

**Государственное автономное профессиональное образовательное учреждение
Чувашской Республики
«Чебоксарский экономико-технологический колледж»
Министерства образования и молодежной политики Чувашской Республики**



**Методические указания
по выполнению лабораторных занятий
по учебной дисциплине
ОП.03. Основы электроники и цифровой схемотехники
для профессии среднего профессионального образования
09.01.03. Мастер по обработке цифровой информации**

г. Чебоксары, 2021 г.

РАССМОТРЕНА и ОДОБРЕНА

на заседании ЦК технических дисциплин

Протокол № _____ от " ____ " _____ 2021 г.

Председатель ЦК: _____ /Карсаков О.Г./

Разработчики:

Гончарова Н. Г. преподаватель

электротехники (ФИО, должность)

" ____ " _____ 2021 г.

В методических указаниях рассмотрен порядок выполнения лабораторных работ по дисциплине ОП.03 Основы электроники и цифровой схемотехники, определены исходные данные, тематика лабораторных работ, предложены рекомендации по выполнению этих работ. Методические указания предназначены для обучающихся.

СОДЕРЖАНИЕ:

| | |
|---|----|
| 1. Пояснительная записка..... | 4 |
| 2. Общие указания по выполнению лабораторных работ..... | 5 |
| 3. Порядок составления отчета о лабораторной работе | 9 |
| 4. Задания для лабораторных работ..... | 11 |
| 5. Критерии оценки лабораторных работ..... | 53 |
| Приложение 1..... | 67 |

1. ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная дисциплина «Основы электроники и цифровой схемотехники» входит в цикл общепрофессиональных дисциплин для профессии 09.01.03 «Мастер по обработке цифровой информации». Данные методические рекомендации предназначены для обучающихся, изучающие данную дисциплину, и включает в себя пять лабораторных работ.

Данные методические указания входят в состав учебно-методического комплекса по дисциплине и предполагают формирование у учащихся знаний и умений в области основ электроники и цифровой схемотехники.

ПЕРЕЧЕНЬ И СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

| Содержание занятий | Объем часов |
|--|-------------|
| Лабораторное занятие №1: Определение параметров аналоговых, импульсных и цифровых сигналов. | 2 |
| Лабораторное занятие №2: Исследование простейших RC - цепей. | 2 |
| Лабораторное занятие № 3: Исследование вольт - амперных характеристик полупроводникового диода. | 2 |
| Лабораторное занятие № 4: Расчёт параметров полупроводниковых приборов | 2 |
| Лабораторное занятие № 5: Исследование каскадов с общим эмиттером, с общей базой и общим коллектором. Исследование параметров транзисторного ключа. | 2 |
| Итого | 10 |

2.ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Лабораторные работы выполняются в соответствии с графиком учебного процесса, который доводится до студентов в начале каждого семестра.

2. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по правилам техники безопасности.

3. Формы организации обучающихся при проведении лабораторных работ: фронтальная, групповая и индивидуальная.

При фронтальной форме организации занятий все обучающиеся выполняют одновременно одну и ту же работу. При групповой форме организации занятий одна и та же работа выполняется бригадами по 2 - 5 человек. При индивидуальной форме организации занятий каждый обучающийся выполняет индивидуальное задание.

Лабораторные работы выполняются с использованием предоставленных преподавателем технических средств и программного обеспечения.

4. Каждый обучающийся должен заранее подготовиться к очередной лабораторной работе: изучить или повторить теоретический материал, рассмотреть требуемые схемы, повторить необходимые формулы, таблицы и пояснения по выполнению лабораторной работы необходимо занести в тетрадь или оформить их в электронном варианте на ПК. Неподготовленные студенты к выполнению лабораторных работ могут быть не допущены.

5. Перед выполнением работы старший в бригаде (или каждый обучающийся) получает у преподавателя комплект наборных элементов и необходимую электроизмерительную аппаратуру, за которую несет полную ответственность, и после окончания работы сдает их преподавателю.

Преподаватель выдает инструкционные карты обучающимся и проводит вводный инструктаж с пояснением всего процесса выполнения лабораторной работы. Обучающиеся могут задавать вопросы по процессу выполнения

лабораторных работ. Только после отсутствия вопросов обучающиеся могут приступать к выполнению лабораторной работы.

6. Во время занятий в учебном кабинете (лаборатории) должны поддерживаться надлежащий порядок и деловая обстановка. Не разрешается перемещение обучающихся по учебному классу (лаборатории) и подключение используемой аппаратуры или компьютеров без разрешения преподавателя. Ответственность за поддержание порядка несет преподаватель, староста группы и дежурный студент.

7. При выполнении лабораторных работ требуется неукоснительное выполнение правил техники безопасности.

8. По окончании работы в черновой тетради каждого обучающегося преподаватель делает отметку о правильном и полном выполнении работы. В случае неправильности полученных результатов работа повторяется.

9. По выполненным лабораторным работам каждый обучающийся оформляет и защищает отчет. Эта работа планируется в конце текущего практического занятия. Однако если подготовка обучающегося к занятию недостаточна и практическая работа потребовала слишком много времени, то защита отчета о выполненной работе переносится на следующее практическое занятие или на консультацию. Отчет по выполненной лабораторной работе может быть выполнен как в электронном, так и в рукописном варианте.

10. Пропущенные лабораторные работы отрабатываются во внеурочное время согласно установленному графику.

11. Правила техники безопасности.

Практически все напряжения, с которыми приходится иметь дело в учебном кабинете (лаборатории) электроники и цифровой схемотехники, являются опасными для жизни человека, поэтому при выполнении лабораторных работ необходимо строго выполнять следующие правила безопасности.

1. Электрические цепи должны собираться только при отключенном источнике питания.

2. Собранная схема должна быть проверена преподавателем. Включать схему можно только с разрешения преподавателя.

3. Перед включением электрической цепи все её элементы (реостаты, регулируемые источники, реактивные катушки и т.д.) должны находиться в таком положении, чтобы ток при включении схемы был наименьшим.

4. Все обучающиеся должны быть ознакомлены с системой аварийного отключения источников питания.

5. В учебном кабинете (лаборатории) запрещается:

5.1. Включать схему или персональные компьютеры с программным обеспечением без предупреждения. Перед включением необходимо громко сказать: «Подаю напряжение!».

5.2. Прикасаться к неизолированным частям установки, находящейся под напряжением.

5.3. Производить пересоединения в электрической цепи, находящейся под напряжением. Все пересоединения выполняются при отключенном питании и после каждого пересоединения схема вновь должна быть проверена преподавателем.

5.4. Загромождать лабораторные столы посторонними предметами: приборами и аппаратами, не предназначенными для выполнения данной работы, лишними соединительными проводами, сумками, книгами и т.д.

5.5. Оставлять без наблюдения установку, находящуюся под напряжением.

5.6. Разбирать самостоятельно без преподавателя электрическую цепь или персональный компьютер.

5.7. Включать электрическую цепь в случае, когда один из концов монтажных проводов остается свободным.

5.8. Самому ремонтировать приборы, аппараты и другое электрооборудование.

5.9. Работать одному без преподавателя с электроустановками.

6. В случае аварии на рабочем месте (повреждение приборов, перегорание предохранителей и т.п.) обучающийся обязан немедленно отключить питание на рабочем месте и сообщить преподавателю о случившемся.

7. О всех неисправностях срочно сообщать преподавателю.

3. ПОРЯДОК СОСТАВЛЕНИЯ ОТЧЕТА О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Составление отчета о лабораторной работе имеет своей целью выработать у обучающегося навыки четкого и грамотного изложения результатов любого технического исследования.

Отчет о выполненной лабораторной работе составляется обучающимся на основе записей, сделанных в личной черновой тетради в процессе подготовки и выполнения работы. Отчет оформляется на скрепленных листах стандартного формата А4. Допускается оформление отчета на развернутых листах ученических тетрадей в клетку.

Отчет должен содержать:

- титульный лист, на котором будет записано наименование лабораторной работы, фамилия и инициалы обучающегося, дата проведения лабораторной работы;
- изложение цели работы и её реализации в данной лабораторной работе, включая исследуемые схемы, таблицы результатов экспериментов, требуемые расчеты, графики и диаграммы;
- заключение или краткие выводы по итогам работы.

Цель работы и её реализация должны быть изложены кратко, последовательно, с разбивкой на завершенные в смысловом отношении части, соответствующие выполненным в работе экспериментам или решенным задачам. Пояснения к работе, имеющиеся в методических указаниях, в отчете приводить не следует. Отчет должен быть составлен именно по выполнению работы.

Рабочие схемы, таблицы результатов, графики и диаграммы должны иметь наименования и краткие пояснения типа: “по данным табл. 2 построена зависимость $U_{\text{вых}}(I_{\text{н}})$ - см. рис. 2” и т.д.

Особое внимание следует уделить графической части отчета. Схемы, графики, диаграммы рекомендуется выполнять карандашом, применяя чертежные принадлежности и соблюдая требования ГОСТ и ЕСКД. Изображение элементов на схемах, как правило, должно быть вертикальным или горизонтальным. Размеры схем

и графиков не следует чрезмерно растягивать или, напротив, выполнять их слишком мелкими. Вполне удобны и достаточны для наглядности рисунки размером 8*10 см, т.е. в четверть тетрадного листа. В некоторых случаях графики можно выполнять на отдельных листах миллиметровой бумаги стандартных форматов. Рекомендуемые по ГОСТ масштабы: 1:1, 1:2, 1:5, 1:10. Так же схемы, графики и другие чертежи могут быть выданы преподавателем или выполнены с помощью компьютерных программ для обучающихся с ограниченными возможностями здоровья.

Итоги проделанной работы могут быть изложены в форме заключения по работе или в виде кратких выводов, которые бы конкретно, со ссылками на таблицы или графики, отвечали пунктам цели работы.

Отчет должен быть подписан обучающимся.

4. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторное занятие №1: Определение параметров аналоговых, импульсных и цифровых сигналов.

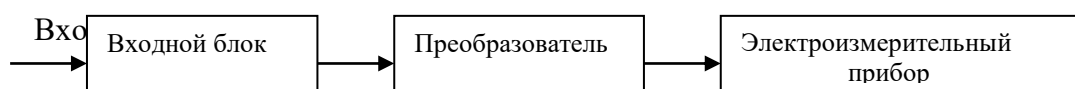
1 Цель работы.

- 1.1 Изучить функциональную схему.
- 1.2 Знать технические характеристики.
- 1.3 Знать назначение органов управления.
- 1.4 Научиться пользоваться и приобрести навыки в работе с вольтметром.

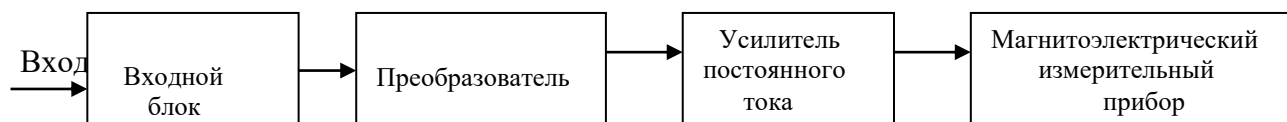
2 Пояснения к работе.

2.1 Краткие теоретические сведения.

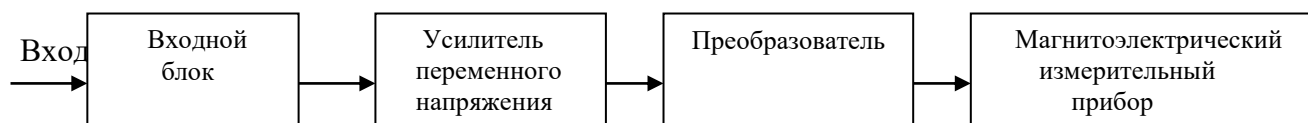
Для приборов, измеряющих напряжение переменного тока, характерны три варианта структурной схемы, что зависит от типа преобразователя (рис.2.1, а – в). Принцип действия вольтметра, построенного по схеме на рис.1,а, заключается в преобразовании напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока, которое измеряется стрелочным электроизмерительным прибором. Такие приборы пригодны лишь для измерения напряжения значительной амплитуды (их используют для контроля напряжения в низкочастотных и высокочастотных измерительных генераторах, модуляторах мощных генераторов и т.п.), так как для измерения малых напряжений они недостаточно чувствительны. Поэтому в подобных случаях применяют вольтметры, у которых после преобразователя (рис.2.1,б) либо до него (рис.2.1,в) дополнительно включен усилитель.



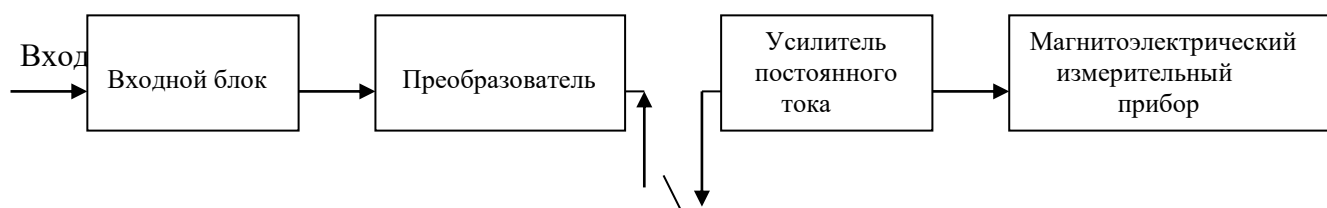
а)



б)



в)



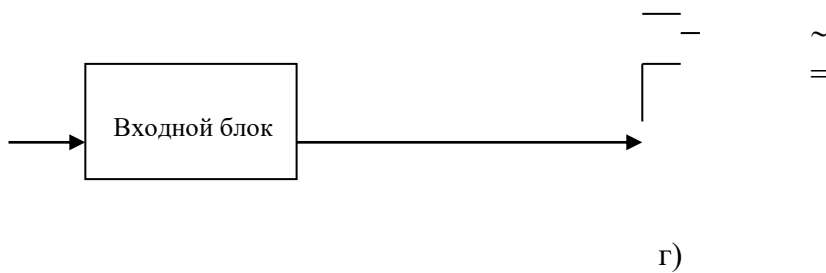


Рис.2.1

Сравнивая структурные схемы на рис.2.1,б и в, можно ее до изучения конкретных схемных решений установить ряд свойств приборов, оценить их достоинства и недостатки. Вольтметры, построенные по первой схеме, отличаются очень широким диапазоном частот: они позволяют измерять напряжения высоких частот вплоть до 1 ГГц. Приборы же, выполненные по второй схеме, имеют более узкую полосу, ограниченную полосой пропускания усилителя напряжения переменного тока (как правило, до 10...50 МГц). Зато схема, показанная на рис.2.1,в, позволяет получить более высокую чувствительность, чем предыдущая, поскольку усилитель включен перед преобразователем. Такие схемы используют в милли- и микровольтметрах. Причем основным фактором, ограничивающим нижний предел измеряемого напряжения, являются собственные шумы усилителя. Следует отметить, что в схеме с предварительным усилителем возможны искажения формы напряжения (нелинейные искажения), которые практически отсутствуют в схеме, начинающейся с преобразователя.

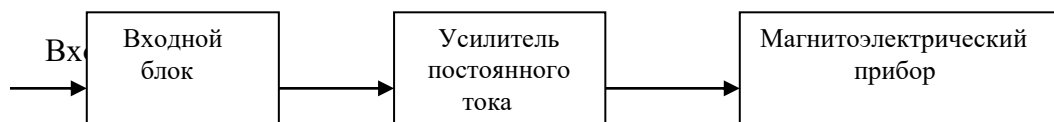


Рис.2.2

При сопоставлении схем, изображенных на рис.2.1, б и рис.2.2, видно, что их можно сочетать в одном приборе. Такой универсальный вольтметр (рис.2.1,г) служит для измерения напряжений как переменного, так и постоянного тока.

Следует отметить, что стрелочные электронные вольтметры характеризуются сравнительно невысокой точностью (по отношению к цифровым вольтметрам): у лучших типов приборов приведенная погрешность 1...2,5 %. Однако при решении многих практических задач такой точности вполне достаточно.

2.2 Перечень используемого оборудования.

2.2.1 Вольтметр GDM8145.

2.2.2 Генератор измерительный GAG - 810.

2.2.3 Персональный компьютер и аналого – цифровой преобразователь Handyprobe HP2.

3 Задание.

3.1 Изучить функциональную схему вольтметра В3-38А.

3.2 Изучить и знать назначение органов управления вольтметра.

3.3 Определить зависимости показаний вольтметра от частоты измеряемого напряжения.

3.4 Проверить правильность градуировки шкал вольтметра В3-38А.

3.5 По результатам измерений и вычислений сделать выводы о качестве параметров вольтметра.

4 Схема проведения опыта.



Рис. 4.1 Схема проверки правильности градуировки вольтметра.

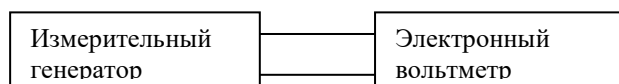


Рис. 4.2 Схема определения зависимости вольтметра от частоты измеряемого напряжения.

5 Работа в лаборатории.

5.1 Подготовка прибора к работе.

5.1.1 Проверить заземление прибора.

5.1.2 Проверить механический пульт прибора и при необходимости скорректировать нулевое показание стрелки.

5.1.3 Переключатель пределов измерений установить в положение 300В.

5.1.4 Включить прибор в сеть.

5.1.5 После этого прибор готов для проведения измерений.

5.2 Определить зависимость показаний вольтметра от частоты измеряемого напряжения.

В нормальной области частот приведенная погрешность прибора не превышает максимальной допустимой основной приведенной погрешности. В расширенной области частот дополнительная погрешность прибора не должна превышать основной приведенной погрешности. Ширина диапазона частот измеренных напряжений определяется системой вольтметра.

5.2.1 Соберите схему 4.2.

5.2.2 В соответствии с указанным вариантом произведите измерения.

5.2.3 В таблице 5.2.1 приведены измерительные частоты пределы шкалы вольтметра и исходное напряжение при частоте 45Гц

5.2.4 Настройте генератор на частоту 45Гц и изменяя напряжение на выходе генератора, установите стрелку вольтметра ВЗ-38А на указанную в таблице 5.2.1 величину U_{45} .

Таблица 5.2.1.

| № Варианта | Предел шкалы В | f, кГц | 0,02 | 0,045 | 0,2 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 100 | 200 |
|------------|----------------|--------|------|-------|-----|---|---|---|----|----|-----|-----|
| 1 | 1 | | | 0,5В | | | | | | | | |
| 2 | 3 | | | 1,5В | | | | | | | | |
| 3 | 3 | | | 2,5В | | | | | | | | |
| 4 | 10 | | | 4В | | | | | | | | |
| 5 | 10 | | | 5В | | | | | | | | |

- 5.2.5 Измените частоту генератора (см. табл.5.2.1) и запишите показания вольтметра.
 5.2.6 Заданные, измеренные и рассчитанные величины заносите в табл.5.2.2

Таблица 5.2.2

| № Ва- рианта | f, кГц | 0,02 | 0,045 | 0,2 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 100 | 200 |
|-----------------|----------------|------|-------|-----|---|---|---|----|----|-----|-----|
| | U, В | | | | | | | | | | |
| | ΔU , В | | | | | | | | | | |
| | δ , % | | | | | | | | | | |

- 5.2.7 Рассчитайте абсолютные и относительные погрешности в сравнении с напряжением, установленным при частоте 45Гц по формулам:

$$\Delta U = U_f - U_{45} \quad \delta = \frac{\Delta U}{U_{45}} \cdot 100\%$$

- 5.2.8 Постройте график $U(f)=f(f)$

- 5.3 Проверка правильности градуировки шкал вольтметра.

5.3.1 Правильность градуировки шкалы электронного вольтметра оценивается посредством сравнения приведенной относительной погрешности, подсчитанной по результатам измерений, с погрешностью электронного вольтметра по его технической характеристике.

- 5.3.2 Соберите схему (рис.4.1)

- 5.3.3 В данной лабораторной работе как образцовый вольтметр используйте ПК с АЦП Handyprobe HP2. Подключить к выходу генератора АЦП. Запуск рабочей программы Handyprobe HP2 осуществляется из меню «Программы», кнопки «Пуск». Получить на экране монитора стартовое меню (рис. 5.1)

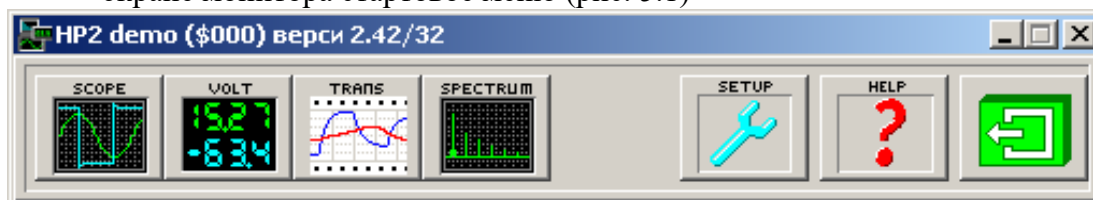


Рис 5.1

Запуск главного окна цифрового вольтметра осуществляется путём нажатия кнопки “VOLT”(рис.5.2)

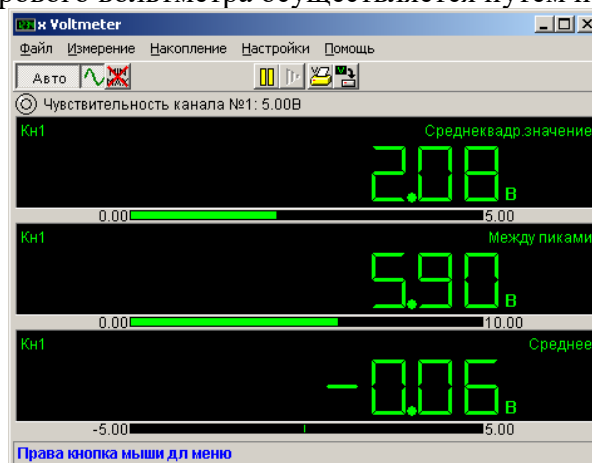


Рис 5.2

- 5.3.4 В таблице 5.2.1 приведены измерительные частоты, пределы шкалы вольтметра и исходное напряжение.
- 5.3.5 Настройте генератор на частоту, указанную в таблице 5.2.1, изменяя напряжение на выходе генератора согласно варианту, установить напряжение на проверяемом вольтметре ВЗ-38А и записать показание образцового вольтметра $U(0)$.
- 5.3.6 Рассчитайте абсолютные погрешности по формуле:

$$\Delta U = U_n - U_0$$

где $U(n)$ -показания проверяемого вольтметра, В,
 $U(0)$ -показания образцового вольтметра, В.

- 5.3.7 Рассчитайте приведенную погрешность δ , проверяемого прибора по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta U_{\max}}{U_{\text{пред}}} \cdot 100\%$$

где U_{\max} – наибольшая абсолютная погрешность, полученная при проверке, В
 $U_{\text{пред}}$ - конечное значение установленного предела измерения, В.

Таблица 5.3.1.

| № Ва-риант | F, кГц | Предел Измерения 10мВ | | | Предел Измерения 100мВ | | | 1В | | | 3В | | | 10В | | |
|------------|--------|-----------------------|-----|-----|------------------------|----|----|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 1,5 | 5 | 9 | 10 | 50 | 90 | 0,2 | 0,6 | 0,8 | 1 | 2 | 3 | 2 | 6 | 9 |
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 10 | 2 | 6 | 8 | 24 | 54 | 94 | 0,1 | 0,5 | 0,9 | 1,2 | 2,5 | 2,8 | 1,4 | 5,4 | 9,4 |
| 3 | 15 | 2,4 | 5,4 | 9,4 | 20 | 60 | 80 | 0,24 | 0,54 | 0,94 | 0,8 | 1,6 | 2,6 | 1,8 | 5,2 | 8,8 |
| 4 | 50 | 1,4 | 5,6 | 9,4 | 30 | 60 | 90 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 0,9 | 1,8 | 2,8 | 2,4 | 5,8 | 8,6 |
| 5 | 100 | 3 | 6 | 9 | 14 | 56 | 84 | 0,36 | 0,64 | 0,85 | 0,85 | 2 | 2,9 | 2 | 5 | 8 |

Таблица 5.3.2

| № Вариант | f, кГц | Предел измерения 10мВ | 100мВ | 1В | 2В | 3В |
|-----------|--------------------------|-----------------------|-------|----|----|----|
| 1. | $U(n)$, В | | | | | |
| 2. | $U(0)$, В | | | | | |
| 3. | ΔU , В | | | | | |
| 4. | $\delta_{\text{по } \%}$ | | | | | |
| 5. | $\delta\%$ по T_y | | | | | |

5.3.8 Заданные, измеренные и рассчитанные величины занести в таблицу.

6 Содержание отчета.

Отчёт должен содержать

- 6.1 Название работы
- 6.2 Цель работы.
- 6.3 Задание.
- 6.4 Схема измерения.
- 6.5 Перечень оборудования.
- 6.6 Таблицы измерений и расчётов.
- 6.7 Графики.
- 6.8 Вывод по работе.
- 6.9 Ответы на контрольные вопросы.

7 Контрольные вопросы.

- 7.1 Каковы достоинства электронных вольтметров?
- 7.2 Область применения электронных вольтметров?
- 7.3 По каким основным схемам строятся электронные вольтметры?
- 7.4 Какие требования предъявляются к усилителю переменного тока электронного вольтметра?
- 7.5 Дать краткую характеристику АЦП Handyprobe HP2.

Лабораторное занятие №2: Исследование простейших RC - цепей

Цель работы — на простейших примерах освоить основные понятия и методы анализа линейной цепи при гармонических колебаниях.

Изучаются следующие **основные вопросы**:

- 1) понятие комплексной амплитуды гармонического колебания;
- 2) комплексный метод анализа линейной цепи при гармонических колебаниях;
- 3) поведение простейшей нерезонансной цепи (последовательной RC-цепи) при воздействии гармонических колебаний;
- 4) векторная диаграмма изучаемого процесса;
- 5) правила вычисления эквивалентной емкости при параллельном и последовательном соединении элементов.

Домашнее задание

Изучите вышеперечисленные основные вопросы и конспект лекций.

1. Изобразите схемы изучаемых цепей:

- цепи из последовательно соединенных резистора и конденсатора (выходное напряжение снимается с конденсатора);

- цепи из последовательно соединенных конденсатора и резистора (выходное напряжение снимается с резистора).

На каждой схеме укажите стрелками входное напряжение $u_{вх}$ и выходное напряжение u_C или u_R .

2. Выпишите основные формулы, составляющие математическую модель изучаемых процессов, т.е. формулы для расчета амплитуд U_C и U_R и начальных фаз φ_C и φ_R напряжений на элементах цепи при подаче на ее вход гармонического напряжения

$$u_{вх}(t) = U_{вх} \cos(\omega t + \varphi_{вх}).$$

В формулах используйте обозначение коэффициента затухания цепи $\alpha = 1/(RC)$.

3. Задавшись значениями $U_{вх}=1$ В и $\varphi_{вх}=0^\circ$, рассчитайте значения U_C , U_R , φ_C , φ_R для трех значений емкости: $C=1/(2\omega R)$, $C=1/(\omega R)$, $C=2/(\omega R)$. Результаты расчета внесите в таблицу.

Образец таблицы

| C | U_C , В | U_R , В | φ_C , гр. | φ_R , гр. | Примечания |
|-----------------|-----------|-----------|-------------------|-------------------|------------|
| $1/(2\omega R)$ | | | | | Расчет |
| | | | | | Измерение |
| $1/(\omega R)$ | | | | | Расчет |
| | | | | | Измерение |
| $2/(\omega R)$ | | | | | Расчет |
| | | | | | Измерение |

4. Для каждого из трех вышеуказанных случаев постройте в масштабе векторную диаграмму напряжений в цепи.

5. Для каждого из трех вышеуказанных случаев постройте в масштабе семейство из трех осциллограмм — входного напряжения $u_{вх}(t)$ и выходных напряжений $u_C(t)$ и $u_R(t)$.

Лабораторное занятие № 3: Исследование вольт - амперных характеристик полупроводникового диода

Цель: Анализ работы и определение параметров полупроводникового прибора на основе исследования вольт - амперных характеристик выпрямительного диода и стабилитрона.

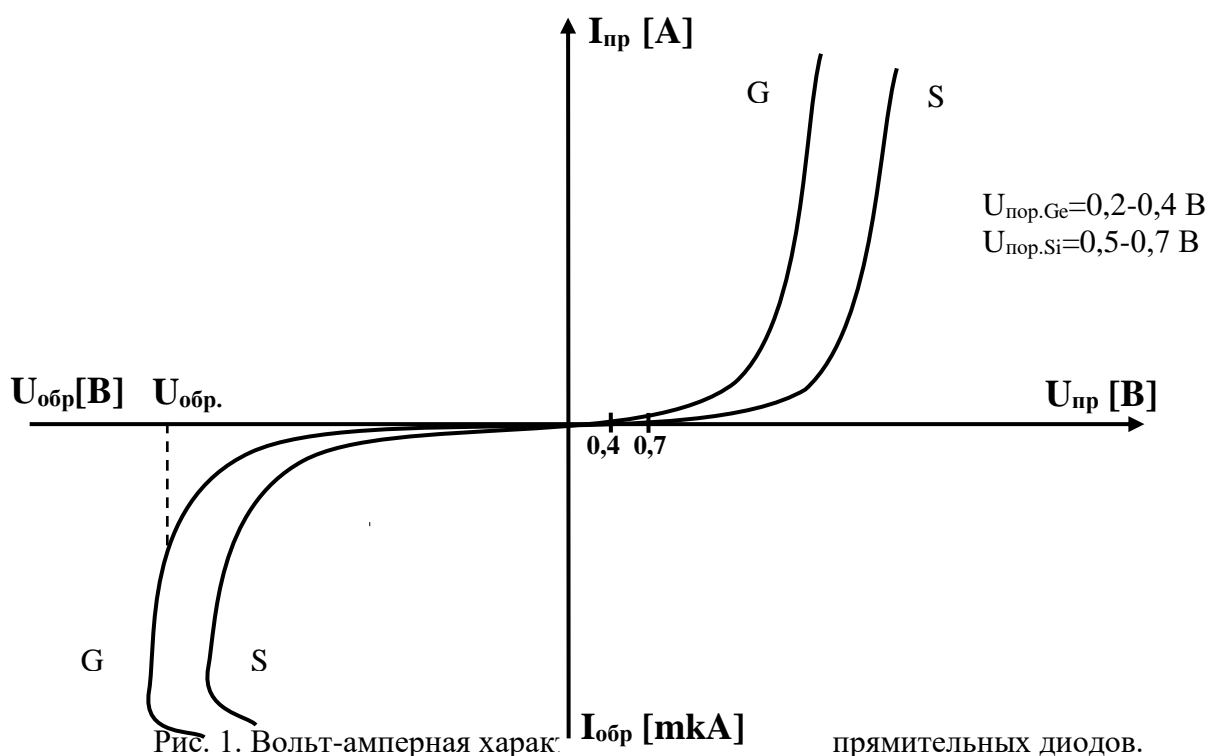
2. Основы теории.

Работа полупроводниковых приборов основана на использовании электрических свойств р-п перехода, возникающего на границе раздела двух полупроводников разного типа проводимости. Свойства полупроводников существенно зависят от введения в них определенных примесей. Введение донорной примеси в полупроводник создает электронную электропроводность, в результате чего образуется полупроводник п-типа, а введение

акцепторной примеси - создает дырочную электропроводность, в результате чего образуется полупроводник p-типа.

Полупроводниковым диодом называют двухэлектродный прибор, содержащий один электронно-дырочный p-n переход. Наиболее распространены две группы диодов: выпрямительные и импульсные. Выпрямительные диоды применяются для выпрямления переменного тока, импульсные – в схемах электронных устройств, работающих в импульсных режимах. Особое место в полупроводниковой электронике занимают стабилитроны, которые предназначены для стабилизации напряжения.

Работа выпрямительного полупроводникового диода и стабилитрона определяется их вольт-амперными характеристиками. На рис. 1 представлены характеристики для двух видов выпрямительных диодов: германиевого (Ge) и кремневого (Si), которые отличаются величинами порогового и обратного напряжения.



Пороговое напряжение возникает в пограничном слое двух полупроводников разного типа в результате рекомбинации электронов и дырок. Таким образом образуется **запирающий слой** с $E_{зап}(U_{пор})$, лишенный подвижных носителей заряда и поэтому обладающий высоким электрическим сопротивлением (рис.2).

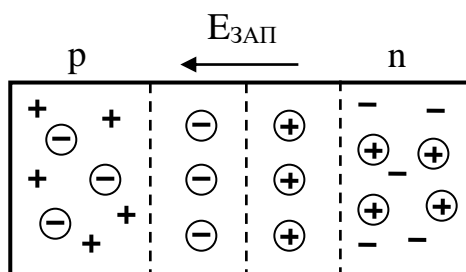


Рис.2. Образование р-п перехода.

Если к р-п переходу приложить внешнее напряжение в прямом направлении ($U_{пр.}$), причем $U_{пр.}$ меньше $U_{пор.}$, то прямой ток $I_{пр.}$ будет мал. При превышении внешнего напряжения, приложенного в прямом направлении над пороговым напряжением диода ток $I_{пр.}$ резко возрастает и величина его будет определяться только сопротивлением р-п перехода, которое не превышает единиц- десятков Ом. Такой ток называется диффузионным.

При приложении внешнего напряжения в обратном направлении р-п переход закрыт. $I_{обр.}$ определяется движением неосновных носителей заряда, называется дрейфовым током, является очень малой величиной, которой в инженерных расчетах иногда пренебрегают. Сопротивление диода в обратном включении измеряется в кОм. Кремниевые диоды имеют существенно меньшее значение обратного тока по сравнению с германиевыми.

Закрытый р-п переход, помимо высокого сопротивления обладает еще и электрической емкостью, которая зависит от его площади и ширины, а также от диэлектрической проницаемости запирающего слоя.

При значении внешнего напряжения $U_{обр.}$ больше предельно допустимого $U_{обр.макс.}$, р-п переход пробивается, $I_{обр.}$ резко возрастает.

Пробой р-п перехода связан с тем, что при движении через р-п переход под действием электрического поля неосновные носители заряда приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов полупроводника. В переходе начинается лавинообразное нарастание носителей заряда, что приводит к резкому увеличению обратного тока через р-п переход при почти неизменном обратном напряжении. Этот вид электрического пробоя называют **лавинным**.

Для любого вида **электрического пробоя** характерна обратимость, которая заключается в том, что первоначальные свойства р-п перехода полностью восстанавливаются, если снизить напряжение на р-п переходе. Благодаря этому электрический пробой используют в качестве рабочего режима в полупроводниковых диодах.

Наряду с электрическим, в диодах возможно возникновение **теплового пробоя**. Такой пробой возникает при возрастании температуры р-п перехода в результате его нагрева обратным током и недостаточного теплоотвода, что усиливает процесс генерации пар носителей

заряда. Это приводит к дальнейшему увеличению обратного тока и нагреву р-п перехода, что может вызвать разрушение перехода. Тепловой пробой разрушает р-п переход и не восстанавливается.

Из ВАХ следует, что р-п переход обладает неодинаковой электрической проводимостью на прямой и обратной ветвях.

Рабочим участком диода является прямая ветвь на ВАХ (1-я четверть), которая соответствует открытому состоянию р-п перехода и характеризуется малым значением сопротивления диода.

Основные параметры выпрямительных диодов приводятся применительно к работе в однополупериодных выпрямителях с активной нагрузкой:

- Среднее за период прямое напряжение $U_{пр.}$ (доли В)
- Максимально допустимый выпряленный ток диода $I_{пр. max.}$ (сотни мА- десятки А)
- Максимально допустимое обратное напряжение диода $U_{обр. max.}$ (десятки – тысячи В)
- Средний за период обратный ток диода $I_{обр.}$ при максимально допустимом обратном напряжении (доли мА- единицы мА)
- Дифференциальное сопротивление $R_{диф}$ (единицы – десятки - сотни Ом)

Рабочим участком стабилитрона является участок обратной ветви (3-я четверть), соответствующий области электрического пробоя и характеризующийся высоким значением сопротивления. При работе в этой области обратное напряжение на стабилитроне $U_{ст.}$ мало изменяется при относительно больших изменениях тока стабилитрона $I_{ст.}$

Основными параметрами стабилитрона являются:

- Напряжение на участке стабилизации $U_{ст.}$ (единицы – десятки В)
- Дифференциальное сопротивление на участке стабилизации $R_{диф} = dU_{ст.}/dI_{ст.}$ (тысячи Ом)
- Минимальный ток стабилизации $I_{ст. min.}$ (доли – десятки мА)
- Максимальный ток стабилизации $I_{ст. max.}$ (единицы мА – единицы А)

Существует несколько систем маркировки диодов и стабилитронов, в частности система маркировки диодов может состоять из шести элементов:

1-й элемент (буква или цифра) указывает исходный полупроводниковый материал, из которого изготовлен диод: Г или 1 –германий, К или 2 -кремний.

2-й элемент - буква, показывающая подклассы или группы полупроводниковых приборов, например: Д - универсальный, С- стабилитрон.

3-й элемент - число, определяющее назначение или электрические свойства диода (101-399- выпрямительные, 401-499- универсальные, 501-599- импульсные). У стабилитронов эта цифра определяет мощность рассеяния.

4-й, 5-й и 6-й элементы - указывают порядковый номер технологической разработки диода и параметрические группы. У стабилитронов 4-я и 5-я цифры показывают номинальное напряжение.

3. Примеры решения задач по теме лабораторной работы.

Задача №1.

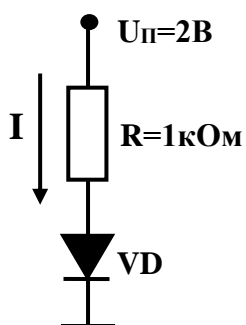
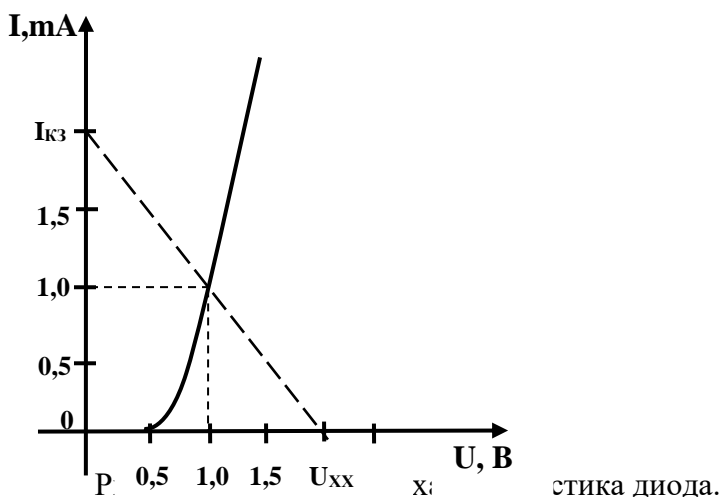


Рис.3 Схема включения диода.



Известно: ВАХ диода (рис.4), $U_{П}=2В$, $R=1кОм$. Определить ток, текущий в схеме, представленной на рис.3.

Решение:

Для решения запишем 2-ой закон Кирхгофа для цепи (рис.3):

$$U_{\Pi} = I \cdot R + U_{\text{д}},$$

где $U_{\text{д}}$ - падение напряжения на диоде.

Определение I и $U_{\text{д}}$ в рабочем режиме удобно произвести графически.

Построим нагрузочную прямую по двум точкам:

- В режиме хх:

напряжение холостого хода $U_{\text{хх}}$ - это точка пересечения нагрузочной прямой с осью абсцисс ($U_{\text{хх}} = U_{\Pi} = 2 \text{ В}$).

- В режиме кз:

ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ - точка пересечения прямой с осью ординат ($I_{\text{кз}} = U_{\Pi}/R = 2 \text{ mA}$).

Точка пересечения нагрузочной прямой с характеристикой диода дает искомое решение задачи: $I = 1 \text{ mA}$, $U_{\text{д}} = 1 \text{ В}$.

Задача №2.

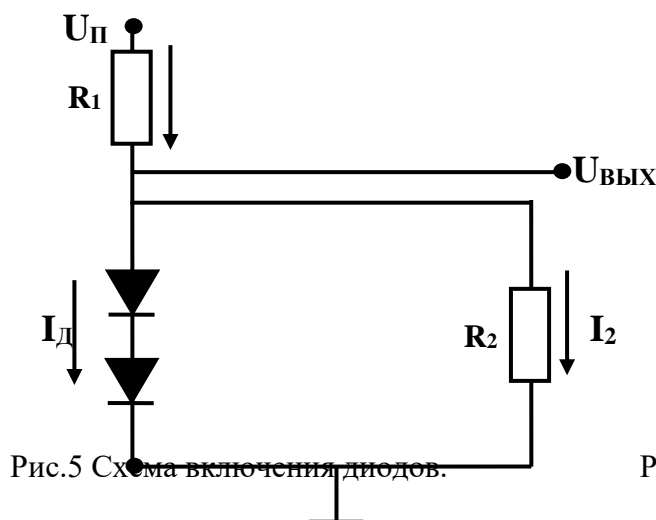


Рис.5 Схема включения диодов.

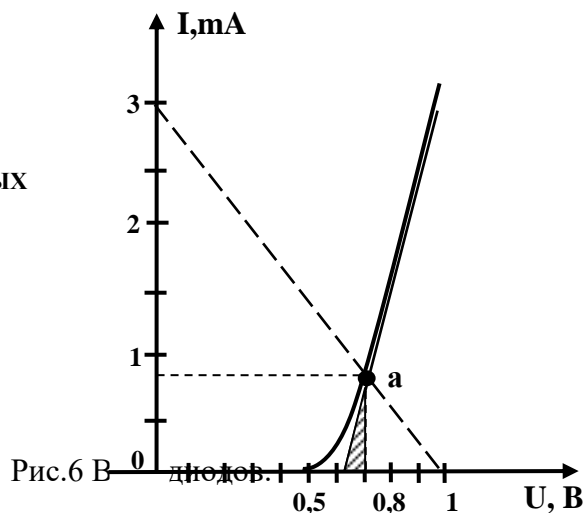


Рис.6 Выходная характеристика диодов.

Известно: ВАХ диодов (рис.6), $U_{\Pi} = 6 \text{ В}$, $R_1 = 2 \text{ кОм}$, $R_2 = 1 \text{ кОм}$.

Определить токи через диоды, напряжения на диодах и напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$,

$R_{\text{диф}}$ и $R_{\text{ст}}$.

Решение:

По второму закону Кирхгофа напряжение на двух диодах:

$$2U_{\text{д}} = U_{\text{ВЫХ}} = U_{\Pi} - I_1 \cdot R_1 = U_{\Pi} - R_1 \cdot (I_{\text{д}} + I_2)$$

$$2U_{\text{д}} = U_{\Pi} - I_2 \cdot R_1 - I_{\text{д}} \cdot R_1$$

Построим нагрузочную прямую по двум точкам полученного выражения:

- В режиме хх: $I_{\text{д}} = 0$

$$2U_{\text{д}} = U_{\Pi} - I_2 \cdot R_1 = U_{\Pi} - U_{\Pi} \cdot R_1 / (R_1 + R_2) = 6 - 6 \cdot 2/3 = 2 \text{ В}$$

Следовательно, напряжение на одном диоде $U_D = 1 \text{ В}$

- В режиме кз: $U_D = 0$;

$$I_D = U_{\Pi} / R_1 = 3 \text{ mA}$$

Точка пересечения нагрузочной прямой с характеристикой диода дает искомое решение задачи: $U_D = 0.7 \text{ В}$, $I_D = 0.8 \text{ mA}$

Для рабочей точки «а» из графика определим статическое сопротивление: $R_{\text{СТ}} = 0.7 / 0.8 = 0.87 \text{ кОм}$

Определим дифференциальное сопротивление $R_{\text{диф}}$ из заштрихованного на графике треугольника, как тангенс угла наклона касательной:

$$R_{\text{диф}} = 0.08 / 0.8 = 0.01 \text{ кОм}$$

4. Домашнее задание.

4.1. Проработать литературу по данному разделу.

4.2. Подготовить бланк отчета, с перечнем пунктов лабораторного задания. К каждому пункту начертить электрическую схему для проведения исследований, таблицы для записей экспериментальных и расчетных данных.

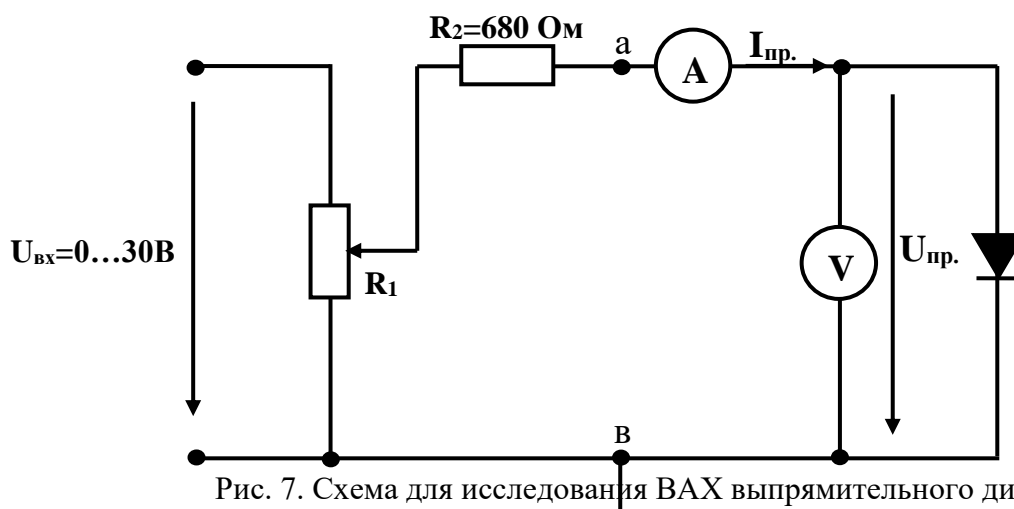
4.3. Записать формулы для проведения расчетов $R_{\text{диф}}$ и $R_{\text{СТ}}$ по характеристикам.

4.4. Ответить на контрольные вопросы.

4. Лабораторное задание.

4.1. Выпрямительный диод.

4.1.1. Собрать схему для исследования прямой ветви ВАХ выпрямительного диода (рис. 7).



4.1.2. Снять зависимость $I_{\text{пр.}} = f(U_{\text{пр.}})$ с помощью схемы (рис. 7).

В качестве R_1 использовать регулируемое сопротивление номиналом 1 кОм. Для получения входного напряжения 30В необходимо включить последовательно два источника напряжения. Ступенчато изменяя R_1 , исследовать прямую ветвь диода, для чего измерить с помощью амперметра прямой ток $I_{пр}$ и с помощью вольтметра прямое напряжение $U_{пр}$ диода. Результаты эксперимента занести в таблицу 1.

Таблица 1.

| | | | | | | | | | | |
|----------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|
| $U_{пр}, [В]$ | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,75 |
| $I_{пр}, [mA]$ | | | | | | | | | | |

5. Требования к оформлению отчета.

1. Построить по экспериментальным данным прямую и обратную ветви ВАХ исследуемых полупроводниковых приборов.
2. Определить $R_{ст}$ и $R_{диф}$ для прямой и обратной ветвей полупроводниковых приборов.

6. Контрольные вопросы.

1. Какими зарядами создается запирающий слой p-n перехода и внутреннее электрическое поле перехода?
2. Какие элементы периодической системы Д.И. Менделеева относят к полупроводникам?
3. Как влияют примеси на свойства полупроводников?
4. Как влияет t^0 на проводимости полупроводников?
5. Какие типы полупроводниковых приборов вы знаете?
6. Объясните на примере особенности маркировки диодов.
7. Назовите основные параметры полупроводниковых диодов?
8. Как называется напряжение при котором диод становится проводящим?
9. Определите и сравните $R_{ст}$ и $R_{диф}$ по характеристикам.
10. Назначение стабилитрона, его принцип действия.
11. Как называется полупроводниковый прибор, предназначенный для использования в качестве ёмкости, управляемой обратным напряжением $U_{обр}$?
12. Какие существуют виды пробоя p-n перехода?

Лабораторное занятие № 4: Расчёт параметров полупроводниковых приборов

Цель работы:

Изучение основных параметров и характеристик полупроводниковых приборов, знание их условных обозначений и назначение.

Знать: виды, назначение, устройство полупроводниковых приборов

Уметь: рассчитывать основные параметры и характеристики полупроводниковых приборов

1. Теоретическое введение

Сопротивление диода постоянному току:

$$R_0 = U_a / I_a ,$$

где U_a – напряжение на диоде в прямом направлении, В; I_a – ток через диод в прямом направлении, А.

Сопротивление диода переменному току (дифференциальное сопротивление):

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a ,$$

где ΔU_a – изменение прямого напряжения, В; ΔI_a – изменение прямого тока под действием изменения прямого напряжения, А.

Крутизна вольт-амперной характеристики диода:

$$S = \Delta I_a / \Delta U_a .$$

Мощность потерь на аноде диода:

$$P_k = I_k U_k .$$

Входное сопротивление транзистора переменному току:

$$R_{вх} = \Delta U_{вх} / \Delta I_{вх} ,$$

где $\Delta U_{вх}$ – изменение входного напряжения, В; $\Delta I_{вх}$ – изменение входного тока под действием изменения входного напряжения, А.

Коэффициенты:

- усиления тока базы в схеме с общим эмиттером:

$$h_{21э} = \Delta I_k / \Delta I_б ;$$

- передачи тока эмиттера в схеме с общей базой:

$$h_{21б} = \Delta I_k / \Delta I_э ,$$

где ΔI_k , $\Delta I_б$, $\Delta I_э$ – изменения токов коллектора, базы и эмиттера.

Связь между коэффициентом усиления тока базы $h_{21э}$ и коэффициентом передачи тока эмиттера $h_{21б}$:

$$h_{21э} = h_{21б} / (1 - h_{21б}) .$$

Мощность потерь на коллекторе:

$$P_K = I_K U_K,$$

где I_K – ток коллектора, А; U_K – напряжение на коллекторе, В.

1.

Пример решения.

Дано: площадь $A = 65 \cdot 65 \text{ мкм}^2$, толщина области n-типа $W_n = 45 \text{ мкм}$, p-типа – $W_p = 325 \text{ мкм}$. При температуре $T = 300 \text{ К}$ удельное сопротивление p-области $\rho_p = 3,25 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, удельное сопротивление n-области $\rho_n = 0,06 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, время жизни неосновных носителей $\tau_n = \tau_p = 0,02 \text{ мкс}$.

Величина контактной разности потенциалов определяется формулой:

$$\varphi = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{A0} N_{D0}}{n_i^2} \quad (1.1)$$

Собственная концентрация свободных носителей для $T = 300 \text{ К}$ $n_i = 1,45 \cdot 10^{10} (\text{см}^{-3})$. Проводимость полупроводника обратно пропорционально его удельному сопротивлению (которое нам дано):

$$\sigma_n = \frac{1}{\rho_n} \quad (1.2)$$

В области примесной проводимости, где концентрация основных носителей на много выше концентрации неосновных, именно концентрация и подвижность основных носителей заряда и определяет электрическую проводимость полупроводника.

С учетом этого можно записать следующую формулу:

$$\sigma \approx \sigma_n = q n_{n0} \mu_n, \quad (1.3)$$

где $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ – элементарный заряд, n_{n0} – равновесная концентрация электронов в n-области, а μ_n – дрейфовая подвижность электронов.

В рабочем диапазоне температур практически все атомы примеси ионизированы, и пренебрегая собственной концентрацией n_i электронов (поскольку в рабочем диапазоне она существенно меньше концентрации примеси) можно считать, что концентрация электронов n-области равна концентрации доноров в этой области:

$$n_{n0} = N_{dn} \quad (1.4)$$

Приравниваем правые части формул (1.2) и (1.3) и подставляем в них (1.4). Выражаем формулу для N_{dp}

$$N_{dp} = \frac{1}{q \rho_p \mu_p} \quad (1.5a)$$

Аналогичное выражение получается для N_{dn} :

$$N_{dn} = \frac{1}{q \rho_n \mu_n}, \quad (1.5b)$$

В качестве нулевого приближения для концентрации доноров в n – области и концентрации акцепторов в р – области воспользуемся графиком.

При $\rho_n = 0,06 = 6 \cdot 10^{-2}$ (Ом*см), $N_{dn}^{(0)} = 1,5 \cdot 10^{17}$ (см⁻³).

При $\rho_p = 3,25$ (Ом*см), $N_{ap}^{(0)} = 4 \cdot 10^{15}$ (см⁻³).

Посчитаем μ_n и μ_p по формулам

$$\mu_n = 88 * T_n^{-0.57} + \frac{7.4 * 10^8 * T^{-2.33}}{1 + \left[\frac{N_{dn}}{1.26 * 10^{17} * T_n^{2.4}} \right] * 0.88 * T_n^{-0.146}} \quad (1.6a)$$

$$\mu_p = 54.3 * T_n^{-0.57} + \frac{1.36 * 10^8 * T^{-2.33}}{1 + \left[\frac{N_{ap}}{2.35 * 10^{17} * T_n^{2.4}} \right] * 0.88 * T_n^{-0.146}}, \quad (1.6b)$$

где Т абсолютная температура, а $T_n = T/300$.

Так как Т = 300, то $T_n = 1$.

$$\mu_n = 88 + \frac{7.4 * 10^8 * 300^{-2.33}}{1 + \left[\frac{1.5 * 10^{17}}{1.26 * 10^{17}} \right] * 0.88} = 698,64 \left(\frac{\text{см}^2}{\text{В} * \text{с}} \right)$$

$$\mu_p = 54.3 + \frac{1.36 * 10^8 * 300^{-2.33}}{1 + \left[\frac{4 * 10^{15}}{2.35 * 10^{17}} \right] * 0.88} = 280,7 \left(\frac{\text{см}^2}{\text{В} * \text{с}} \right)$$

Подставим эти значения в формулы (1.5a) и (1.5b) и вычислим N_{ap} и N_{dn} :

$$N_{dn} = \frac{1}{1,6 * 10^{-19} * 6 * 10^{-2} * 698,64} = 1,5 * 10^{17} \text{ (см}^{-3}\text{)}$$

$$N_{ap} = \frac{1}{1,6 * 10^{-19} * 3,25 * 280,7} = 6,8 * 10^{15} \text{ (см}^{-3}\text{)}$$

Полученный для N_{ap} результат не совпадает со значением, полученным из. Причина этому может заключаться в ошибке формулы (1,6b). Для проверки воспользуемся эмпирической формулой для μ_n и μ_p в кремнии с примесями:

$$\mu = \mu_{min} + \left(\frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{N}{N_{ref}} \right)^\alpha} \right) \quad (1.7)$$

Значения для расчета по этой формуле возьмем из таблицы 1.1:

Таблица 1.1. Значение параметров μ_{max} , μ_{min} , N, N_{ref} .

| | | |
|--|--|--|
| | | |
|--|--|--|

| | Легированная примесь Р | Легированная примесь В |
|---|------------------------|------------------------|
| $\mu_{\min}, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ | 68,5 | 44.9 |
| $\mu_{\max}, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ | 1414 | 470.5 |
| $N_{\text{ref}} \text{см}^{-3}$ | $9.20 \cdot 10^{16}$ | $2.23 \cdot 10^{17}$ |
| α | 0.711 | 0.719 |

$$\mu_n = 68.5 + \left(\frac{1414 - 68.5}{1 + \left(\frac{1.5 \cdot 10^{17}}{9.20 \cdot 10^{16}} \right)^{0.711}} \right) = 625,64 \left(\frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \right)$$

$$\mu_p = 44.9 + \left(\frac{470.5 - 44.9}{1 + \left(\frac{4 \cdot 10^{15}}{2.23 \cdot 10^{17}} \right)^{0.719}} \right) = 448,312 \left(\frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \right)$$

Подставим эти значения в формулы (1.5а) и (1.5б) и вычислим N_{dn} и N_{ap} :

$$N_{\text{dn}} = 1,7 \cdot 10^{17} (\text{см}^{-3})(\text{см}^{-3}), N_{\text{ap}} = 4,3 \cdot 10^{15} (\text{см}^{-3})(\text{см}^{-3}).$$

Полученные значения подвижностей хорошо согласуются с оценками, полученными по графику и принимаются в качестве нулевого приближения.

Сравнивая значения N_{dn} и N_{ap} , приходим к выводу, что $N_{\text{dn}} > N_{\text{ap}}$, то есть р-область легирована слабее, чем п-область и поэтому является базой диода, а п-область – эмиттером.

Теперь можно найти контактную разность потенциалов по формуле (1.1):

$$\varphi_k = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1.6 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{1,7 \cdot 10^{17} \cdot 4,3 \cdot 10^{15}}{(1,45 \cdot 10^{10})^2} = 0.8 (\text{В})$$

Равновесную ширину ОПЗ плоского р-п перехода в отсутствии внешнего поля в приближении полного обеднения можно рассчитать по формуле:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_0 \varepsilon (N_{\text{ap}} + N_{\text{dn}}) \varphi_k}{q N_{\text{ap}} N_{\text{dn}}}} \quad (1.7)$$

Для удобства значение $\frac{N_{\text{ap}} \cdot N_{\text{dn}}}{N_{\text{ap}} + N_{\text{dn}}}$ можно рассчитать сразу:

$$\frac{N_{\text{ap}} \cdot N_{\text{dn}}}{N_{\text{ap}} + N_{\text{dn}}} = 4,2 \cdot 10^{15} (\text{см}^{-3}) \quad (1.8)$$

Составляющие равновесной ширины р-п перехода в п-области и р-области определяются соответственно формулами:

$$\delta_{ce} = \frac{\delta_e N_{ep}}{N_{ep} + N_{ce}} \quad (1.9)$$

$$\delta_{ep} = \frac{\delta_e N_{ce}}{N_{ep} + N_{ce}} = \delta_e - \delta_{ce} \quad (1.10)$$

Проведём вычисления:

$$\delta_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,7 \cdot (1,7 + 0,043) \cdot 10^{17} \cdot 0,8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,7 \cdot 10^{17} \cdot 4,3 \cdot 10^{15}}} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ (см)}$$

$$\delta_{ep} = \frac{3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1,7 \cdot 10^{17}}{1,743 \cdot 10^{17}} \approx 3,414 \cdot 10^{-5} \text{ (см)}$$

$$\delta_{ce} = \frac{3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 4,3 \cdot 10^{15}}{4,3 \cdot 10^{15} + 1,7 \cdot 10^{17}} = 8,635 \cdot 10^{-7} \text{ (см)}$$

Результаты показывают, что большая часть ОПЗ находится в базовой области диода, что подтверждает уравнение электронейтральности:

$$N_{ep} \delta_{ep} = N_{ce} \delta_{ce} \quad (1.11)$$

При $U_{обр} = 5\text{В}$: $\delta = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_0 \varepsilon (\varphi_k + |U_{обр}|)}{q N_k}} \quad , \quad (1.12)$

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,7 \cdot (0,5 + 5)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,2 \cdot 10^{15}}} = 13,3 \cdot 10^{-5} \text{ (см)}$$

$$\delta_p = \frac{13,3 \cdot 10^{-5} \cdot 1,7 \cdot 10^{17}}{1,743 \cdot 10^{17}} \approx 12,97 \cdot 10^{-5} \text{ (см)}$$

$$\delta_n = \frac{13,3 \cdot 10^{-5} \cdot 4,3 \cdot 10^{15}}{1,743 \cdot 10^{17}} \approx 32,81 \cdot 10^{-7} \text{ (см)}$$

При $U_{обр} = 10\text{В}$:

$$\delta = 18,2 \cdot 10^{-5} \text{ (см)}$$

$$\delta_n = 44,89 \cdot 10^{-7} \text{ (см)}$$

$$\delta_p = 17,75 \cdot 10^{-5} \text{ (см)}$$

Вычисления показывают, что ширина ОПЗ p-n перехода увеличивается с ростом обратного

напряжения в соответствии с соотношением $\delta \sim \sqrt{|U_{обр}|}$

Максимальная величина напряжённости электрического поля в ОПЗ p-n перехода в приближении полного обеднения определяется выражением:

$$E_{\max} = \frac{q N_{ep} \delta_p}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{q N_{ce} \delta_n}{\varepsilon_0 \varepsilon} \quad (1.13)$$

Можно воспользоваться любой из этих формул, так как они, вследствие уравнения электронейтральности (1.11) дают одинаковые результаты. Возьмём первую формулу и рассчитаем значение E_{\max} при $U=0$:

$$E_{\max} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,3 \cdot 10^{15} \cdot 3,414 \cdot 10^{-5}}{11,7 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} \approx 22684,16 \left(\frac{\text{В}}{\text{см}} \right)$$

Ток насыщения диода выражается через плотность тока насыщения следующим образом: $I_s = A j_s$ (1.14)

Выражение для плотности тока насыщения диода с идеальным p-n переходом в общем случае имеет вид:

$$j_s = q \left(\frac{p_{v0} D_{v0} \cosh \frac{W_p}{L_p}}{L_p} + \frac{n_{vp} D_{vp} \cosh \frac{W_p}{L_p}}{L_p} \right) \quad (1.15)$$

Рассчитаем значения L_p и L_n : $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ (1.16)

$$D_p = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 11,6 \text{ (см}^2/\text{с)}$$

$$D_n = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 625,64 = 16,2 \text{ (см}^2/\text{с)}$$

$$L_p = \sqrt{11,6 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ (см)}$$

$$L_n = \sqrt{16,2 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ (см)}$$

Отметим, что $W_n \gg L_p$ и $W_p \gg L_n$, следовательно у нас диод с широкой базой и поэтому $\cosh \frac{W_p}{L_p} \approx \cosh \frac{W_n}{L_n} \approx 1$. Видим, что мы имеем резкий n⁺-р ($N_{dn} > N_{ap}$) переход, поэтому равновесная концентрация неосновных носителей в базе n_{p0} много больше концентрации неосновных носителей в эмиттере p_{n0} (так как с основными носителями всё обстоит наоборот), и поэтому первым слагаемым в формуле (15) можно пренебречь, вследствие его малости по сравнению со вторым. Учтем, что $D_n \approx D_p$ и $L_n \approx L_p$, преобразуем формулу (1.15) к виду:

$$j_s = \frac{q D_{np} n_{p0}}{L_{np}} \quad (1.17)$$

Для нахождения коэффициента диффузии электронов D_n воспользуемся соотношением

Эйнштейна: $D_{vp} = \frac{kT}{q} \mu_{vp}$, (1.18)

где μ_{vp} – дрейфовая подвижность электронов в p-области. Она определяется по формуле (1.6a) с той лишь разницей, что вместо концентрации N_{dn} там используется N_{ap} .

Равновесную концентрацию неосновных носителей найдём из соотношения: $n_{p0} = n_{av} e^{-\frac{qV_0}{kT}}$, (1.19)

а диффузионная длина электронов определяется как

$$L_{ep} = \sqrt{D_{ep} \langle \tau_e \rangle} \quad (1.20)$$

Подставив формулы (17) – (20) в (14), получим окончательное выражение для тока насыщения диода:

$$I_s = AN_{di} e^{-\frac{q\phi_b}{kT}} \sqrt{\frac{kTq\mu_{np}}{\langle \tau_n \rangle}} \quad (1.21)$$

При этом заметим, что контактная разность потенциалов ϕ_k также зависит от

температуры:
$$\phi_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{ep} N_{dp}}{n_i^2(T)} \quad (1.22)$$

Зависимость собственной концентрации носителей в Si от температуры определяется выражением: $n_i(T) = 3,87 \cdot 10^{16} T^{3/2} e^{-\frac{36,4}{T}}$ (1.23)

Подставим (1.23) в (1.22)

$$\phi_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{ep} N_{dp}}{15 \cdot 10^{12} T^{3/2} e^{-\frac{36,4}{T}}} \quad (1.24)$$

Рассчитаем значения ϕ_k при температурах $T = 250K$ и $T = 400K$. Эти значения будем использовать при расчёте токов насыщения:

При $T = 250K$

$$\phi_k = \frac{138 \cdot 10^{-23} \cdot 250}{16 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{1,7 \cdot 10^{17} \cdot 4,3 \cdot 10^{16}}{15 \cdot 10^{12} (250)^{3/2} e^{-\frac{36,4}{250}}} = 0,879(B)$$

При $T = 400K$

$$\phi_k = \frac{138 \cdot 10^{-23} \cdot 400}{16 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{1,7 \cdot 10^{17} \cdot 4,3 \cdot 10^{16}}{15 \cdot 10^{12} (400)^{3/2} e^{-\frac{36,4}{400}}} = 0,678(B)$$

Проведём расчёты для величины тока насыщения диода:

При $T = 250K$

$$I_s = 65 \cdot 65 \cdot 10^{-13} \cdot 4,7 \cdot 10^{-17} e^{-\frac{0,879 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 250}} \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 250 \cdot 1024 \cdot 4,6 \cdot 10^{-18}}{2 \cdot 10^{-8}}} \approx 2,125 \cdot 10^{-22}(A)$$

При $T = 300K$

$$I_s = 3,959 \cdot 10^{-17}(A)$$

При $T = 400K$

$$I_s = 4,969 \cdot 10^{-15}(A)$$

Как видно из вычислений, ток диода очень резко зависит от температуры, значительно увеличиваясь при относительно небольшом изменении температуры. Это можно объяснить увеличением тепловой генерации неосновных носителей вблизи р-п перехода с повышением температуры, концентрация которых возрастает по закону Аррениуса.

В диоде есть ток через р – п переход и есть генерация неосновных носителей из эмиттера в базу и из базы в эмиттер. Коэффициент инжекции диода определяется как отношение полезной, в данном случае электронной, составляющей тока (плотности тока) к общему току (плотности

тока) через р-п переход:

$$\gamma = \frac{I_n}{I_{\text{пол/пн}}} = \frac{I_n}{I_n + I_p} = \frac{j_n^{\text{диф}}}{j_n^{\text{диф}} + j_p^{\text{диф}}} \quad (1.25)$$

где $j_p^{\text{диф}} = \frac{qD_p p_{\text{но}}}{L_p}$, (1,26а)

и аналогично

$$j_n^{\text{диф}} = \frac{qD_n n_{\text{ро}}}{L_n} \quad (1.26б)$$

Для нахождения коэффициента диффузии электронов D_n воспользуемся соотношением Эйнштейна (17). Выражение для коэффициента диффузии дырок D_p имеет аналогичный вид:

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad (1.27)$$

$$D_p = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 11,6 \quad (\text{см}^2/\text{с})$$

$$D_n = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 625,64 = 16,2 \quad (\text{см}^2/\text{с})$$

Диффузионная длина электронов определяется выражением (19). А диффузионная длина дырок будет определяться выражением (16):

$$L_p = \sqrt{11,6 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 4,8 \cdot 10^{-4} \quad (\text{см})$$

$$L_n = \sqrt{16,2 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 5,6 \cdot 10^{-4} \quad (\text{см})$$

Тогда, произведя нужные вычисления, получим:

$$j_p^{\text{диф}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 11,6 \cdot 1,2 \cdot 10^7}{5,6 \cdot 10^{-4}} = 4,64 \cdot 10^{-12}, (\text{А/см}^2)$$

$$j_n^{\text{диф}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 16,2 \cdot 48,8 \cdot 10^7}{5,6 \cdot 10^{-4}} = 225,8 \cdot 10^{-12}, (\text{А/см}^2)$$

$$\gamma = \frac{225,8 \cdot 10^{-12}}{(225,8 + 4,64) \cdot 10^{-12}} = 0,979$$

Барьерная ёмкость р-п перехода определяется с учётом формулы (12) выражением:

$$C_n = \frac{e\epsilon_0 A}{\delta} = A \sqrt{\frac{qN_{\text{пр}} e_0 \epsilon}{2(\phi_0 - U)}} \quad (1.28)$$

Проведём вычисления:

При $U = 0\text{В}$

$$C_n = 65 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,3 \cdot 10^{15} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,7}{2(0,8 - 0)}} = 0,89(\text{пФ})$$

При $U = -5\text{В}$

$$C_n = 4225 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{61,413 \cdot 10^{-18}} = 0,33(\text{пФ})$$

При $U = -10\text{В}$

$$C_n = 4225 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{32,981 \cdot 10^{-18}} = 0,24(\text{пФ})$$

Из расчётов видно, что с увеличением обратного напряжения барьерная ёмкость р-п перехода уменьшается.

Напряжение лавинного пробоя определяют по полуэмпирической формуле: $U_{\text{пр}} = B \cdot \rho_z^a$ (1.29),

где коэффициенты B и a зависят от типа р-п перехода и материала полупроводника. В частности для нашего p^+-p кремниевого диода формула (1.29) имеет вид: $U_{\text{пр}} = 48 \cdot \rho_p^{0,73}$ (1.30)

Проведём вычисления: $U_{\text{пр}} = 48 \cdot 3,25^{0,73} \approx 113,5(\text{В})$

Результаты всех вычислений представим в виде таблиц 1.2 – 1.4:

Таблицы 1.2. Результаты вычислений фк, $E_{\text{мах}}$, γ , Улп.

| фк, В | $E_{\text{мах}}$, В/см | γ | Улп, В |
|-------|-------------------------|----------|--------|
| 0,8 | 22684,16 | 0,979 | 113,5 |

Таблица 1.3. Значения СБ, δ , δ_r , δ_n при значениях $|U_{\text{обр}}|$ 0В, 5В и 10В

| $ U_{\text{обр}} $, В | 0 | 5 | 10 |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| СБ, пФ | 0,89 | 0,33 | 0,24 |
| δ , см | $3,5 \cdot 10^{-5}$ | $13,3 \cdot 10^{-5}$ | $18,2 \cdot 10^{-5}$ |
| δ_r , см | $3,414 \cdot 10^{-5}$ | $12,97 \cdot 10^{-5}$ | $17,75 \cdot 10^{-5}$ |
| | | | |

| | | | |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $\delta n, \text{ см}$ | $8,635 \cdot 10^{-7}$ | $32,81 \cdot 10^{-7}$ | $44,89 \cdot 10^{-7}$ |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

Таблица 1.4. Значения тока насыщения I_s при температурах, равных 250К, 300К и 400К

| | | | |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| T, K | 250 | 300 | 400 |
| $I_s, \text{ A}$ | $2.125 \cdot 10^{-21}$ | $3.959 \cdot 10^{-17}$ | $4.969 \cdot 10^{-15}$ |

Лабораторное занятие № 5: Исследование каскадов с общим эмиттером, с общей базой и общим коллектором. Исследование параметров транзисторного ключа

Цели работы

1. Исследовать работу отдельных усилительных каскадов.
2. Оценить влияние параметров элементов на параметры и характеристики каскадов.
3. Сравнить и оценить параметры и характеристики каскадов разного типа.

Задание

Задание состоит из 3-х частей.

1. Исследование усилительного каскада с общим эмиттером.
2. Исследование усилительного каскада с общим коллектором.
3. Исследование усилительного каскада с общей базой.

Как правильно снимать характеристики и определять параметры усилительных каскадов (и усилителей) рассказано в Приложении.

Исследование усилительного каскада с общим эмиттером

Исследовать влияние параметров элементов каскада с общим эмиттером (ОЭ), схема которого приведена на рис. 1, на параметры и характеристики самого каскада.

1. Запустить программу WEWB.
2. Собрать схему исследуемого каскада ОЭ, показанную на рис. 1.
3. Установить параметры элементов каскада: $R_{\Gamma}=100 \text{ Ом}$, $R_1=50 \text{ кОм}$, $R_2=10 \text{ кОм}$, $R_3=5 \text{ кОм}$, $R_4=1 \text{ кОм}$, $R_H=20 \text{ кОм}$, $C_H=100 \text{ пФ}$, $C_1=2,2 \text{ мкФ}$, $C_2=2,2 \text{ мкФ}$, $C_3=10 \text{ мкФ}$, $E_{\Gamma}=5 \text{ мВ}$, $E_{\Pi}=15 \text{ В}$ (тип транзистора и его параметры укажет преподаватель).
4. С помощью характериографа снять АЧХ и ФЧХ каскада и занести их в отчет с указанием масштабов по вертикальной и горизонтальной осям.
5. По АЧХ определить нижнюю f_H и верхнюю f_B граничные частоты, среднюю частоту f_0 и полосу пропускания Df и указать их на графике АЧХ в отчете.
6. Установить у источника сигнала среднюю частоту f_0 .
7. Подключить вместо характериографа осциллограф и убедиться в том, что входной и выходной сигналы находятся в противофазе. Осциллограмму привести в отчете. Указать на ней входной и выходной сигналы, а также масштабы по вертикальной и горизонтальной осям.

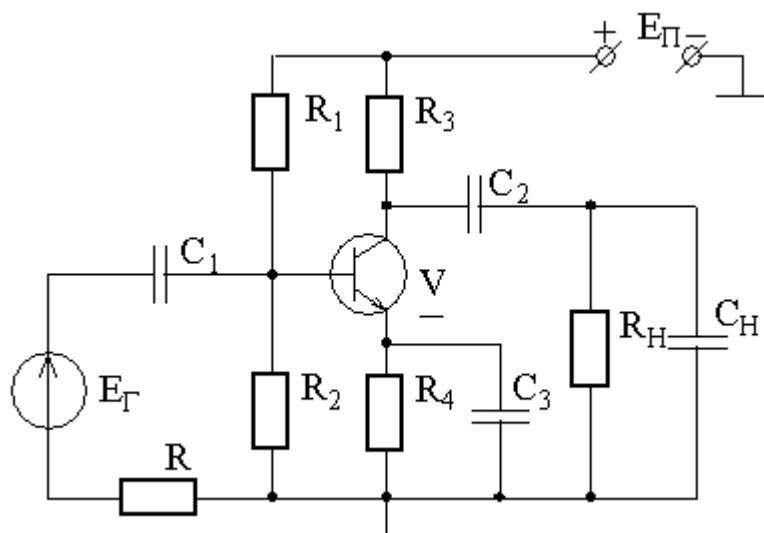


Рис. 1. Исходная схема исследуемого усилительного каскада ОЭ

8. По осциллограмме определить коэффициент усиления по напряжению.
9. Определить входное и выходное сопротивления каскада для средней частоты f_0 .
10. Определить, используя формулы, коэффициенты усиления каскада по току, напряжению и мощности на средней частоте f_0 .
11. Снять амплитудную характеристику (АХ) для средней частоты f_0 .
12. По полученной АХ определить динамический диапазон D, дБ.
13. Отключить конденсатор C3.
14. Выполнить пункты 4, 5, 9, 10.
15. Сравнить результаты, полученные при исследовании каскада ОЭ при включенном конденсаторе C3 и при отключенном.
16. Сделать и записать в отчет выводы по пункту 13.
17. Восстановить исходную схему и установить емкость конденсатора $C_1=100$ нФ.
18. Выполнить пункты 4, 5.
19. Сравнить частоты f_H , f_B и полосу пропускания каскада Df, полученные у исходной схемы, с теми же параметрами, полученными для схемы с уменьшенной емкостью C_1 (в пункте 17).
20. Сделать и записать в отчет выводы по пункту 19.
21. Восстановить исходную схему и установить емкость $C_H=200$ пФ.
22. Выполнить пункты 4, 5.
23. Сравнить частоты f_H , f_B и полосу пропускания каскада Df, полученные у исходной схемы, с теми же параметрами, полученными для схемы с увеличенной емкостью C_H (в пункте 21).
24. Сделать и записать в отчет выводы по пункту 21.
25. Все полученные в опытах данные свести в табл. 1.

Таблица 1

| Параметры | $h_{21Э}$ | f_H | f_B | Df | K_0 |
|----------------|-----------|-------|-------|----|-------|
| Исходная схема | | | | | |
| C3 – отключен | | | | | |
| $C_1=100$ нФ | | | | | |
| $C_H=200$ пФ | | | | | |

5. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные работы оцениваются по следующим критериям:

«**отлично**» – работа выполнена полностью в соответствии с заданием;

«**хорошо**» – работа выполнена полностью, но с недочетами: конечный результат выполнения работы не полностью совпадает с образцом; ошибки в расчетах, недочеты в оформлении;

«**удовлетворительно**» – работа выполнена на 60 – 70 %;

«**неудовлетворительно**» – работа не выполнена или обучающийся отказывается выполнять практическую работу.

Основные параметры диодов

| ТИП | Предельные значения параметров режима при $T = 25^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | | $T_{\text{max}}, ^{\circ}\text{C}$ | Значения параметров при $T = 25^{\circ}\text{C}$ | | | | | |
|--------|--|-----------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|------------------------------------|--|--|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|
| | $I_{\text{пр, ср max}}, \text{мА}$ | $T, ^{\circ}\text{C}$ | $f, \text{кГц}$ | $U_{\text{обр, и, л max}}, \text{В}$ | $U_{\text{обр max}}, \text{В}$ | $I_{\text{прт}}, \text{А}$ | $t_{\text{и}} (t_{\text{прт}}), \text{мс}$ | $f_{\text{max}}, \text{МГц}$ | | $U_{\text{пр}} (U_{\text{пр, ср}}), \text{В}$ | $I_{\text{пр}} (I_{\text{пр, ср}}), \text{мА}$ | $t_{\text{вос, обр}}, \text{мкс}$ | $I_{\text{пр, и}}, \text{мА}$ | $U_{\text{обр, и}}, \text{В}$ | $I_{\text{обр}} (I_{\text{обр, ср}}), \text{мА}$ |
| Д9В | 20 | 35 | | 30 | | | | 40 | 85 | 1 | 100 | | | | 5 |
| КД103А | 100 | 50 | 20 | | 50 | | | | 100 | 1 | 50 | 4 | 50 | 20 | 0,4 |
| КД209А | 700 | 85 | 1 | 400 | 400 | 15 | 0,02 | | 85 | 1 | 700 | | | 100 | |
| КД221А | 700 | | 1 | 100 | | | | | 85 | | | 1,5 | 1000 | 30 | |

Основные параметры биполярных транзисторов

| ТИП | $B1-B2/I_k$ /мА | F_T МГц | C_k/U_k пф/В | $C_{э}/U_{эб}$ пф/В | $R_б * C_k$, псек | τ_p , нс | $U_{кэ}/(I_k/I_б)$ В/(мА/мА) | $I_{к0, \text{мкА}}$ | $U_{кб}$ В | $U_{кэ}/R$ В/кОм | $U_{эб}$ В | $I_{км}/I_{кн}$ мА/мА | R_k , мВт | Пер |
|--------|--------------------|--------------|-------------------|------------------------|-----------------------|------------------|---------------------------------|----------------------|---------------|---------------------|---------------|--------------------------|----------------|-------|
| КТ315А | 20- 90/1 | 250 | 7/10 | | 300 | | 0.4/(20/2) | 1 | 25 | 20/10 | 6 | 100/ | 150 | N-P-N |
| КТ315Б | 50-350/1 | 250 | 7/10 | | 300 | | 0.4/(20/2) | 1 | 20 | 15/10 | 6 | 100/ | 150 | N-P-N |
| КТ315В | 20- 90/1 | 250 | 7/10 | | 500 | | 0.4/(20/2) | 1 | 40 | 30/10 | 6 | 100/ | 150 | N-P-N |