением.

Частоты, соответствующие уменьшению коэффициента усиления в $\sqrt{2}$ раз, называются верхней и нижней граничными частотами.

Примерный вид частотной характеристики приведен на рисунке 6.4.

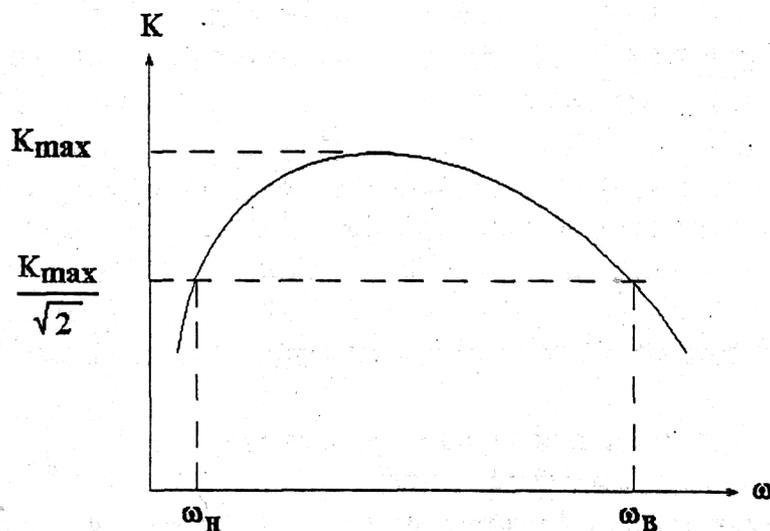


Рисунок 6.4

Нижняя граничная f_n частота определяется входным сопротивлением каскада и емкостью разделительного конденсатора.

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_{вх} C_{р1}}, \quad (6.25)$$

$R_{вх}$ – входное сопротивление каскада.

Приближенно можно считать, что входное сопротивление каскада равно входному сопротивлению транзистора.

Верхняя граничная частота f_b зависит от соотношения активной и емкостной составляющих нагрузки.

$$f_b = \frac{\omega_b}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_n C_n}. \quad (6.26)$$

При этом сопротивление R_n нагрузки складывается из трех составляющих: выходного сопротивления транзистора, сопротивления внешней нагрузки и сопротивления резистора R_k , включенных параллельно.

Емкость нагрузки складывается из выходной емкости транзистора, емкости монтажа и емкости внешней нагрузки. Кроме того, в расчете схем следует учитывать частотные свойства транзистора.

2. Экспериментальная часть

2.1. Задание на лабораторную работу

- 1) рассчитать усилительный каскад с активной нагрузкой на биполярном транзисторе (рисунок 6.2);
- 2) собрать схему и снять амплитудную и частотную характеристики каскада;
- 3) используя полученные характеристики, определить коэффициент усиления и верхнюю и нижнюю граничные частоты.

2.2. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Для заданного коэффициента усиления $k = 50$ рассчитать величину резистора R_k по формуле (6.14), используя параметры транзистора из лабораторной работы 5.
2. Построить на семействе выходных характеристик нагрузочную прямую (рисунок 5.3) и выбрать рабочую точку на пересечении с кривыми семейства, исходя из условия, что постоянное напряжение на коллекторе примерно равно половине напряжения питания. Напряжение питания $E_k = 15$ В.
3. Определить для рабочей точки ток базы $I_{б0}$.
4. Рассчитать величину резистора R_b по формуле (6.16).

5. Рассчитать емкость разделительного конденсатора по формуле (6.25).
Нижняя граничная частота $f_n = 100$ Гц.
6. Рассчитать верхнюю граничную частоту f_v для емкостной нагрузки $C_n = 0,01$ мкФ по формуле (6.26) $R_n = R_k$.
7. Собрать схему усилительного каскада. Источником входного напряжения является звуковой генератор ГЗЗ-33. Выходное напряжение измеряется электронным вольтметром ВЗ-7. Внешней нагрузкой является конденсатор $C = 0,01$ мкФ.
8. Снять амплитудную характеристику усилителя $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$, $f = 1000$ Гц. $U_{\text{вх}}$ менять от 0 до 10 мВ через 1 мВ. Построить график. По графику определить коэффициент усиления k . Сравнить полученное значение с расчетным.
9. Снять частотную характеристику усилителя для емкостной нагрузки $C_n = 0,01$ мкФ, $U_{\text{вх}} = 5$ мВ.
10. Построить график частотной зависимости в полулогарифмическом масштабе $U_{\text{вых}} = f(\lg f)$. По графику определить f_n, f_v . Сравнить с расчетными.

3. Контрольные вопросы

1. Схема и принцип работы усилительного каскада на биполярном транзисторе.
2. Чему равен коэффициент усиления для каскада с активной нагрузкой на биполярном транзисторе?
3. Что такое амплитудная характеристика усилителя?
4. Что такое частотная характеристика и полоса пропускания усилителя?
5. Что такое верхняя и нижняя граничные частоты и как они рассчитываются для каскада на биполярном транзисторе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Изучение характеристик лазера и его использование для измерения размеров микрочастиц в матрице

Цель работы: ознакомление с принципом работы гелий-неонового лазера и изучение характеристик лазерного излучения. Измерение с помощью лазера размеров микрочастиц в матрице.

1. Основные теоретические сведения

Слово «Лазер» составлено из первых букв английского словосочетания «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» – усиление света с помощью индуцированного излучения.

В He-Ne лазере используются принцип резонансной передачи энергии возбуждения от примесного газа (He) основному (Ne) [9]. Диаграмма энергетических уровней гелия и неона приведена на рис. 7.1.

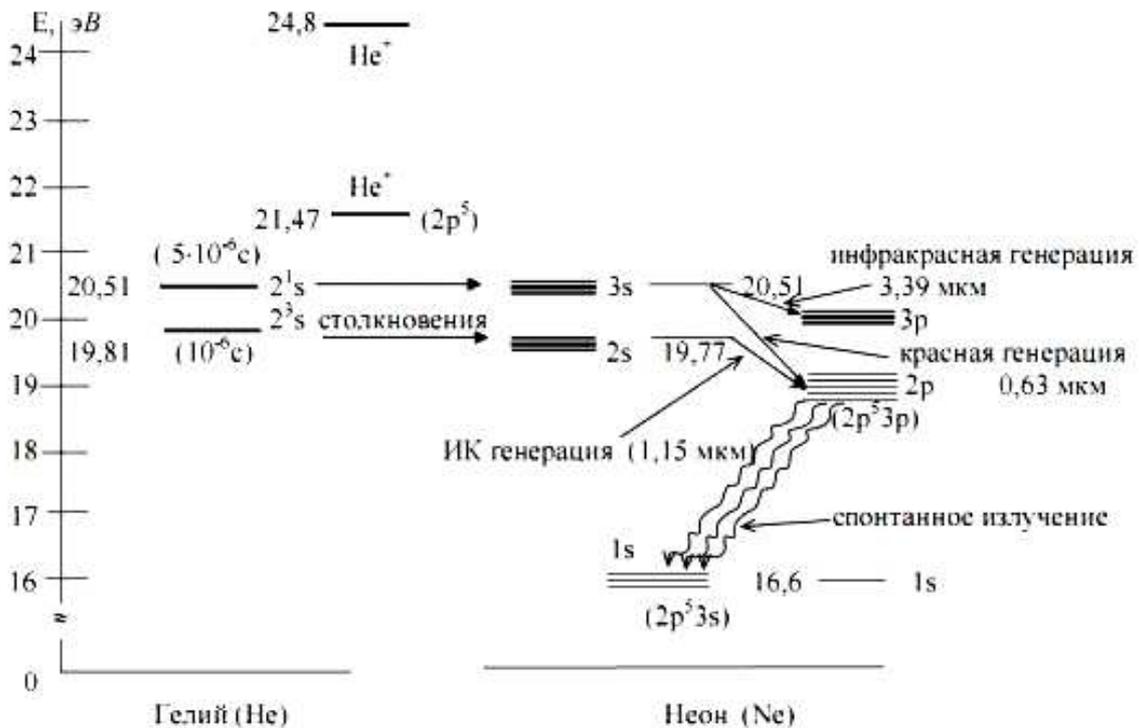


Рисунок 7.1 – Энергетические уровни He-Ne лазера

Для данной смеси газов условия резонансной передачи энергии выполняются для уровней

$$2^1s (\text{He}) \rightarrow 3s (\text{Ne}), \quad 2^3s (\text{He}) \rightarrow 2s (\text{Ne}). \quad (7.1)$$

В результате газового разряда уровни 2^1s и 2^3s заселяются за счет электронных ударов. При неупругих столкновениях возбужденных атомов гелия с атомами неона происходит возбуждение последних и заселение метастабильных уровней $2s$ и $3s$:



Хотя уровни $2p$ и $3p$ неона также заселяются за счет электронных ударов, что уменьшает разность населенности уровней $2s$, $3s$ и $2p$, $3p$, но эффективность этого процесса мала по сравнению с процессом (7.2). Это достигается тем, что парциальное давление неона (~ 10 Па) много меньше парциального давления гелия (~ 100 Па), поэтому концентрация гелия значительно превышает концентрацию неона.

За счет дефекта энергий уровней ($2^1s \rightarrow 2s$), значительно превышающего величину kT , результат процесса (7.2) далек от желаемого. Однако это компенсируется большим временем жизни возбужденных атомов Ne на уровнях $2s$ и $3s$, состоящих из четырех подуровней, по сравнению с уровнями $2p$ и $3p$. Например, время жизни неона на уровне $2s_2$ составляет $9,6 \cdot 10^{-8}$ с, а время жизни на уровне $2p_4 - 1,2 \cdot 10^{-8}$ с.

При осуществлении инверсной заселенности уровней $2s$ и $3s$ происходят излучательные переходы на уровни $2p$ и $3p$ со следующими длинами волн:

$$2s_2 \rightarrow 3p_4 \lambda_2 = 3,39 \text{ мкм}$$

$$3s_2 \rightarrow 2p_4 \lambda_3 = 0,6328 \text{ мкм}$$

«Отработанные» атомы переходят за счет спонтанного излучения с уровней $3p$ и $2p$ на метастабильный уровень $1s$. Сток частиц с уровня $1s$ обеспечивается, в основном, за счет диффузии к стенкам.

Схема конструкции газового лазера приведена на рис. 7.2.

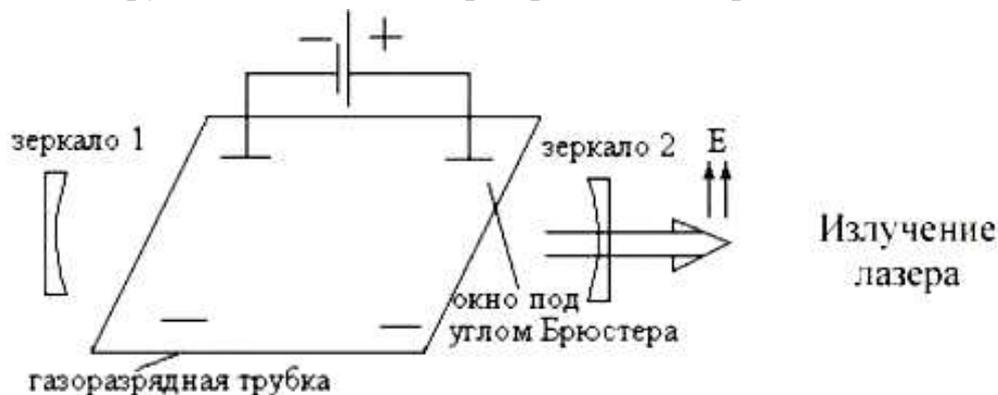


Рисунок 7.2 – Схема конструкции He-Ne лазера с внешними зеркалами

В газоразрядной трубке, заполненной смесью неона и гелия в пропорции 1:10, зажигается газовой разряд, с помощью которого происходит инверсия населенности уровней.

Поскольку в процессе разряда появляются фотоны с произвольными частотами, существуют и фотоны с длинами волн λ_1 , λ_2 и λ_3 , совпадающими с длинами волн соответствующих переходов. Они вызывают индуцированный переход с образованием фотонов с этими же частотами, фазами и направлениями волновых векторов k' . В случае, если появляется волна с частотой, например, $\omega_3 = c/\lambda_3$, она распространяется вдоль трубки и отражается от зеркала. Расстоя-

ние между зеркалами выбирается кратным половине длины волны, что обеспечивает возбуждение резонатора (колебательного контура в оптическом диапазоне) именно на этой длине волны.

Отраженная от зеркал волна приходит в данную точку в той же фазе, что и первичная, обеспечивая положительную связь. Происходит накопление фотонов, то есть энергии монохроматической волны. Ввиду высокой добротности контура, достигающей десятков тысяч единиц, амплитуда колебаний становится достаточно большой. Наличие выходных окон газоразрядной трубки, расположенных под углом Брюстера, выделяет линейную поляризацию волн в определенной плоскости, поэтому волны с иной поляризацией не проходят через полупрозрачное зеркало 2, которое пропускает всего 4-5% интенсивности излучения, а остальные 96% идут на поддержание процесса генерации.

Увеличение потерь излучения на волне λ_2 (усиление на переходе $2s_2 \rightarrow 3p_1$ велико по сравнению с усилением на переходе $3s_2 \rightarrow 2p_4$) достигается как использованием окон, расположенных под углом Брюстера, так и соответствующей расстройкой резонатора. Однако наличие этого излучения снижает эффективность работы лазера в видимом оптическом диапазоне.

2. Экспериментальная часть

2.1. Принадлежности к лабораторной работе

Лабораторная установка (рис. 7.3) представляет собой газовый He-Ne лазер 1 (например, ЛГН-10 Б), который установлен на оптической скамье 2. Блок питания 3 лазера расположен отдельно. На держателе 4 расположен горизонтальный столик 5, на который в ходе выполнения работы устанавливаются следующие детали: дифракционная решетка 6; экран 7; матрица с микрочастицами 8. Стационарный экран 9 должен быть расположен на расстоянии не менее 1,5 м от лазера.

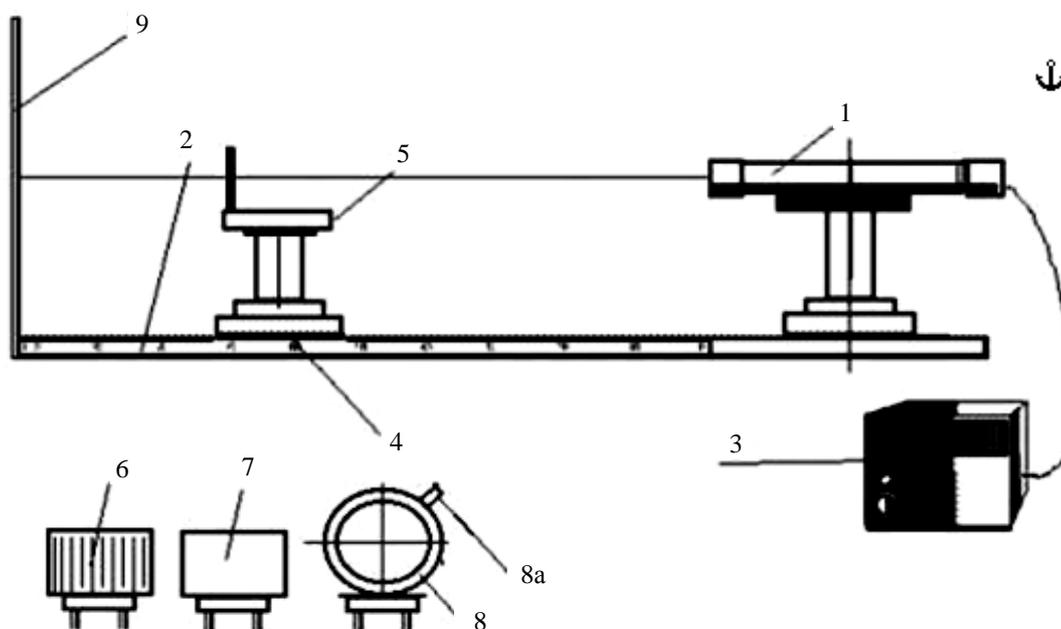


Рисунок 7.3 – Схема лабораторной установки
2.2.. Методика измерений

Определение длины волны излучения лазера

После прохождения через дифракционную решетку лазерного луча на экране возникает дифракционная картина пятен, соответствующих главным дифракционным максимумам нулевого, первого, второго и т.д. порядков (рис. 7.4).

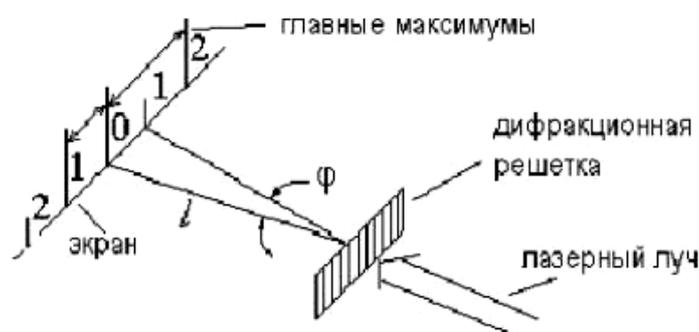


Рисунок 7.4 – Схема измерения длины волны излучения

Длина волны излучения определяется из условия главных дифракционных максимумов

$$d \sin \varphi = k\lambda, \tag{7.3}$$

где d – постоянная дифракционной решетки, φ – угол дифракции, k – порядок дифракционного спектра, λ – длина волны.

Угол дифракции вычисляется по формуле

$$\varphi = \text{arctg } h_i/l \tag{7.4}$$

Здесь l – расстояние между экраном и дифракционной решеткой, h_i – расстояние между нулевым и i -ым максимумами ($i = 1, 2, \dots$).

По формуле (7.3) вычисляется длина волны излучения.

Оценка направленности излучения лазера

Малое угловое расхождение лазерного луча можно оценить, помещая экраны на разных расстояниях от лазера и измеряя радиус пятна излучения. Зная расстояние l между экранами и диаметры d световых пятен на экранах, можно определить угловое расхождение светового пучка по формуле:

$$\sin \alpha = \frac{|d_1 - d_2|}{2l}. \quad (7.5)$$

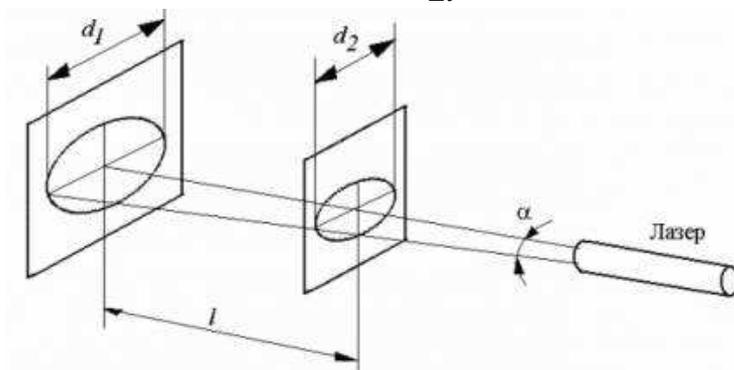


Рисунок 7.5 – Схема измерения углового расхождения лазерного луча
Определение размеров микрочастиц в матрице

При помещении в световой поток хаотически расположенных мелких частиц (радиус частиц $r \leq 10 \lambda$), будет иметь место дифракция света. Как показывают математические расчёты, если световой поток когерентен и монохроматичен, то дифракционная картина на экране проявится в виде чередования светлых и тёмных колец со светлым кругом в центре (рис.7.6). На рисунке дифракционные кольца пронумерованы, начиная с первого тёмного кольца, окружающего центральный светлый круг. Появление такой картины является доказательством когерентности и монохроматичности данного светового потока. Согласно приближённым расчётам теории дифракции, угловые радиусы центров тёмных полос починаются условиям:

$$\sin \alpha_1 = 0,62 \frac{\lambda}{r}, \sin \alpha_3 = 1,11 \frac{\lambda}{r}, \sin \alpha_5 = 1,62 \frac{\lambda}{r}. \quad (7.5)$$

Угловые радиусы центров светлых полос починаются условиям:

$$\sin \alpha_2 = 0,82 \frac{\lambda}{r}; \sin \alpha_4 = 1,34 \frac{\lambda}{r}. \quad (7.6)$$

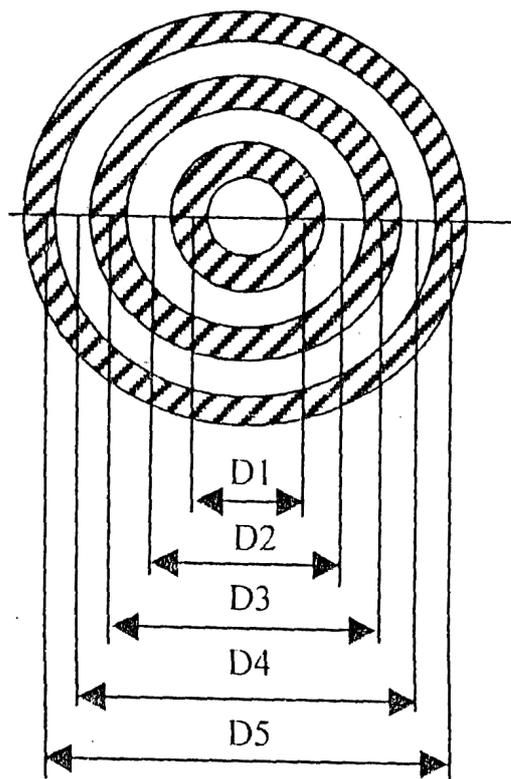


Рисунок 7.5 – Дифракционные кольца

Диаметр соответствующего кольца (D_i) и расстояние от пластины с мелкими частицами до экрана (L) определяют углы α_i через соотношение

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{D_i}{2L}. \quad (7.7)$$

Из формул (7.5) и (7.6) рассчитывают радиусы частиц r .

2.3.. Порядок выполнения лабораторной работы

Внимание! При работе с лазером помните, что попадание в глаза прямого лазерного излучения опасно для зрения.

Включение лазера производите в присутствии преподавателя или лаборанта.

Включите в сеть блок питания 3 (см. рис. 7.3). Тумблер «сеть» на блоке питания поставьте в положение «вкл». На экране 9 должно появиться яркое пятно. Через 7-10 минут лазер готов к работе.

Задание 1. Определение длины волны излучения лазера

1. Установите столик 5 на расстояние (0,8-1,2) м от экрана 9 (см. рис. 7.4). Для этого отпустите зажимной винт стойки, плавно переместив столик вдоль скамьи, установите по указателю нужное положение и закрепите винтом.

2. На столике 5 установите дифракционную решетку 6. Выведите световое пятно в центр дифракционной решетки. На экране 9 возникает дифракционная картина с ярким нулевым максимумом.

3. Измерьте расстояние между дифракционными максимумами первого h_1 и второго h_2 порядков (см. рис. 7.4).

4. Переместите столик 5 на (0,2-0,3) м ближе к экрану 9.

5. Измерьте h_1 и h_2 при новом положении дифракционной решетки.

6. Запишите результаты измерений и постоянную решетку $d = 0,01$ мм в табл. 7.1.

7. Снимите со столика дифракционную решетку.

8. Выключите лазер.

9. Подготовьте таблицу по форме:

Таблица 7.1 – Определение длины волны излучения лазера

l	h_k	$\operatorname{tg} \varphi = h_1 / 2l$	φ	$\lambda = d \cdot \sin \varphi / k$

10. Вычислите по формуле (7.4) углы дифракции для максимумов первого и второго порядков.

11. По формуле (7.3) вычислите длину излучения лазера для тех же максимумов.

12. Рассчитайте среднее значение длины волны.

13. Проведите статистическую обработку результатов. Окончательный результат запишите в форме $\lambda = \lambda_{\text{сред}} \pm \Delta\lambda$

Задание 2. Оценка направленности излучения лазера

1. Установите столик на расстоянии $l = (0,8-0,9)$ м от экрана 9 (см. рис. 7.7).

2. На столике 5 установите поляроид 8, который в данном упражнении используется в качестве ослабителя яркости светового луча. Выведите световое пятно в центр поляроида. Вращая поляроид рычагом 8а, получите оптимальную для Ваших глаз яркость пятна на экране.

3. Приложите к экрану листок бумаги и зарисуйте сечение пятна.

4. Установите на столик 5 экран 7 (между поляроидом и экраном 9).

5. Зарисуйте сечение пятна на экране 7.

6. Измерьте диаметры пятен по своим рисункам не менее трех раз по разным направлениям.

7. Запишите результаты измерений диаметров пятен (d) и расстояние l в таблицу. Снимите со столика экран 7.

8. Выключите лазер.

9. Подготовьте таблицу по форме:

Таблица 7.2 – Определение направленности излучения лазера

l	$d_1 \pm \Delta d_1$	$d_2 \pm \Delta d_2$	$\sin \alpha$	α

10. Вычислите по формуле 7.5 угловое расхождение лазерного луча.

11. Проведите статистическую обработку результатов. Окончательный результат запишите в форме $\alpha = \alpha_{\text{сред}} \pm \Delta\alpha$.

Задание 3. Определение размеров микрочастиц в матрице

1. Установите на оптической скамье между экраном и лазером матрицу с вкрапленными в неё микрочастицами

2. Включите лазер и отрегулируйте направление лазерного луча.
3. Приложите к экрану листок бумаги и зарисуйте дифракционную картину.
3. Для заданного значения L измеряются диаметры согласно рис. 7.6 и записываются в таблицу 7.3.
4. Запишите результаты измерений диаметров пятен и расстояние в табл.7.3. Снимите со столика матрицу.
5. Выключите лазер.
6. Подготовьте таблицу по форме:

Таблица 7.3 – Определение размеров микрочастиц

L	D_i	$\text{tg } \alpha_i$	α_i	$\sin \alpha_i$	r

7. По формулам (7.5) и (7.6) рассчитывают радиусы частиц r .
8. Проведите статистическую обработку результатов. Окончательный результат запишите в форме $r = r_{\text{сред}} \pm \Delta r$.

3. Контрольные вопросы

1. Что такое спонтанное и индуцированное (вынужденное) излучение?
2. Что такое инверсная заселенность энергетических уровней и как она достигается?
3. Почему для усиления происходящего через среду светового потока необходима инверсная заселенность энергетических уровней?
4. Каков принцип работы трех - и четырехуровневого лазера?
5. Объясните принцип получения инверсной населенности в смеси газов.
6. Нарисуйте принципиальную схему лазера и расскажите принцип его работы.
7. Зачем в газоразрядной трубке выходные окна ставятся под углом Брюстера?
8. Чем объясняется высокая направленность излучения лазера?
9. В чем заключается особенности индуцированного излучения?
10. Каков принцип определения размеров микрочастиц с помощью лазера?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Полевой транзистор

Цель работы: изучение устройства и принципа работы полевого транзистора, снятие основных характеристик и определение его усилительных параметров.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Устройство и принцип работы полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом

Принцип работы такого транзистора основан на том, что электрическое поле $p-n$ -перехода, включенного в обратном направлении увеличивает толщину запирающего слоя.

Устройство и схема включения полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом приведены на рисунке 8.1.

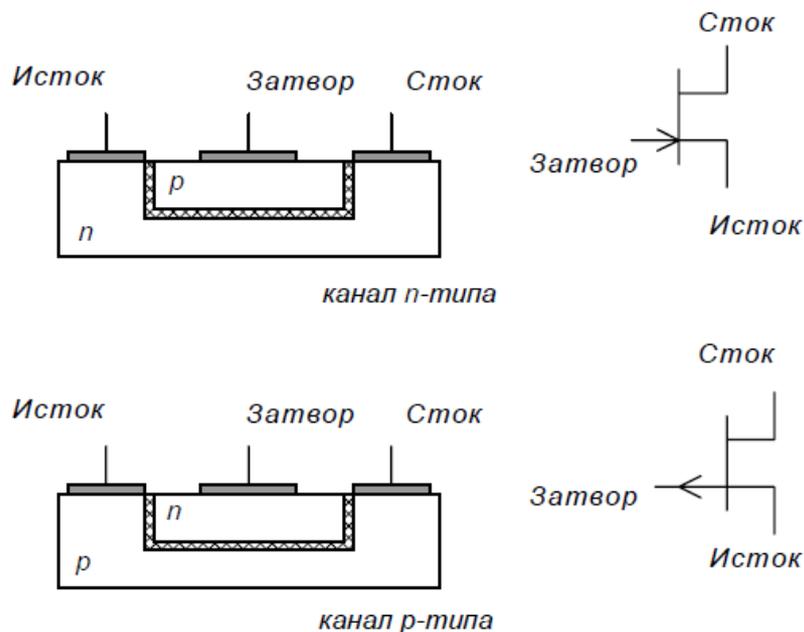


Рисунок 8.1 – Полевые транзисторы с $p-n$ -переходом

В кристалле с определенным типом проводимости (например, p), который называется основанием, создается канал – тонкий (единицы микрон) слой с проводимостью другого типа (в нашем случае n). Этот слой имеет на противоположных концах электроды, называемые стоком и истоком. Если между этими электродами подключить источник напряжения U_C , то по каналу потечет ток, обусловленный движением основных носителей в электрическом поле, поэтому такие транзисторы называются полевыми. Этим током можно управлять, меняя напряжение U_3 между истоком и третьим электродом, соединенным с основа-

нием и называемым затвором. Это напряжение является входным и включается обратно по отношению к $p-n$ -переходу.

При изменении входного напряжения изменяется толщина запирающего слоя в канале. Поскольку ток может течь только по той части канала, где запирающего слоя нет (сопротивление запирающего слоя очень велико), то происходит изменение сечения той части канала, по которой может течь ток - электрического сечения канала.

Если увеличивать входное напряжение, т.е. напряжение затвора U_3 то запирающий слой становится толще и электрическое поперечное сечение канала уменьшается. Следовательно, его сопротивление постоянному току возрастает и ток через канал (ток I_C) становится меньше. При некотором напряжении на затворе площадь поперечного сечения канала станет равна нулю. Тогда ток I_C будет практически равен нулю – транзистор заперт. Это напряжение называется напряжением отсечки $U_{отс}$.

Если $U_3 = 0$, сечение канала наибольшее, сопротивление канала имеет наименьшее значение, в этом случае ток I_C получается наибольшим.

1.2. Характеристики и параметры полевых транзисторов

Ток через транзистор (стоковый ток I_C) зависит от двух величин:

$$I_C = f(U_C, U_3). \quad (8.1)$$

Управляющее действие затвора характеризуется семейством сток-затворных характеристик, которые показывают зависимость $I_C = f(U_3)$ при $U_C = const$ (рисунок 8.2).

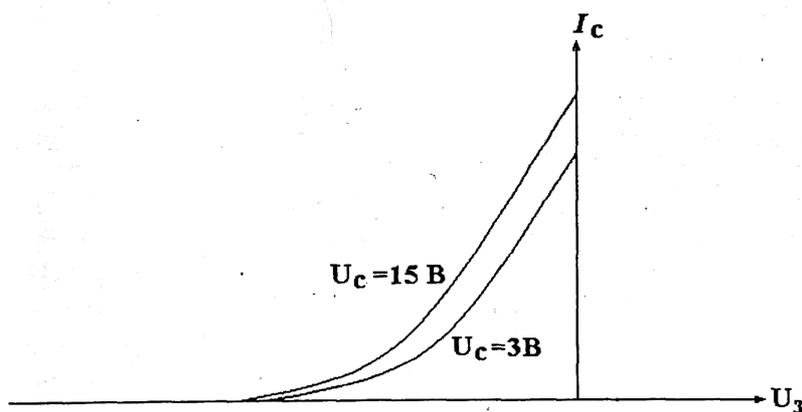


Рисунок 8.2

На рисунке 8.3 изображены выходные (стоковые) характеристики полевого транзистора $I_C = f(U_C)$ при $U_3 = const$. Можно видеть, что с увеличением U_C ток I_C сначала растет довольно быстро, а затем это нарастание замедляется и почти совсем прекращается. Это объясняется тем, что при повышении U_{C_c} ток должен

увеличиваться по закону Ома. Одновременно увеличение U_C увеличивает толщину запирающего слоя, за счет чего ток I_C уменьшается.

Таким образом, происходят два противоположных изменения тока, который в результате остается почти постоянным.

При увеличении обратного напряжения на затворе ток уменьшается и характеристика проходит ниже.

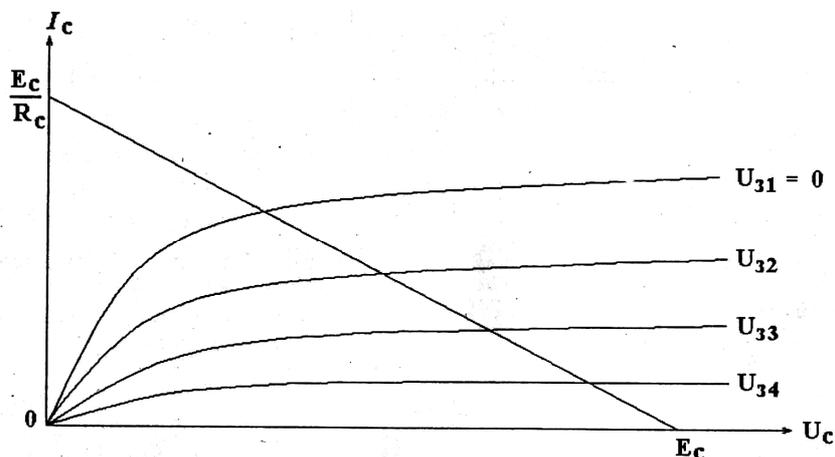


Рисунок 8.3

Усилительные свойства полевого транзистора характеризуются следующими параметрами.

1) Крутизна сток-затворной характеристики (крутизна) S .

Крутизна определяется по формуле (8.2).

$$S = \frac{dI_C}{dU_3}, U_C = const. \quad (8.2)$$

Крутизна измеряется в мА/В и характеризует управляющее действие затвора.

На практике наиболее просто этот параметр находится по заданной сток-затворной характеристике методом двух точек (рисунок 8.4).

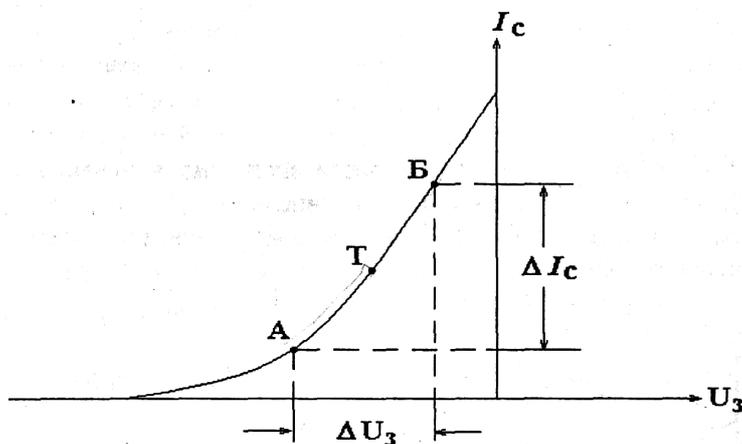


Рисунок 8.4

2) Внутреннее сопротивление R_i характеризует влияние стокового напряжения U_c на ток через транзистор I_c .

$$R_i = \frac{dU_c}{dI_c}, U_3 = const. \quad (8.3)$$

Внутреннее сопротивление измеряется в Омах, и на пологих участках выходных характеристик R_i велико. Этот параметр удобно определить по стоковым характеристикам (рисунок 8.5). Можно считать, что найденное R_i относится к средней точке Т участка АБ.

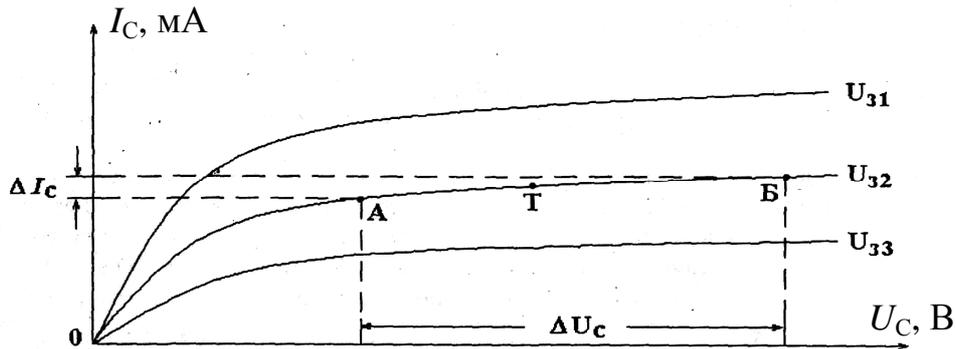


Рисунок 8.5

3) Статический коэффициент усиления μ .

Часто пользуются третьим параметром – статическим коэффициентом усиления μ , который показывает во сколько раз изменение напряжения на затворе, производящее определенное изменение тока, меньше, чем изменение стокового напряжения, вызывающего такое же изменение тока. Коэффициент усиления выражается формулой:

$$\mu = \frac{dU_c}{dU_3}, I_c = const. \quad (8.4)$$

Коэффициент усиления μ связан с параметрами R_i и S простой зависимостью:

$$\mu = R_i S. \quad (8.5)$$

4) Входное сопротивление полевого транзистора определяется по формуле:

$$R_{вх} = \frac{dU_3}{dI_3}, U_c = const, \quad (8.6)$$

I_3 – ток в цепи затвора. Поскольку ток I_3 является обратным током p - n -перехода и очень мал, то $R_{вх}$ велико и может достигать десятков МОм.

1.3. Полевые транзисторы с изолированным затвором

На рисунке 8.6а показано принципиальное устройство полевого транзистора с изолированным затвором, а его изображение на схемах на рисунке 8.6б.

На поверхности канала 2 создают диэлектрический слой двуокиси кремния толщиной 0,1-0,2 микрона. Поверх диэлектрического слоя наносят затвор 3 в виде тонкой металлической пленки. Основание 1 у таких транзисторов соединяют с истоком И, как это показано на рисунке 8.6а.

Если при нулевом напряжении затвора приложить между стоком и истоком напряжение U_C , то через канал потечет ток I_C . При подаче на затвор отрицательного напряжения относительно истока, а следовательно, и относительно основания, в канале создается поперечное электрическое поле, под влиянием которого электроны выталкиваются из канала в основание. Канал обедняется электронами, сопротивление его увеличивается и ток стока уменьшается. Чем больше отрицательное напряжение затвора, тем меньше ток I_C .

Если на затвор подать положительное напряжение, то под действием поля, созданного этим напряжением, из основания в канал будут поступать электроны – проводимость канала увеличивается и ток I_C возрастает.

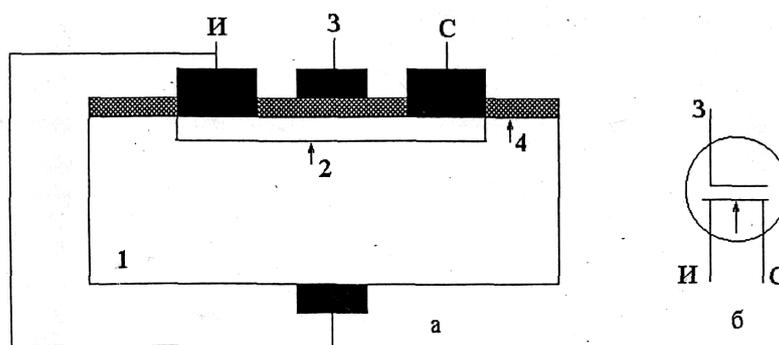


Рисунок 8.6

Транзисторы с изолированным затвором имеют входное сопротивление более 10^{12} Ом. Важно, что входное сопротивление остается большим при любой полярности напряжения на затворе.

2. Экспериментальная часть

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Подобрать приборы и собрать схему для снятия статических характеристик полевого транзистора.

В работе используется транзистор типа КП 103 с управляющим $p-n$ переходом и каналом p -типа.

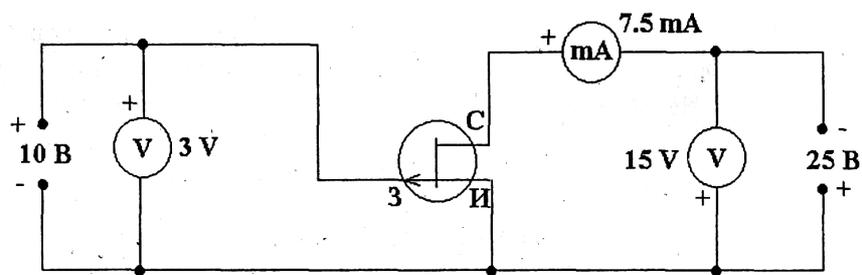


Рисунок 8.7

2. Снять две статические сток-затворные характеристики $I_C = f(U_3)$, при $U_C = 3$ В и $U_C = 15$ В. Результаты занести в таблицу. Построить график. При снятии характеристик напряжение на затворе U_3 изменять через 0,2 В от 0 до напряжения отсечки, т.е. такого напряжения на затворе, когда ток через транзистор становится равным нулю.

U_C , В	U_3 , В	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
3	I_C , мА										
15	I_C , мА										

3. Снять семейство стоковых характеристик $I_C = f(U_C)$ при $U_3 = 0, 0,3, 0,6, 0,9, 1,2$ В. При снятии характеристик первую точку удобно снять при $U_C = 0,5$ В, далее стоковое напряжение следует изменять от 1 до 5 В через 1 В, и от 5 до 15 через 2 В. Результаты занести в таблицу.

U_3 , В	U_C , В	0,5	1	2	3	4	5	7	9	11	13	15
0	I_C , мА											
0,3	I_C , мА											
0,6	I_C , мА											
0,9	I_C , мА											
1,2	I_C , мА											

4. Построить график $I_C = f(U_C)$

5. Определить статические параметры полевого транзистора S и R_i , соответствующие середине линейного участка статической сток-затворной характеристики при $U_C = 15$ В, используя формулы (8.2) и (8.3) и рисунки 8.4 и 8.5.

6. Рассчитать статический коэффициент усиления μ по формуле (8.5).

3. Контрольные вопросы

1. Основное назначение полевых транзисторов.

2. Устройство и принцип работы полевых транзисторов с $p-n$ -переходом.
3. Устройство и принцип работы полевых транзисторов с изолированным затвором.
4. Что такое напряжение отсечки?
5. Что представляет собой различные семейства характеристик полевых транзистора?
6. Назвать и дать определение основных параметров полевых транзисторов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Исследование магнитных полей с помощью датчиков на основе эффекта Холла. Классификация условий труда при воздействии постоянного магнитного поля

Цель работы: ознакомиться с одним из широко используемых на практике методов измерения магнитных полей с помощью преобразователя Холла; исследовать магнитное поле внутри длинного соленоида; ознакомиться с классификацией условий труда при воздействии постоянного магнитного поля

1. Основные теоретические сведения

1.1. Методы создания магнитного поля

При исследовании некоторых свойств вещества, при изучении движения заряженных частиц по необходимым траекториям часто возникает необходимость в создании магнитных полей различных конфигураций.

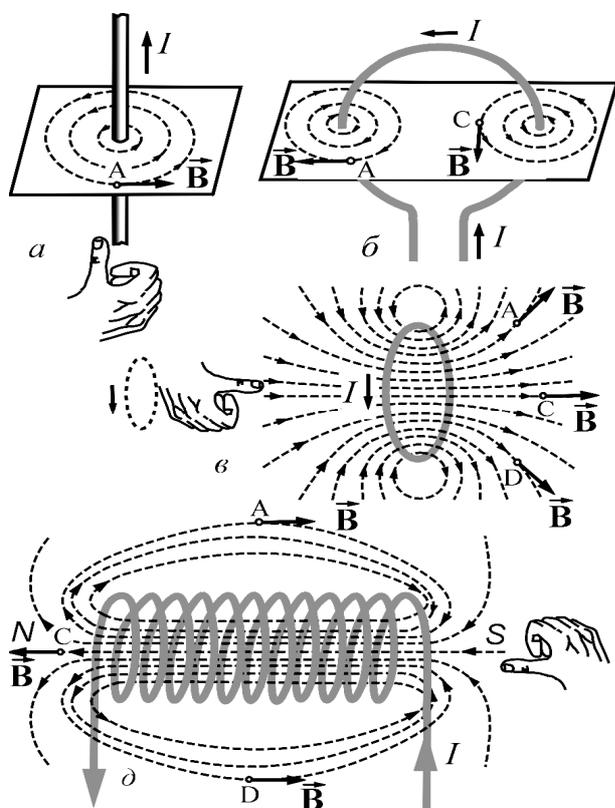


Рисунок 9.1 – Распределение силовых линий магнитного поля вокруг прямолинейного тока в пространстве (а), замкнутого контура с током (б, в) и соленоида с током (д). Рука иллюстрирует применение правила правой руки для определения направления силовых линий магнитного поля

Простейшим устройством, создающим магнитное поле, является проводник с током (рис. 9.1а). В пространстве вокруг него существует неоднородное поле.

Для того, чтобы иметь представление о распределении магнитных полей в пространстве, удобно использовать графический способ представления полей – при помощи силовых линий магнитной индукции.

Линии магнитной индукции – это такие линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора магнитной индукции \vec{B} в этой точке (рис. 9.1, точки А, С, D). На

рис. 9.1 представлены различные конфигурации проводников с током и расположение линий магнитной индукции вокруг них. Здесь видны особенности линий магнитной индукции, которые отражают важные свойства магнитных полей.

Линии магнитной индукции всегда замкнуты: они не имеют ни начала, ни конца. Это говорит о том, что магнитное поле – вихревое поле.

Для определения направления вектора магнитной индукции поля, созданного вокруг проводника с током используют либо правило буравчика (штопора), либо правило правой руки. Согласно правилу буравчика, если ток течет по прямому проводнику (прямой ток), то в этом направлении должен перемещаться буравчик. Тогда направление вращения ручки буравчика покажет *направление силовых линий магнитного поля, созданного током в проводнике*. Если ток течет по замкнутому проводнику (контурный ток), то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением тока в витке, тогда направление перемещения буравчика покажет направление вектора магнитной индукции, созданной током в витке на своей оси.

Чтобы определить направление силовых линий магнитного поля созданного током в прямом проводнике нужно *охватить проводник правой рукой, направив отогнутый большой палец по направлению тока, кончики остальных пальцев в данной точке покажут направление вектора индукции в этой точке*.

Из рисунков 9.1б, в видно, что магнитное поле, созданное замкнутыми токами, так же, как и поле прямого тока, неоднородно.

Если нужно получить однородное магнитное поле, то можно взять два соосно расположенных на близком расстоянии друг от друга витка с током. Между витками будет существовать довольно протяженная область пространства с однородным магнитным полем. (рис. 9.1д).

Для получения однородного магнитного поля используют катушку в виде намотанного на цилиндрическую поверхность изолированного проводника, которые образуют винтовую линию. Такое устройство называют соленоидом или катушкой индуктивности. Если витки расположены вплотную или очень близко друг к другу, то соленоид можно рассматривать как систему последовательно соединенных круговых токов одинакового радиуса с общей осью (рис. 9.1д). Силовые линии магнитного поля \vec{B} соленоида выглядят примерно так, как показано на рис. 9.1д.

В средней части внутри полости соленоида, длина которого значительно больше диаметра, магнитное поле направлено параллельно вдоль оси соленоид-

да. Оно однородно в середине соленоида и спадает к его концам. В теории электромагнетизма для количественного описания явлений используют две векторные величины, характеризующие магнитные поля. Это вектор магнитной индукции \vec{B} и вектор напряженности магнитного поля \vec{H} . Для рассматриваемого нами случая величина напряженности магнитного поля внутри соленоида H пропорциональна силе тока I и определяется по формуле

$$H=I n_0, \quad (9.1)$$

где n_0 – число витков на единицу длины $n_0 = N/l$ (N – общее число витков соленоида, l – длина соленоида, рис. 9.2). Напряженность магнитного поля в системе СИ имеет размерность [А/м].

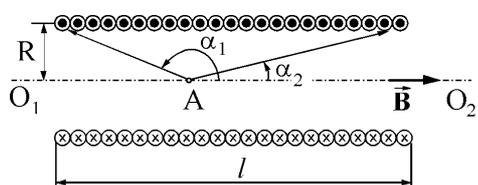


Рисунок 9.2

Вектор магнитной индукции \vec{B} связан с вектором напряженности магнитного поля \vec{H} выражением:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (9.2)$$

где μ_0 – так называемая магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), μ – безразмерная величина, характеризующая магнитные свойства среды и называемая относительной магнитной проницаемостью среды. Для вакуума $\mu = 1$. Величина индукции магнитного поля на оси длинного соленоида конечной длины (сравнительно с его диаметром) вычисляется по формуле

$$B = 0,5\mu\mu_0 I n_0 (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2), \quad (9.3)$$

где α_1 и α_2 – углы, под которыми видны концы соленоида из точки A на его оси, к которой относится величина B . В случае достаточно длинного соленоида, когда углы α_1 и α_2 близки к нулю, формула (3) приводится

$$B = 0,5\mu\mu_0 I n_0. \quad (9.3)$$

Простые соленоиды позволяют получать поля до 0,2 Тл. Соленоиды с охлаждением обмотки позволяют получать поля до 10 Тл. Через такой соленоид пропускается ток в десятки килоАмпер, а расход воды для охлаждения составляет сотни кубометров в секунду.

Внутри соленоида направление линий магнитной индукции образует с направлением тока в витках правовинтовую систему. Это позволяет использовать правило правой руки для определения направления силовых линий магнитного поля, как это показано на рис. 9.1.

У реального соленоида имеется составляющая тока вдоль оси. Кроме того, линейная плотность тока $j_{\text{лин}}$ (равная отношению силы тока dI к элементу дли-

ны соленоида dl) изменяется периодически при перемещении вдоль соленоида. Среднее значение этой плотности равно

$$\langle j_{\text{лин}} \rangle = \left\langle \frac{dI}{dl} \right\rangle = In_0. \quad (9.5)$$

В учении об электромагнетизме большую роль играет воображаемый бесконечно длинный соленоид, у которого отсутствует осевая составляющая тока и, кроме того, линейная плотность тока $j_{\text{лин}}$ постоянна по всей длине соленоида. Причина этого заключается в том, что поле такого соленоида однородно и ограничено объемом соленоида (аналогично электрическое поле плоского конденсатора, которое однородно и ограничено объемом конденсатора).

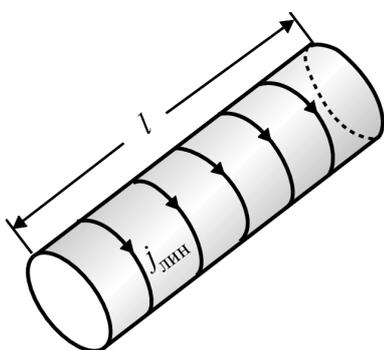


Рисунок 9.3 – Схематическое представление соленоида в виде тонкостенного цилиндра с постоянной плотностью тока $j_{\text{лин}}$

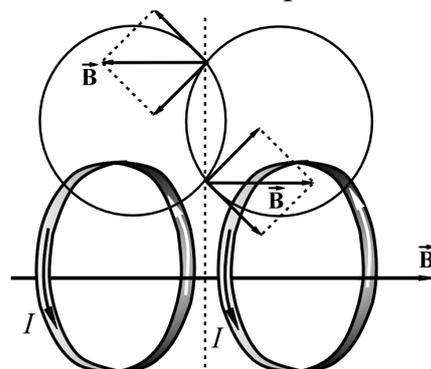


Рисунок 9.4 – Результирующее магнитное поле, создаваемое парой соседних витков соленоида

В соответствии с вышесказанным можно представить соленоид в виде бесконечного тонкостенного цилиндра, обтекаемого током с постоянной линейной плотностью (рис. 9.3).

Разобьем цилиндр на одинаковые круговые токи – «витки». На рис. 9.4 видно, что каждая пара витков, расположенная симметрично относительно некоторой плоскости, перпендикулярной к оси соленоида, создает в любой точке этой плоскости магнитную индукцию, параллельную оси. Следовательно, и результирующее поле в любой точке внутри и вне бесконечного соленоида может иметь лишь направление, параллельное оси.

Из рис. 9.1д вытекает, что направление поля внутри и вне конечного соленоида противоположны. При увеличении длины соленоида, направления полей не изменяются и в пределе, при $l \rightarrow \infty$ остаются противоположными. Для бесконечного соленоида, как и для конечного, направление поля внутри соленоида образует с направлением обтекания цилиндра правовинтовую систему. Из параллельности вектора \vec{B} оси соленоида вытекает, что поле как внутри, так и вне бесконечного соленоида должно быть однородным.

Поле как внутри, так и вне бесконечного соленоида является конечным. Причем, вне соленоида поле очень слабое и близко к нулевым значениям. Внутри бесконечно длинного соленоида магнитное поле значительно и определяется выражением

$$B = \mu_0 n_0 I, \quad (9.6)$$

где произведение $n_0 I$ называется *числом ампер-витков на метр*.

Если соленоид является конечным, то, как уже указывалось ранее, индукция магнитного поля в центре на оси соленоида определяется выражением (9.3).

В магнитную индукцию на оси соленоида симметрично расположенные витки вносят одинаковый вклад. Поэтому у конца полубесконечного соленоида на его оси магнитная индукция равна половине значения в представленной формуле (9.6):

$$B = 0,5 \mu_0 n_0 I. \quad (9.7)$$

Практически, если длина соленоида значительно больше, чем его диаметр, формулы (9.6) и (9.7) будут справедливы с большой степенью точности.

1.2. Измерение индукции магнитного поля с помощью преобразователя Холла

Эффект Холла заключается в следующем. Пусть образец имеет форму прямоугольной пластинки длиной l , шириной d , толщиной b (рис. 9.5). Если вдоль длины образца (направление оси y) пропустить электрический ток I , а перпендикулярно плоскости пластинки (направление оси x) приложить магнитное поле B , то в направлении, перпендикулярном направлению тока I и B (направление оси z), возникнет электрическое поле, называемое полем Холла, с напряженностью $E_{\text{Холла}}$. На практике, как правило, поле Холла характеризуют разностью потенциалов, которую измеряют между симметричными токами C и

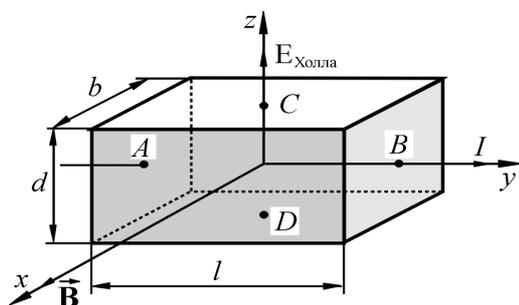


Рисунок 9.5 – Ориентация тока, индукции магнитного поля и напряженности холловского поля в полупроводниковой пластине

D на боковых поверхностях образца. Эта разность потенциалов называется холловской разностью потенциалов ($U_{\text{Холл}}$ или ЭДС Холла $\epsilon_{\text{Холл}}$).

В классической теории проводимости эффект Холла объясняется тем, что в магнитном поле на движущиеся электрические заряды действует сила Лоренца, величина и направление которой определяются векторным уравнением

$$\vec{F}_L = e [\vec{v} \times \vec{B}], \quad (9.8)$$

где \vec{B} – индукция магнитного поля, \vec{v} – скорость движения зарядов, e – заряд носителей тока с учетом знака, « $+e$ » – для дырочной проводимости, « $-e$ » – для электронной проводимости.

Рассмотрим в качестве примера движение заряженной частицы в однородном поле. На движущуюся в магнитном поле заряженную частицу будет действовать сила Лоренца (9.8). В скалярном виде выражение (9.8) имеет следующую запись:

$$F_{\text{Л}} = evB\sin\alpha, \quad (9.9)$$

где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} . При движении заряд вдоль силовых линий магнитного поля ($\vec{v} \parallel \vec{B}$ и $\sin\alpha=0$), то он не испытывает действия силы Лоренца и его траектория является прямолинейной (рис. 9.6а). В том случае, когда положительно заряженная частица движется перпендикулярно силовым линиям магнитного поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$ и $\sin\alpha=1$), сила Лоренца будет отклонять их нормально к вектору скорости. Сила Лоренца направлена перпендикулярно к плоскости, в которой лежат векторы \vec{v} и \vec{B} . Таким образом, под действием этой отклоняющей силы движение электронов приобретает более сложный характер, их траектория станет криволинейной. Для определения направления силы Лоренца применяют правило «левой руки»: *если расположить левую руку так, чтобы силовые линии магнитного поля (вектор \vec{B}) входили в ладонь, а четыре сложенных пальца были направлены вдоль вектора скорости \vec{v} , то отставленный большой палец укажет направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд* (рис. 9.6). В случае, когда заряд отрицательный, найденное таким образом направление силы Лоренца нужно изменить на противоположное.

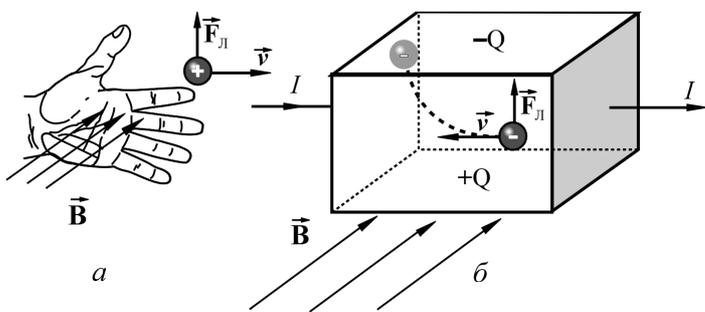


Рисунок 9.6 – Определение направления силы Лоренца при помощи правила левой руки на движущийся положительный заряд в магнитном поле (а) и иллюстрация действия силы Лоренца на движущиеся в магнитном поле электроны в металлической пластине

ный большой палец укажет направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд (рис. 9.6). В случае, когда заряд отрицательный, найденное таким образом направление силы Лоренца нужно изменить на противоположное.

Направление силы Лоренца может быть также определено по правилу векторного произведения с учётом знака заряда. Вектор силы всегда перпендикулярен вектору скорости электрона. С учетом вышесказанного на рис. 9.6 представлено движение электрона под действием силы Лоренца в магнитном поле в металлической пластине. Видно, что электроны при своем направленном движении в магнитном поле под действием силы Лоренца создадут на верхней пла-

стине избыток отрицательных зарядов. Это в свою очередь приведет к тому, что нижняя пластина будет иметь положительный заряд.

С учетом этого явления электрическое поле, которое создается между верхней и нижней пластиной и получило название электрическое поле Холла:

$$E_{\text{Холл}} = \vec{v}\vec{B} \quad (9.10)$$

связано с ЭДС Холла $\epsilon_{\text{Холл}}$, или с холловской разностью потенциалов $U_{\text{Холл}}$, следующим образом:

$$\epsilon_{\text{Холл}} = U_{\text{Холл}} = E_{\text{Холл}} \times d = v \times \vec{B} \times d. \quad (9.11)$$

Так как сила тока, протекающего через единицу поверхности образца, т.е. плотность тока, равна

$$j = e \cdot n \cdot v, \quad (9.12)$$

где n – число носителей тока в единице объема образца (концентрация носителей тока), то сила тока

$$I = j \cdot b \cdot d = e \cdot n \cdot v \cdot b \cdot d, \quad (9.13)$$

что позволяет записать

$$v = \frac{I}{enbd} \quad (9.14)$$

и

$$\epsilon_{\text{Холл}} = \frac{IB}{enb}. \quad (9.15)$$

Таким образом, ЭДС Холла пропорциональна силе тока I через образец и обратно пропорциональна толщине образца b .

Экспериментальное определение ЭДС Холла $\epsilon_{\text{Холл}}$ проводят на образце с заданной толщиной b при фиксированном токе через образец I . При этом полученное значение ЭДС Холла рассчитывают на единицу толщины образца и единицу силы тока, т. е. рассчитывают величину

$$\epsilon_{\text{Холл}}^* = \epsilon_{\text{Холл}} \cdot b/I, \quad (9.16)$$

которую называют удельной или приведенной ЭДС Холла. Приведенная ЭДС Холла пропорциональна индукции магнитного поля B :

$$\epsilon_{\text{Холл}}^* = RB \quad (9.17)$$

где R – коэффициент пропорциональности

$$R = \frac{1}{en} \quad (9.18)$$

является характеристикой изучаемого вещества и называется коэффициентом Холла или постоянной Холла.

Рассмотренный эффект Холла, причиной которого является действие на движущиеся в магнитном поле заряды силы Лоренца, называется классическим эффектом Холла. Как следует из формулы (9.17), для классического эффекта Холла характерна линейная зависимость $\varepsilon^*(B)$. Опыт между тем показывает, что в природе есть вещества, для которых линейная зависимость $\varepsilon^*(B)$ не выполняется. Это свидетельствует о существовании другой причины эффекта Холла, которая, однако, может быть понята только с позиций квантовой теории твердого тела.

2. Экспериментальная часть

2.1. Приборы и принадлежности к лабораторной работе:

соленоид, преобразователь Холла, блок питания для соленоида, источник питания для преобразователя Холла, милливольтметр для измерения электродвижущей силы (ЭДС) Холла.

Длинный соленоид изготовлен из виниловой трубы диаметром 110 мм и медного провода диаметром 0,6 мм. Длина намотки составляет 425 мм. Плотность витков соленоида $n_0 = 1645$ витков/м. При данном соотношении длины намотки к диаметру магнитное поле внутри на оси соленоида меньше магнитного поля бесконечно длинного соленоида на 3,5%. Обмотка соленоида питается от стабилизированного источника постоянного тока НУ 3002 с плавной регулировкой тока. Датчик магнитной индукции на основе эффекта Холла (преобразователь Холла) является линейным преобразователем магнитного поля. Выходной сигнал датчика – это напряжение, пропорциональное магнитному полю, приложенному перпендикулярно верхней плоскости корпуса датчика. Датчик питается от специально изготовленного для него источника с выходным напряжением 5 вольт. Датчик крепится на кронштейне, с помощью которого он может перемещаться вдоль и поперек оси соленоида.

2.2. Тарирование преобразователя Холла

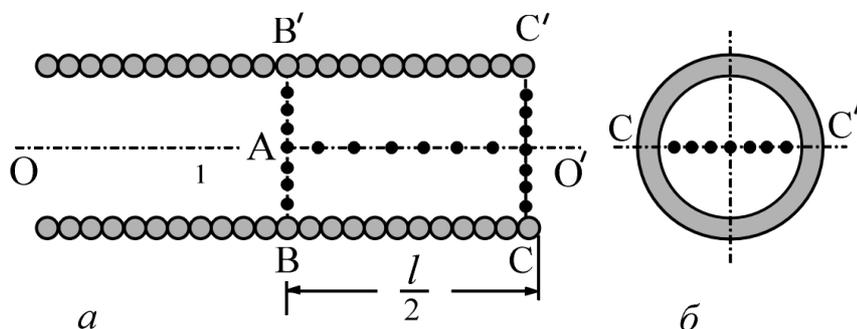


Рисунок 9.7 – Сечения соленоида сверху (а) и сбоку (б) по направлениям вдоль осей соленоида OO' и перпендикулярно к ней BB' и CC' . Черными точками (•) на осях указаны места, где необходимо произвести измерение индукции магнитного поля с помощью датчика Холла

Тарирование (градуировка) датчика Холла заключается в получении зависимости между ЭДС Холла датчика ε_x и модулем вектора магнитной индукции $|\vec{B}|$ в некоторой области магнитного поля. Тарирование производят в маг-

нитном поле, величина которого известна. В работе для тарирования используют тот же соленоид, магнитное поле которого необходимо изучить. Для тарирования датчика его помещают в центре соленоида длиной l (Рис. 9.7, точка А). Индукция магнитного поля в этой области соленоида определяют на основе выражения (9.3)

$$B = 0,5\mu_0 I n_0 (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2), \quad (9.19)$$

При тарировании измеряют ЭДС Холла как функцию тока, питающего длинный соленоид. После этого по формуле (9.19) рассчитывают значения B – индукции магнитного поля, соответствующие значениям тока I . Углы α_1 и α_2 равны $165,32^\circ$ и $14,68^\circ$ соответственно. Строят тарировочный график зависимости $\varepsilon_x = f(B)$. График представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат. Коэффициент наклона этой прямой к оси абсцисс (угловой коэффициент) равен:

$$K = \frac{\varepsilon_x}{B}. \quad (9.20)$$

После вычисления углового коэффициента для используемого датчика Холла, можно определить этим датчиком значение магнитного поля. Причем, этим датчиком можно определять величину индукции магнитного поля, создаваемого током любой конфигурации. Для этого используют полученную величину ЭДС Холла в исследуемой области магнитного поля, делённую на угловой коэффициент K .

2.3. Порядок проведения лабораторной работы

1. Соберите электрическую цепь, включите блоки питания преобразователя Холла и соленоида, и установите ток, питающий соленоид, равным 1 А.
2. Перемещайте датчик вдоль оси от центра соленоида к его к началу через 1 сантиметр вдоль оси OO' , измеряя при этом ЭДС Холла (рис. 9.7а).
3. Запишите значения ЭДС Холла и соответствующие значения расстояния датчика от центра соленоида в таблицу 9.1.
4. Установите датчик в центре соленоида и, перемещая датчик поперек оси вдоль направления $ВВ'$ соленоида через 1 сантиметр, измерьте соответствующие значения ЭДС Холла (рис. 9.7а). Результаты измерений запишите в таблицу 9.2.
5. Установите датчик с края соленоида и, перемещая датчик поперек оси вдоль направления $СС'$ соленоида через 1 сантиметр, измерьте соответствующие значения ЭДС Холла (9.7а, б). Результаты измерений запишите в таблицу 9.3.
6. Повторите измерения, указанные в пункте 4, перемещая датчик вдоль оси OO' , к началу соленоида через 2 см (9.7а). Обязательно выполните эти измерения в области начала соленоида. Результаты измерений запишите в таблицу 9.2.

7. Рассчитайте индукцию магнитного поля во всех исследуемых точках соленоида и запишите в соответствующие таблицы.

8. Постройте график зависимости индукции магнитного поля как функцию расстояния исследуемой точки от центра соленоида вдоль его оси.

9. Постройте на одной координатной сетке графики зависимости индукции магнитного поля от расстояния исследуемой точки от оси соленоида. Таких графиков должно быть не меньше, чем количество положений датчика вдоль оси соленоида.

Таблица 9.1 – Данные измерений вдоль оси OO'

№	1	2	3	...	n_1
r , см					
ϵ , В					

Таблица 9.2 – Данные измерений вдоль оси BB'

№	1	2	3	...	n_2
r , см					
ϵ , В					

Таблица 9.3 – Данные измерений вдоль оси CC'

№	1	2	3	...	n_3
r , см					
ϵ , В					

n_1, n_2, n_3 – число измерений вдоль осей OO' , BB' , CC' .

3.Определение класса условий труда при воздействии постоянного магнитного поля

Оценка и нормирование постоянного магнитного поля (ПМП) осуществляется по уровню магнитного поля дифференцированно в зависимости от времени его воздействия на работника за смену для условий общего (на все тело) и локального (кисти рук, предплечье) воздействия.

Уровень ПМП оценивают в единицах напряженности магнитного поля (H) в А/м или в единицах магнитной индукции (B) в мТл.

ПДУ напряженности (индукции) ПМП на рабочих местах представлены в таблице 9.4.

Таблица 9.4 – ПДУ постоянного магнитного поля

Время воздействия за рабочий день, минуты	Условия воздействия			
	Общее		Локальное	
	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл
0-10	24	30	40	50
11-60	16	20	24	30
61-480	8	10	12	15

При необходимости пребывания персонала в зонах с различной напряженностью (индукцией) ПМП общее время выполнения работ в этих зонах не должно превышать предельно допустимое для зоны с максимальной напряженностью.

4.Контрольные вопросы

1. Какие характеристики используют для описания магнитных полей? Дать их определение.
2. Как связаны между собой B и H ?
3. Свойство силовых линий магнитного поля.
4. Как определить направление вектора магнитной индукции \vec{B} ?
5. Что называют соленоидом и основные свойства магнитного поля создаваемого соленоидом?
6. По какому правилу и как определяется направление вектора магнитной индукции в соленоиде при заданном направлении тока в нём? Величина напряженности и индукции магнитного поля соленоида.
7. От чего зависит радиус кривизны траектории электрона в магнетроне?
8. Какая сила называется силой Лоренца и как определяется её направление?
9. Почему сила Лоренца не изменяет кинетической энергии заряженной частицы?
10. Какие виды магнитных полей (переменные или постоянные) изучаются в настоящей работе?
11. Какие датчики существуют для измерения магнитных полей (какие из них измеряют постоянные поля, какие – переменные поля, а какие и те и другие?)
12. Какой датчик магнитного поля используется в работе?
13. Может ли такой датчик использоваться для измерения и постоянных, и переменных магнитных полей?
14. Какое физическое явление положено в основу работы датчика?
15. От каких параметров датчика зависит величина его ЭДС?
16. Каким образом в работе можно определять направление силовых линий в той или иной точке магнитного поля?

17. Какие по величине магнитные поля можно измерять при помощи используемого датчика и, от каких параметров датчика зависит его чувствительность?

18. Для чего нужно тарировать датчик? В чем заключается тарирование датчика? Каким образом проводят тарирование?

19. Какая формула используется для нахождения индукции магнитного поля на оси внутри длинного соленоида?

20. Как определяется коэффициент K при тарировании?

21. Почему для определения индукции магнитного поля, создаваемого соленоидом в какой-либо точке пространства используется не коэффициент K , а коэффициент K' ?

22. Опишите методику измерения индукции магнитного поля при помощи датчика.

23. Какова классификация условий труда при работе с постоянными магнитными полями?

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Д. Малютин, И.М. Вершинин. Основы электроники. Учебное пособие, ч.1.- Томск, 2001-79 с.
2. Гигиенические критерии оценки и классификация условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса. Руководство Р 2.2.755-99 Минздрава России, Москва -1999.
3. ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ «Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля».
4. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника: Учебное пособие-Ростов – на - Дону: Феникс, 2007.- 446 с.
5. СанПиН 2.2.4.1191-03 «ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ» Утверждены руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г. Г. Онищенко 30 января 2003 года.
6. .ГОСТ 12.1.006-84 "Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля"
7. СанПиН 2.2.4.1329-03 ТРЕБОВАНИЯ ПО ЗАЩИТЕ ПЕРСОНАЛА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ Утверждены руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г. Г. Онищенко 28 мая 2003 г. N 102.
8. Полупроводниковые приборы. Транзисторы: Справочник. /Под ред. Н.Н.Горюнова. М.; Высш. шк., 1986.
9. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники. - Киев: Высш.шк. 1981. - 408 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Пример оформления титульного листа

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
(ТУСУР)

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга
(РЭТЭМ)

Наименование темы работы (прописными буквами)

Лабораторная работа по дисциплине

«Основы электроники»

Студенты гр.

_____ Ф.И.О.

_____ /Подпись/

Руководитель работы

_____ /Должность/

_____ Ф.И.О.

_____ /Подпись/

_____ /Дата/