

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

Факультет «Магистратура»

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

**ТЕХНОЛОГИЯ УСТРОЙСТВ
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Утверждено Методическим советом ТГТУ
в качестве лабораторного практикума для студентов
магистратуры, обучающихся по направлению 210100.68
«Электроника и микроэлектроника» и 211000.68
«Конструирование и технология электронных средств»



Тамбов
2014

Рецензент
к.т.н., доцент С.Н. Баршутин

Технология устройств функциональной
электроники: Лаб. практикум./Сост.: Ю.А. Брусенцов, И.С.
Филатов, И.Г. Проценко, Тамбов: ТГТУ, 2014. – 32 с.

Утверждено Методическим советом ТГТУ
(протокол № 2 от 14.02.2014 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Элементная база любого вида РЭС и ЭВС – это электрорадиоэлементы (ЭРЭ), интегральные микросхемы (ИС) и устройства функциональной микроэлектроники (УФМЭ).

Электрорадиоэлементы (ЭРЭ) включают соединители, резисторы, конденсаторы, индуктивности и другие. Интегральные микросхемы (ИС) включают полупроводниковые и гибридные, устройства функциональной микроэлектроники (УФМЭ) – приборы с зарядовой связью, акустоэлектронные приборы, оптоэлектронные приборы и другие.

Резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, интегральные микросхемы представляют собой металлургические конструкции, распределение химических элементов, в которых в процессе эксплуатации не должно изменяться (процессы эксплуатационного старения, деградации и т. д. рассматриваются отдельно), т. е. они образуются на так называемых статистических неоднородностях и конструкторско-технологической интеграции.

Функциональная электроника – это новое перспективное направление в современной элементной базе РЭА. Устройства функциональной электроники основаны на использовании динамических неоднородностей и физических принципов интеграции. Это отличает их от транзисторов, диодов, ИС и других элементов РЭА.

Основной задачей настоящего лабораторного практикума является изучение принципов работы устройств функциональной электроники и их практического использования.

**Определение зависимости сопротивления коммутации
транзисторной оптопары от яркости освещения
фототранзистора**

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

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

Теоретические сведения

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

Принцип работы светодиода основан на излучательной рекомбинации носителей заряда в активной области гетерогенной структуры при пропускании через нее тока. Носители заряда – электроны и дырки – проникают в активный слой из прилегающих пассивных слоев вследствие подачи напряжения на $p-n$ -структуру и затем испытывают спонтанную рекомбинацию, сопровождающуюся излучением света. Длина волны излучения связана с шириной запрещенной зоны активного слоя законом сохранения энергии. Внешний вид наиболее распространенного светодиода представлен на рисунке 1.1.

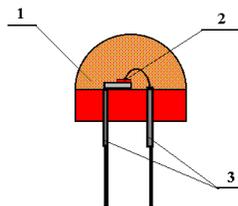


Рис. 1.1 Светодиод АЛ 307 БМ

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

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

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

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

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

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

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

Сопротивление фототранзистора и режим его работы зависят от освещенности его кристалла. Если база не освещена, то фототранзистор работает в режиме усилителя. При освещении базовой области попадающие на нее фотоны выбивают

электроны, переход становится проводящим и в коллекторной цепи протекает ток (так называемый **фототок**). Величина фототока зависит от освещенности базы.

Порядок выполнения работы

1. Соберите установку для определения яркости свечения светодиода (рис. 1.2).

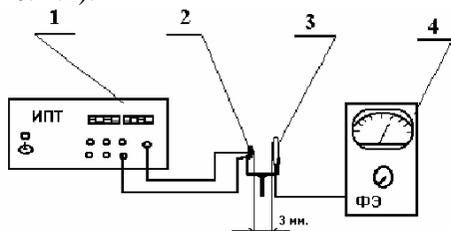


Рис. 1.2 Установка для определения характеристики свечения светодиода:

1 – источник постоянного тока; 2 – светодиод; 3 – фотоэлемент;
4 – экспонометр

2. Включите источник постоянного тока и, изменяя напряжение от 1,4 до 2,1В, по экспонометру получить значения яркости свечения. Результаты занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 Экспериментальные данные

$U_{пит}, В$				
$E, лк$				

3. Построить график зависимости яркости свечения от напряжения питания.

4. Произвести замену светоизлучающего диода на лазерный УФ полупроводниковый диод в экспериментальной установке (рис. 1.2).

5. Включите источник постоянного тока, изменяя напряжение от 1 до 4В, по экспонометру получить значение яркости свечения. Результаты занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 Экспериментальные данные

$U_{пит}, В$				
$E, лк$				

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

7. Собрать установку для определения свойств транзисторной оптопары (рис. 1.2).

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

7. Собрать установку для определения свойств транзисторной оптопары (рис. 1.3).

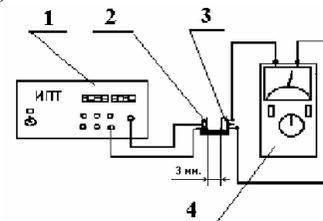


Рис. 1.3 Установка для определения сопротивления фототранзистора:
 1 – источник постоянного тока; 2 – светодиод; 3 – фототранзистор; 4 – омметр

8. Включить источник постоянного тока и, изменяя напряжение от 1,4 до 2,1В, по омметру получить значения сопротивления фототранзистора. Полученные данные заносятся в табл. 1.3.

Таблица 1.3 Экспериментальные данные

$U_{пит}, В$				
$R, кОм$				

9. Построить график зависимости сопротивления фототранзистора от его освещенности.

Содержание отчета

1. Описание и схемы установок для определения свойств светоизлучателя и фотоприемника.

2. Таблица и график зависимости яркости свечения светодиода от напряжения питания светодиода.

3. Таблица и график зависимости сопротивления фототранзистора от напряжения питания светодиода.

4. График зависимости сопротивления фототранзистора от яркости свечения светодиода.

Контрольные вопросы

1. Применение оптопар, их достоинства и недостатки.

2. Источники света в оптоэлектронных устройствах.

3. Фотоприемники, их свойства и особенности.

4. Способы управления фототоком транзистора оптопары.

Литература: [1].

**Исследование влияния частоты на сопротивление
высокочастотной нагрузки**

Цель работы: ознакомиться с высокочастотными устройствами на примере реактивной нагрузки, исследовать ее частотные характеристики.

Приборы и принадлежности: генератор высокочастотных колебаний, осциллограф, высокочастотная нагрузка

Теоретические сведения

Высокочастотная нагрузка имеет реактивное сопротивление, то есть ее параметры зависят от рабочей частоты устройства, где она применяется. Обычно ВЧ- нагрузки больших мощностей (5 Вт и более) используют при согласовании выходных цепей передатчиков и антенн. Например, если антенна короче, чем необходимо, то на выбранной частоте сопротивление антенны имеет реактивную составляющую емкостного характера. В случае, когда антенна длиннее, на той же частоте антенна имеет реактивность индуктивного характера. Поэтому при настройке антенны нежелательную реактивность можно компенсировать введением дополнительной реактивности противоположного знака. Например, если антенна длиннее, чем это необходимо, индуктивную составляющую можно компенсировать включением в цепь питания антенны дополнительного высокочастотного сопротивления. Его значение можно рассчитать для нужной частоты, зная значение индуктивной составляющей, либо подобрать экспериментально.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки (рис. 2.1).

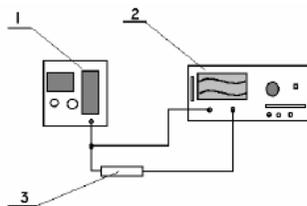


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки:

1- генератор, 2 – двулучевой осциллограф, 3- высокочастотная индуктивная нагрузка.

Сигнал высокой частоты с выхода генератора высокочастотных колебаний I поступает на вход А осциллографа 2. С того же выхода на вход В осциллографа поступает сигнал через высокочастотную нагрузку 3. При изменении частоты колебаний уровень сигнала, поступающий на вход А, остается неизменным.

Уровень сигнала на входе В обратно пропорционален частоте, так как нагрузка тем более ослабляет сигнал, чем выше частота.

2. Подключить высокочастотную нагрузку, как показано на схеме.

3. Выставить на входе осциллографа чувствительность 0,5 В/мм.

4. Выставить на шкале генератора частоту 100 кГц и синхронизировать осциллограф. По шкале осциллографа определить напряжение, поступающее с нагрузки. Результаты занести в таблицу 2.1. Далее выставляя по шкале генератора частоты 500 КГц, 1 МГц, 1,5 МГц, 2,0 МГц, 2,5 МГц, 3,0 МГц и синхронизируя на этих частотах осциллограф, получить зависимость падения напряжения на ВЧ – нагрузке от частоты.

Таблица 2.1 Экспериментальные данные

f, МГц				
U, В				

5. построить график зависимости уровня сигнала от частоты (рис. 2.2)

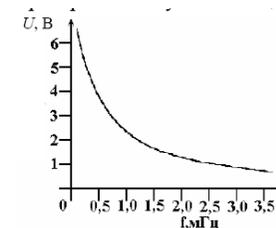


Рис. 2.2 Амплитудно-частотная характеристика высокочастотной нагрузки

Содержание отчета

1. Формулировка цели и задачи работы.
2. Краткое описание принципа действия и области применения высокочастотных нагрузок.
3. Описание и схема установки для определения частотных свойств нагрузки.

4. Таблица и график зависимости уровня сигнала от частоты.

Контрольные вопросы

1. Применение высокочастотных нагрузок.
2. Чем обусловлена неравномерность АЧХ высокочастотной нагрузки?
3. Почему кривая АЧХ имеет плавный спад?
Литература: [2].

Лабораторная работа №3

Изучение влияния частоты сдвига фаз сигнала в ультразвуковых линиях задержки

Цель работы: ознакомиться с пьезоэлектрическими устройствами на примере ультразвуковых линий задержки УЛЗ 64-5 и УЛЗ 64-8.

Приборы и принадлежности: ультразвуковые линии задержки УЛЗ 64-5 и УЛЗ 64-8, микроскоп, двулучевой осциллограф, генератор высокочастотных колебаний.

Теоретические сведения

Пьезокерамические материалы представляют собой неорганические диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью (до 200). Для них характерна зависимость ДП от напряженности электрического поля и наличие резко выраженного максимума в зависимости ДП от температуры.

Такие диэлектрики обладают спонтанной поляризацией и относятся к **сегнетоэлектрикам**. Наиболее распространенным пьезокерамическим материалом является титанат бария BaTiO_3 . Под воздействием внешнего электрического поля в керамике титаната бария происходит переориентация поляризации в доменах. Это приводит к появлению общей результирующей поляризации, которая сохраняется в керамике после прекращения воздействия. Керамика приобретает **пьезоэлектрические** свойства (от слова *piezo* – давление).

Механическое сжатие пьезокерамики приводит к возникновению на поверхности свободных зарядов, что сопровождается возникновением разности потенциалов. Если на поверхность кристалла нанести электроды и замкнуть цепь, то можно получить ток и таким образом превратить механическую

энергию в электрическую. При растяжении пьезокерамики заряды на поверхностях будут противоположны по знаку тем, которые были при сжатии.

При приложении к пьезокерамике извне разности потенциалов из-за индуцированной поляризации размеры пьезокерамики будут увеличиваться при увеличении поляризации и уменьшаться при ее уменьшении, то есть получается преобразование электрической энергии в механическую. Это используется в **ультразвуковых линиях задержки (УЛЗ)**. Скорость распространения звуковых волн на 5-6 порядков меньше, чем электромагнитных. Поэтому отрезок, который пробегает звуковой импульс за определенное время, во столько же раз меньше пути, пройденного электромагнитным импульсом. В превращении электрического импульса в ультразвуковой и затем непосредственно обратно в электрический, заключается возможность задержки электрического сигнала на коротком отрезке.

Подлежащие задержке импульсы от генератора 1 (рис. 3.1) подводятся к первому преобразователю 2 и преобразуются в звуковой импульс, пробегающий со скоростью звука $C_{зв}$ отрезок линии L . В конце линии с помощью второго преобразователя он снова преобразуется в электрический сигнал и усиливается усилителем 3, имеющим высокое входное сопротивление (не менее 1 МОм). Пьезоэлектрические устройства выполняют роль линий задержки в блоках обработки цветных сигналов в телевизорах, акустоэлектронных усилителях, фильтрах, устройств акустической памяти и др.

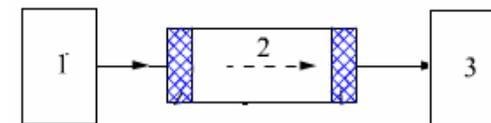


Рис. 3.1 Схема УЛЗ:

1 – источник сигнала; 2 – пьезоэлектрический преобразователь; 3 – приемник задержанного сигнала

Наиболее распространенные линии задержки УЛЗ 64-5 и УЛЗ 64-8 выполнены в виде керамической пластины с нанесенными на его края пьезоэлектрическими преобразователями.

В ультразвуковых линиях задержки используется как прямой, так и обратный пьезоэффект. Сигнал с частотой 1 – 7 МГц подается на пьезоизлучатель, который возбуждает колебания в керамической пластине. Эти колебания улавливаются пьезопреобразователем, на выводах которого возникают электрические колебания той же частоты, но с задержкой на время прохождения акустической волны в кристалле.

На принципиальных электрических схемах УЛЗ обозначаются как связанные между собой кварцевые фильтры. В зависимости от частоты на экране осциллографа будет наблюдаться сдвиг фазы задержанного сигнала.

Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство и принцип работы лабораторной установки для определения параметров УЛЗ (рис. 3.2).

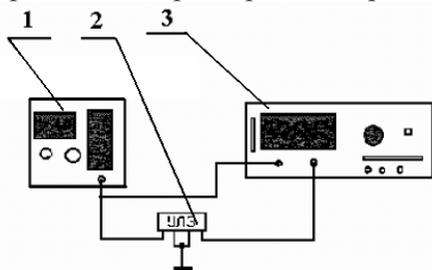


Рис. 3.2 Лабораторная установка:

1 – генератор; 2 – УЛЗ; 3 – двухлучевой осциллограф

2. Подключить генератор высокой частоты ко входу 1 осциллографа.

3. Подключить к выходу генератора вход ультразвуковой линии задержки, а ее выход подключить ко входу 2 осциллографа.

4. Выставить чувствительность на входе 1 равной 0,5 В/см, а на входе 2 – 0,01 В/см.

5. Включить генератор ВЧ и осциллограф.

6. Выставить по шкале генератора частоту 500 кГц и синхронизировать осциллограф.

7. Плавно увеличивая частоту и одновременно синхронизируя осциллограф, определить сдвиг фаз сигналов.

8. Результаты занести в табл. 3. 1.

Таблица 3.1 Зависимость угла сдвига фазы от частоты сигнала

Частота, МГц							
Угол сдвига фазы, рад							

Содержание отчета

1. Название, цель работы, приборы и принадлежности.
2. Краткое описание принципа работы УЛЗ.
3. Порядок выполнения работы.
4. Рисунок установки.
5. Рисунок ультразвуковой линии задержки.
6. Таблица зависимости сдвига фазы сигнала от частоты.

Контрольные вопросы

1. Составные части пьезоэлектрических устройств функциональной электроники.
 2. Применение пьезоэлектрических устройств функциональной электроники.
 3. Принцип работы ультразвуковых линий задержки.
- Литература: [3].

Лабораторная работа №4

Влияние размерных факторов на частотную характеристику кварцевого низкочастотного резонатора

Цель работы: ознакомиться с устройством и технологией изготовления кварцевых резонаторов и получить их амплитудно-частотную характеристику.

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

Теоретические сведения

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

($10^{-6} - 10^{-8}$). Кварцевые резонаторы применяются в генераторах опорных частот, в управляемых по частоте генераторах, селективных устройствах: фильтрах, частотных дискриминаторах и т.д.

Резонаторы для низкочастотной аппаратуры имеют вид, представленный на рисунке 4.1.

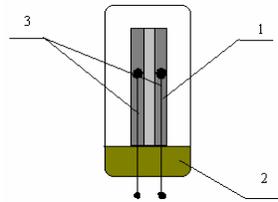


Рис. 4.1. Кварцевый резонатор для низкочастотной аппаратуры:

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

Кварцевая пластина 1 закреплена в стеклянном корпусе 2. Сигнал подводится по проводникам 3. Пластины резонатора показаны на рисунке 4.2.

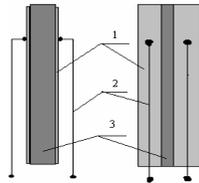


Рис. 4.2. Пластина низкочастотного кварцевого резонатора:

1 - контакты, 2 – выводы, 3 -кварцевая пластина

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

На определённой частоте, которая определяется геометрическими параметрами пластины, возникает механический резонанс, и амплитуда сигнала, снимаемого со второй пары контактов, резко возрастает. Данная частота

называется *частотой резонанса*. Данное свойство кварцевых пластин используется в частности для стабилизации частоты в генераторах радиостанций, работающих в диапазоне длинных и средних волн.

Порядок выполнения работы

1. Собрать лабораторную установку для получения амплитудно – частотных характеристик резонатора (рис. 4.3).

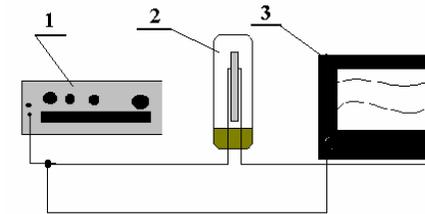


Рис. 4.3. Установка для снятия амплитудно – частотной характеристики резонатора:

1 – генератор, 2 – резонатор, 3 – двухлучевой осциллограф

С выхода генератора 1 сигнал подаётся на вход “1” двухлучевого осциллографа 3. На вход “2” осциллографа подаётся сигнал, прошедший через кварцевый резонатор 2. При неизменной амплитуде сигнала (на входе “1”) с изменением частоты изменяется амплитуда сигнала на входе “2”. Это фиксируется на экране осциллографа. На частоте резонанса амплитуда сигнала на входе “2” значительно превышает первоначальную. Дальнейшее увеличение частоты приводит к уменьшению амплитуды.

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

3. Изменяя частоту колебаний, подаваемых на вход резонатора, определить резонансную частоту этого резонатора. Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1. Экспериментальные данные

Частота F, КГц					
Амплитуда U, В					

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

Содержание отчёта

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

Контрольные вопросы

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

Лабораторная работа №5

Исследование зависимости емкости варикапа от приложенного напряжения

Цель работы: ознакомиться с технологией изготовления, применением и характеристиками полупроводниковых емкостных устройств.

Приборы и принадлежности: измеритель емкости, источник постоянного тока, варикап.

Теоретические сведения

В настоящее время в радиоэлектронной аппаратуре все большее распространение получают полупроводниковые емкостные устройства. Они применяются в радиопередатчиках и радиоприемниках в цепях настройки контуров вместо конденсаторов переменной емкости. Эти устройства получили название варикапов (от англ. vari(able) - переменный и cap(acity) - емкость), полупроводниковый диод, в котором используется свойство электронно-дырочного перехода изменять свою емкость в зависимости от приложенного к нему напряжения (смещения). Применяется преимущественно как управляемый

конденсатор переменной емкости (обычно от единиц до сотен), напр. для настройки высокочастотных колебательных контуров.

Преимущество варикапов перед конденсаторами переменной емкости в том, что они нечувствительны к механическим воздействиям и имеют

значительно меньшие габариты. Недостатком является их высокий ТКЕ (т.е. они чувствительны к изменению температуры), для компенсации которого применяют специальные схемы подключения. Применение варикапов в низковольтной транзисторной аппаратуре нередко ограничивается из-за необходимости использования для их питания источников повышенного стабилизированного напряжения (около 40 В). Варикап, как и любой полупроводниковый диод, нормально работает в интервале температур от -70 град.С до +120 град.С.

Емкостные свойства варикапа обусловлены наличием внутреннего электрического поля в $p-n$ -переходе. При скачкообразном изменении концентрации донорных (N_d) и акцепторной (N_a) примесей (так называемый резкий $p-n$ -переход) концентрация электронов в области n намного больше, чем в p -области. Электроны движутся в область p .

Концентрация дырок в области p больше, чем в n -области, и дырки движутся в область n . Таким образом, область n заряжается положительно а область p -отрицательно (рис. 5.1, поз. 2). Между областями p и n возникает контактная разность потенциалов U_k (потенциальный барьер) и электрическое поле. Это поле направлено так, что оно отталкивает электроны внутрь области n , а дырки – в p - область. В результате этого образуется тонкий переходной слой, в котором отсутствуют свободные электроны и дырки.

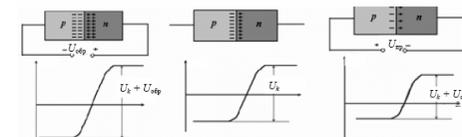


Рис. 5.1 $p-n$ -переход варикапа:

1 – при приложении обратного напряжения; 2 – при отсутствии внешнего напряжения; 3 – при приложении прямого напряжения

При приложении к варикапу обратного напряжения $U_{обр}$ высота потенциального барьера возрастает на величину приложенного напряжения (рис. 5.1, поз. 1). Переходной слой расширяется, и через варикап течет только малый обратный ток. Под действием прямого напряжения $U_{пр}$ высота потенциального барьера уменьшается на величину этого напряжения (рис. 5.1, поз. 3). Переход открывается и через него идет прямой ток, толщина p - n -перехода уменьшается.

Таким образом, изменение напряжения, прикладываемого к p - n -переходу варикапа приводит к изменению его толщины и заряда в нем, т.е. p - n -переход действует как емкость.

Емкость данного вида связана с образованием потенциального барьера между p - n -областями, и поэтому она называется барьерной емкостью.

Порядок выполнения работы

1. Собрать установку для определения зависимости емкости варикапа от приложенного напряжения (рис. 5.2).

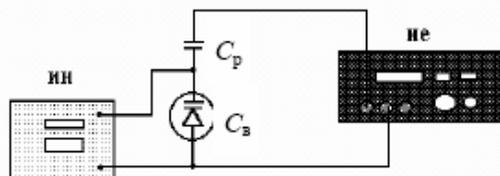


Рис. 5.2 Установка для определения емкостных характеристик варикапа:

ИН – источник напряжения; C_p – разделительная емкость; C_v – емкость варикапа; ИЕ – высокочастотный измеритель емкости (Е7 – 9)

2. Включить источник постоянного напряжения и измеритель емкости.

3. Установив на нулевую отметку индикатор, уравновесить измерителем емкости разделительную емкость.

4. Подать на варикап изменяемое напряжение и провести измерение емкости варикапа. Результаты занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Зависимость емкости от приложенного напряжения

$U_{п}$				
C_v				

5. Построить график зависимости C_v от U .

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Принцип действия варикапа.
3. Методика измерения емкости, схема лабораторной установки.
4. Таблица и график зависимости емкости варикапа от напряжения.

Контрольные вопросы

- 1 Применение варикапов, их достоинства и недостатки.
- 2 Физика полупроводниковой емкости варикапа.
- 3 Емкость варикапа при отсутствии внешнего напряжения.
- 4 Изменение емкости при подаче прямого напряжения.
- 5 Изменение емкости при подаче обратного напряжения.

Литература: [5].

Лабораторная работа №6

Изучение строения и свойств оксидных терморезисторов

Цель работы: изучить структуру оксидных терморезисторов; построить зависимость их электропроводности от температуры; определить энергию активации и коэффициента температурной чувствительности полупроводника; оценить величину постоянной времени тепловой инерции терморезисторов; построение динамических вольтамперных характеристик терморезисторов.

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

Теоретические сведения

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

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

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

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

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

На рисунке 6.1 приведен график зависимости сопротивления терморезистора от температуры.

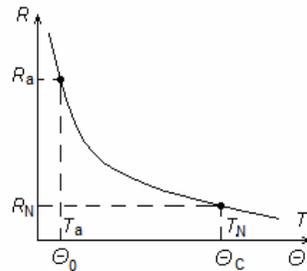
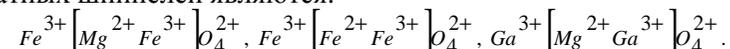


Рис. 6.1 Зависимость сопротивления оксидного терморезистора от температуры

Наряду с легированным германием, кремнием, полупроводниковыми стеклами, подавляющее число терморезисторов изготавливается во всех странах на основе оксидов переходных металлов, состав которых описывается формулой XY_2Z_4 , где X – чаще всего ион двухвалентного металла (Zn^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+}), Y – трехвалентный металл (Al^{3+} , Mn^{3+} , Cr^{3+}), а Z – анион O_2 .

Элементарная ячейка шпинели состоит из 8-ми формульных единиц, то есть $X_8Y_{16}O_{32}$. В состав ячейки входят 32 кислородных иона, образующих ГЦК-подрешетку, в порах которой располагаются катионы. В ГЦК решетке существует два вида пустот – октаэдрические (32 в элементарной ячейке шпинели) и тетраэдрические (64 поры). В прямых шпинелях в тетра-порах располагаются двухвалентные катионы X (занято 8 из 64

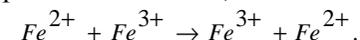
позиций), а 16 из 32 окто-пор занимают трехвалентные катионы Y. Формула прямой шпинели – $X Y_2 O_4$ (или $X[Y_2]O_4$), где скобки [] показывают окто-пору. В шпинелях другого типа в окта-порах часть позиций занята двухвалентным металлом. Такие шпинели называют обратными и записывают в виде $Y[XY] O_4$. Примером обратных шпинелей являются:



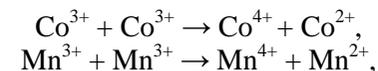
Электропроводность оксидных полупроводников нельзя объяснить с точки зрения зонной теории, используемой для классических полупроводников. В оксидных материалах действует ионная связь, в которой электроны локализованы на отдельных атомах (ионах). Процесс электропроводности состоит в перескакивании электронов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

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

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



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



поэтому для них характерно большое сопротивление и малое значение ТКС.

Свойства терморезисторов можно описать рядом характеристик:

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

Описываемая уравнением $R(T) = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right)$, температурная характеристика согласуется с измерениями тем точнее, чем меньше их диапазон, что связано с температурной зависимостью коэффициента A . Для более широких диапазонов температуры T часто необходимо более точное аналитическое выражение. При этом целесообразно принять для коэффициента B квадратичную зависимость:

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

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

На практике удобно выразить эту величину в виде:

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

где B_N соответствует номинальной рабочей точке.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

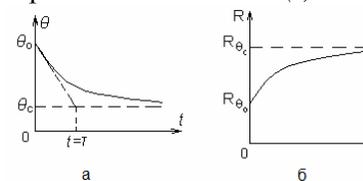


Рисунок 6.2 Процесс изменения температуры терморезистора:

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

Различают *статическую* и *динамическую* вольтамперные характеристики (ВАХ) терморезистора. При снятии статической

ВАХ ток фиксируется после длительной выдержки терморезистора при каждом значении напряжения.

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

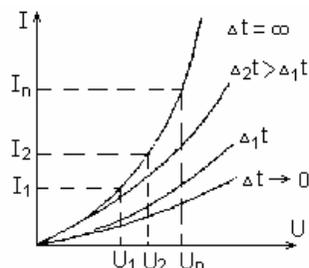


Рисунок 6.3 Динамические ВАХ терморезистора

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

Порядок выполнения работы

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

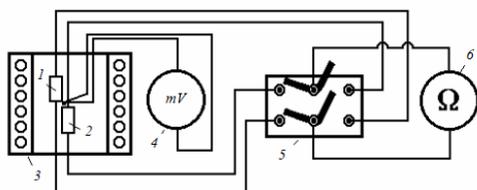


Рисунок 6.4 Схема установки для изучения параметров терморезисторов:

1,2 – образцы; 3 – печь; 4 – потенциометр; 5 – ключ; 6 – омметр

2. Включить потенциометр КВП и измерить начальную температуру образцов после одной минуты выдержки в термостате.

3. Включить мост Щ-34 и измерить начальное сопротивление обоих терморезисторов, переключая цепь измерения с помощью ключа 5.

4. Включить питание электропечи 3.

5. Снять зависимость сопротивления терморезисторов от температуры в диапазоне 20...100 °С с шагом температуры 10 °С. Данные занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1. Экспериментальные данные

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

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

7. Определить номинальное электросопротивление R_N , коэффициент температурной чувствительности B , температурный коэффициент сопротивления и энергию активации процесса электропроводности $\Delta E = Bk$.

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

Таблица 6.2. Экспериментальные данные

t, с	0	10	20	30	40	50	60	70
R, Ом								

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

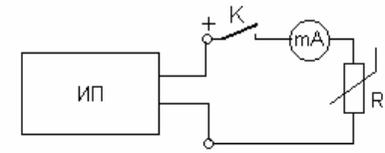


Рисунок 6.5 Измерительная установка по снятию ВАХ оксидного терморезистора

Установить напряжение на выходе источника питания равное 5В. Замкнув ключ К, записать показания миллиамперметра в

начальный момент времени и далее через каждые 10 секунд. Через 60 с ключ разомкнуть. Перед следующим измерением выдержать паузу для охлаждения терморезистора. Повторить измерения для напряжений 10-30 В. Длительность паузы с ростом напряжения следует увеличивать. Результаты опыта занести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3. Экспериментальные данные

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

Содержания отчета

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

Контрольные вопросы

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

Литература: [5]

Исследование стабилитронов

Цель работы: ознакомление с основными параметрами и характеристиками полупроводниковых стабилитронов.

Приборы и принадлежности: лабораторный вольтметр, источник постоянного тока, стабилитрон.

Теоретические сведения

Стабилитроны предназначены для стабилизации напряжения на нагрузке при изменении питающего напряжения или сопротивления нагрузки, для фиксации уровня напряжения и т. д. Полупроводниковый стабилитрон представляет собой плоскостной диод, выполненный из сильно легированного кремния. Для стабилитронов рабочим является участок электрического пробоя ВАХ в области обратных напряжений рис. 7.1, а. На этом участке напряжение на диоде остается практически постоянным при изменении тока через диод.

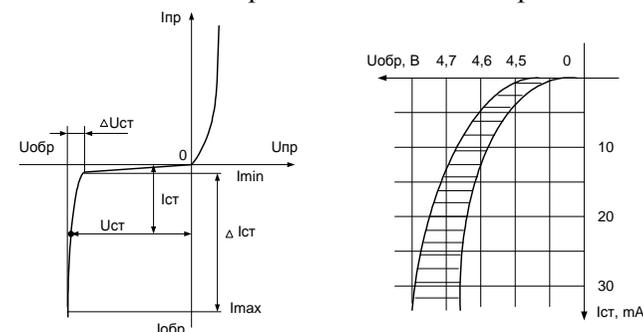


Рис. 7.1 Вольтамперная характеристика стабилитрона

В рабочей области вольтамперную характеристику стабилитрона можно аппроксимировать выражением:

$$I = -A \exp [\alpha (U_{cm} - \beta U)],$$

Коэффициенты α и β характеризуют форму кривой в области стабилизации. Характеристика реального стабилитрона приведена на рисунке 7.1, б. Заштрихованная область определяет возможный разброс напряжений стабилизации. Вначале лавинный процесс неустойчив. Поэтому интервал рабочих токов стабилитрона выбирают от I_{min} , определяемого необходимой

устойчивостью работы, до I_{max} , определяемого максимально допустимой мощностью рассеивания. Стабилитрон присоединяют параллельно нагрузке R_n .

Для стабилизации малых напряжений (до 1В) используют стабилитроны - кремниевые диоды, у которых для стабилизации используется прямая ветвь ВАХ.

Основные параметры стабилитрона:

Номинальное напряжение стабилизации $U_{ст ном}$ – напряжение на стабилитроне в рабочем режиме (при заданном токе стабилизации).

Минимальный ток стабилизации $I_{ст.min}$ – наименьшее значение тока стабилизации, при котором режим пробоя устойчив.

Максимально допустимый ток стабилизации $I_{ст.max}$ – наибольший ток стабилизации, при котором нагрев стабилитронов не выходит за допустимые пределы.

Дифференциальное сопротивление $r_{диф}$ – отношение приращения напряжения стабилизации к вызывающему его приращению тока стабилизации:

$$r_{диф} = \Delta U_{ст} / \Delta I_{ст}.$$

Температурный коэффициент напряжения стабилизации – отношение относительного изменения напряжения стабилизации к абсолютному изменению температуры окружающей среды:

$$\alpha_{ст} = \Delta U_{ст} / (U_{ст} \Delta T).$$

К параметрам стабилитронов также относят максимально допустимый прямой ток I_{max} , максимально допустимый импульсный ток $I_{пр-и}$, максимально допустимую рассеиваемую мощность P_{max} .

Порядок выполнения работы

1. Расчетная часть:

а) Рассчитать параметрический стабилизатор рисунок 7.2 на заданное значение нагрузки R_n с выходным напряжением 9В и нестабильностью 1% при нестабильности напряжения на входе 10%.

Для параметрического стабилизатора справедливы соотношения:

$$\Delta U_{вых} / \Delta U_{вх} = r_{диф} / (R_{\sigma} + r_{диф}),$$

$$R_{\sigma} = (\Delta U_{\text{ex}} / \Delta U_{\text{вых}} - 1) r_{\text{диф}},$$

$$I_n = U_{\text{ст}} / R_n,$$

$$U_{\text{ex max}} = U_{\text{ст}} + R_{\sigma} (I_n + I_{\text{ст max}}),$$

$$U_{\text{ex min}} = U_{\text{ст}} + R_{\sigma} (I_n + I_{\text{ст min}}).$$

б) Для рассчитанного параметрического стабилизатора определить изменение напряжения стабилизации $\Delta U_{\text{ст}}$ при изменении температуры на 50°C .

Параметры стабилитрона КС191Ж: $I_{\text{ст min}} = 3 \text{ мА}$, $I_{\text{ст max}} = 15 \text{ мА}$, $r_{\text{диф}} = 470 \text{ Ом}$, $\alpha_{\text{ст}} = 0,09 [\% / ^{\circ}\text{C}]$, $R_H = 1 \text{ кОм}$.

2. Экспериментальная часть:

а) Для снятия вольтамперных характеристик (ВАХ) стабилитронов VD1, VD2 необходимо использовать регулируемый стабилизированный источник питания 0-15В, напряжение с которого подключается к клеммам “ $U_{\text{рег}}$ ” на лабораторном стенде с соответствующей полярностью. Для снятия прямой ветви ВАХ на анод стабилитрона подается положительное напряжение $U_{\text{рег}}$ (прямое включение стабилитрона). Для снятия обратной ветви ВАХ на анод подается отрицательное напряжение $U_{\text{рег}}$ (обратное включение стабилитрона). Изменяя напряжение $U_{\text{рег}}$ с источника питания от нуля до 15В, вольтметром постоянного тока или универсальным вольтметром фиксируют напряжения на стабилитроне и резисторе R_1 , данные заносятся в таблицу. Значение тока рассчитывается по закону Ома.

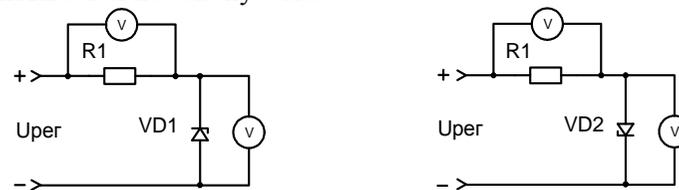


Рис. 7.2, 7.3 Схема измерительной установки:

VD1, VD2 – полупроводниковые стабилитроны; R_1 , R_2 – сопротивления нагрузки; $U_{\text{рег}}$ - регулируемое напряжение

б) Для снятия амплитудных характеристик параметрических стабилизаторов рисунок 7.2, 7.3 в диапазоне $U_{\text{ex}} = -15\text{В} \dots +15\text{В}$ на входе стабилизаторов изменяют напряжение регулируемого

стабилизированного источника питания от 0 до +15В (не менее 10 точек), затем меняют полярность и снимают значения выходного напряжения при изменении входного от -15В до 0.

Напряжения стабилизации стабилитронов, дифференциальные сопротивления и сопротивления постоянному току в середине рабочего участка ВАХ определяются по обратным ветвям построенных вольтамперных характеристик.

1. Исследовать полупроводниковые стабилитроны VD1, VD2 рис. 7.2 и 7.3.

1.1 Снять вольтамперные характеристики (ВАХ) стабилитрона VD1, при $R_1=1\text{кОм}$ (не менее 10 точек);

1.2 Результаты представить в виде таблицы 7.1.

Таблица 7.1 Экспериментальные данные

Прямая ветвь	$U_{VD1}, \text{В}$						
	$U_{R1}, \text{В}$						
	$I_{VD1}, \text{мА}$						
Обратная ветвь	$U_{VD1}, \text{В}$						
	$U_{R1}, \text{В}$						
	$I_{VD1}, \text{мА}$						

1.3 По данным таблицы 7.1 построить зависимость $I=f(U_{VD1})$.

1.4 Снять вольтамперные характеристики (ВАХ) стабилитрона VD1, при $R_1=1\text{кОм}$ (не менее 10 точек);

1.5 Результаты представить в виде таблицы 7.2.

Таблица 7.2 Экспериментальные данные

Прямая ветвь	$U_{VD2}, \text{В}$						
	$U_{R1}, \text{В}$						
	$I_{VD2}, \text{мА}$						
Обратная ветвь	$U_{VD2}, \text{В}$						
	$U_{R1}, \text{В}$						
	$I_{VD2}, \text{мА}$						

1.6 По данным таблицы 7.2 построить зависимость $I=f(U_{VD2})$.

2. Изучение амплитудно-частотной характеристики экспериментальных схем (рисунок 7.2, 7.3) в диапазоне $U_{вх}=-$

15В...+15В, результаты занести в таблицу 7.3, по экспериментальным данным построить зависимость $U_{\text{вых}}=f(U_{\text{вх}})$.

Таблица 7.3 Экспериментальные данные

$U_{\text{вх1}}, В$				
$U_{\text{вых1}}, В$				
$U_{\text{вх2}}, В$				
$U_{\text{вых2}}, В$				

3. По результатам экспериментов определить:

3.1 Напряжения стабилизации стабилитронов VD1, VD2 и классифицировать по типу;

3.2 Дифференциальные сопротивления стабилитронов $r_{\text{диф1}}, r_{\text{диф2}}$;

3.3 Сопротивления стабилитронов постоянному току в середине рабочего участка R_{01}, R_{02} ;

3.4 Результаты представить в виде таблицы 7.4.

Таблица 7.4 Экспериментальные данные

$U_{\text{ст1}}, В$	$r_{\text{диф1}}, Ом$	$R_{01}, Ом$	Тип VD1	$U_{\text{ст1}}, В$	$r_{\text{диф1}}, Ом$	$R_{01}, Ом$	Тип VD2

Содержания отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальную схему лабораторной установки.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
4. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчета.
5. Краткие выводы по результатам расчета и эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Назначение стабилитронов, их отличие от выпрямительных диодов.
2. Сравнить ВАХ стабилитрона и выпрямительного диода.
3. Изобразите ВАХ стабилитрона.
4. В чем отличие стабилитрона от стабилитрона?
5. Основные параметры и характеристики стабилитронов.

Литература: [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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