

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Оренбургский государственный университет

Кафедра вычислительных машин, комплексов, систем и сетей

Е. В. БУРЬКОВА

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОМУ
ПРАКТИКУМУ**

Оренбург 2001

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ

Лабораторный практикум состоит из 5 лабораторных работ по изучению принципа действия и анализу работы полупроводниковых приборов. Каждая работа включает теоретическое изложение материала, схемы для получения характеристик полупроводниковых приборов, контрольные вопросы.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторного практикума по дисциплине "Электроника" специальностей 220100 и 220400

Введение

Целью данных методических указаний является практическое изучение принципов построения и функционирования простых электронных схем с использованием полупроводниковых приборов на базе программы **Electronics WorkBench (EWB)**.

Разработка любого электронного устройства сопровождается физическим или математическим моделированием. Физическое моделирование связано с большими материальными затратами, поскольку требует изготовления макетов и их трудоёмкое исследование. Часто физическое моделирование просто невозможно из-за чрезвычайной сложности устройства, например, при разработке больших и сверхбольших интегральных микросхем. В этом случае прибегают к математическому моделированию с использованием средств и методов вычислительной техники.

EWB позволяет строить и анализировать любые электронные схемы, от самых простых до сложных, а так же рассчитывать статические и динамические характеристики полупроводниковых приборов таких как диоды, транзисторы, тиристоры и т.д. Особенностью программы является наличие контрольно-измерительных приборов, по внешнему виду и характеристикам приближенных к их промышленным аналогам.

Программа легко осваивается и достаточно удобна в работе.

1 Система моделирования **Elektronics Workbench**

История создания программы **Elektronics Workbench (EWB)** начинается с 1989 г. Ранние версии программы состояли из двух независимых частей. С помощью одной половины программы можно было моделировать аналоговые устройства, с помощью другой — цифровые. Такое “раздвоенное” состояние создавало определенные неудобства, особенно при моделировании смешанных аналого-цифровых устройств. В 1996г. в версии 4.1 эти части были объединены и через полгода выпущена пятая версия программы. Она дополнена средствами анализа примерно в объеме программы **Micro-Cap V**, переработана и несколько расширена библиотека компонентов. Средства анализа цепей выполнены в типичном для всей программы ключе - минимум усилий со стороны пользователя. Дальнейшим развитием EWB является программа **EWB Layout**,

предназначенная для разработки печатных плат. Программа EWB обладает преемственностью снизу вверх, т.е. все схемы созданные в версиях 3.0 и 4.1, могут быть промоделированы в версии 5.0. Следует отметить, что EWB позволяет также моделировать устройства, для которых задание на моделирование подготовлено в текстовом формате SPICE, обеспечивая совместимость с программами Micro-Cap и Pspice.

Программа EWB 4.1 рассчитана для работы в среде Windows 3.xx или 95/98 и занимает около 5 Мбайт дисковой памяти, EWB 5.0 - в среде Windows 95/98 и NT 3.51, требуемый объем дисковой памяти - около 16 Мбайт. Для размещения временных файлов требуется дополнительно 10-20 Мбайт свободного пространства.

1.1 Система меню

1.1.1 Меню File

Меню File предназначено для загрузки и записи файлов, получение твердой копии выбранных для печати составных частей схемы, а также для импорта/экспорта файлов в форматах других систем моделирования и программ разработки печатных плат.

Первые четыре команды этого меню: New (Ctrl+N), Open (Ctrl+O), Save (Ctrl+S), Save As... - типичные для Windows команды работы с файлами и по этому пояснения не требуют. Для этих команд в пятой версии имеются иконки со стандартным изображением. Остальные команды имеют следующее назначение:

Revert to Savent... - стирание всех изменений, внесенных в текущем сеансе редактирования, и восстановление схемы в первоначальном виде;

Print... (Ctrl+P) - выбор данных для вывода на принтер;

Print Setup... - настройка принтера;

Exit (Alt+F4) - выход из программы;

Install... - установка дополнительных программ.

1.1.2 Меню Edit

Меню Edit позволяет выполнять команды редактирования схем и копирование экрана.

Назначение команд:

- Cut (Ctrl+X) - стирание (вырезание) выделенной части схемы с сохранением ее в буфере обмена (Clipboard). Выделенные компоненты окрашиваются в красный цвет;

- Copy (Ctrl+C) - копирование выделенной части схемы в буфер обмена;

- Paste (Ctrl+V) - вставка содержимого буфера обмена на рабочее поле программы;

- Delete (Del) - стирание выделенной части схемы;

- Select All (Ctrl+A) - выделение всей схемы;

- Copybits (Ctrl+I) - команда превращения курсора мыши в крестик, которым по правилу прямоугольника можно выделить нужную часть экрана, после отпускания левой кнопки мыши выделенная часть копируется в буфер обмена, после чего его содержимое может быть импортировано в любое

приложение Windows. Копирование всего экрана производится нажатием клавиши Print Screen: копирование активной в данный момент части экрана, например, диалогового окна - комбинацией Alt + Print Screen. Команда очень удобна при подготовке отчетов по моделированию, например, при оформлении лабораторных работ;

- Show Clipboard - показать содержимое буфера обмена.

1.1.3 Меню Circuit

Меню Circuit используется для подготовки схем, а также для задания параметров моделирования.

Назначение команд:

- Activate (Ctrl+G) - запуск моделирования;

- Stop (Ctrl+T) - остановка моделирования;

- Pause (F9) - прерывание моделирования;

- Label... (Ctrl+L) - ввод позиционного обозначения выделенного компонента (например, R1 - для резистора, C5 - для конденсатора и т.д.);

- Value... (Ctrl+U) - изменение номинального значения параметра компонента; команда выполняется также двойным щелчком по компоненту;

- Model... (Ctrl+M) - выбор модели компонента; команда выполняется также двойным щелчком по компоненту;

- Zoom (Ctrl+Z) - развертывание выделенной подсхемы;

- Rotate (Ctrl+R) - вращение выделенного компонента; большинство компонентов поворачиваются против часовой стрелки на 90° при каждом выполнении команды, для измерительных приборов (амперметр, вольтметр и др.) меняются местами клеммы подключения. Команда чаще всего используется при подготовке схем. В готовой схеме пользоваться командой нецелесообразно, поскольку это чаще всего приводит к путанице — в таком случае компонент нужно сначала отключить от подсоединенных цепей, а затем вращать;

- Fault (Ctrl+F) - имитация неисправности выделенного компонента путем введения:

- 1) Leakage - сопротивления утечки;

- 2) Short - короткого замыкания;

- 3) Open - обрыва;

- 4) None - неисправность отсутствует (включено по умолчанию);

- Subcircuit... (Ctrl+B) - преобразование предварительно выделенной части схемы в подсхему. Выделенная часть схемы должна быть расположена таким образом, чтобы в выделенную область не попали не относящиеся к ней проводники и компоненты;

- Wire Color... - изменение цвета предварительно выбранного проводника. Более простой способ выполнения команды — двойной щелчок мышью на проводнике, после чего в меню выбирается один из шести предлагаемых цветов. Необходимость расцветки особенно важна для проводников, соединяющих контрольные точки (узлы) схемы с осциллографом или логическим анализатором — в этом случае цвет проводника определяет цвет осциллограммы;

- Preferences... (Ctrl+ E) - выбор элементов оформления схемы;
- Show grid - показать сетку для удобства рисования схемы (по умолчанию эта опция выключена, остальные включены). Опция активна только при включенной опции Use grid (использовать сетку);
- Show labels - показать позиционные обозначения компонентов, например, C1, C2 для конденсаторов;
- Show models - показать имена моделей компонентов, например, типов транзисторов;
- Show values - показать номиналы компонентов, например, сопротивления резисторов.

1.1.4 Меню Window

Меню Window содержит следующие команды:

Arrange (CTRL+W) - упорядочивание информации в рабочем окне EWB путем перезаписи экрана, при этом исправляются искажения изображений компонентов и соединительных проводников;

Circuit - вывод схемы на передний план;

Description (CTRL+D) - вывод на передний план описания схемы, если оно имеется, или окно-ярлык для его подготовки (только на английском языке).

1.1.5 Меню Help

Меню Help построено стандартным для Windows способом. Оно содержит краткие сведения по всем рассмотренным выше командам, библиотечным компонентам и измерительным приборам, а также сведения о самой программе. Отметим, что для получения справки по библиотечному компоненту его необходимо отметить на схеме щелчком мыши (он высветится красным цветом) и затем нажать клавишу F1.

1.1.6 Меню Analysis

Первые три команды - Activate (CTRL+G), Stop (CTRL+T), Pause (F9) - аналогичны командам меню Circuit программы EWB 4.1.

Назначение остальных команд следующее:

а) Analysis Options... (CTRL+Y) - набор команд для установки параметров моделирования;

б) Global - настройки общего характера, задаются с помощью диалогового окна, в котором параметры имеют следующее назначение:

1) ABSTOL - абсолютная ошибка расчета токов;

2) GMIN - минимальная проводимость ветви цепи (проводимость ветви, меньшая GMIN, считается равной нулю);

3) PIVREL, PIVTOL - относительная и абсолютная величины элемента строки матрицы узловых проводимостей (например, при расчете по методу узловых потенциалов), необходимые для его выделения в качестве ведущего элемента;

4) RELTOL - допустимая относительная ошибка расчета напряжений и токов;

5) TEMP - температура, при которой проводится моделирование;

- 6) VNTOL - допустимая ошибка расчета напряжений в режиме Transient (анализ переходных процессов);
- 7) CHGTOL - допустимая ошибка расчета зарядов;
- 8) RAMPTIME - начальная точка отсчета времени при анализе переходных процессов;
- 9) CONVSTEP - относительный размер шага интеграции при расчете режима по постоянному току;
- 10) CONVABSSTEP - абсолютный размер шага интеграции при расчете режима по постоянному току;
- 11) CONVLIMIT - включение или выключение дополнительных средств для обеспечения сходимости интеграционного процесса (например, за счет использования метода вариации напряжений источников питания);
- 12) RSHUNT - допустимое сопротивление утечки для всех узлов относительно общей шины (заземления);
- в) DC - настройка для расчета режима по постоянному току (статистический режим). Для настройки этого режима используется диалоговое окно, параметры которого имеют следующее назначение:
- 1) ITL1 - максимальное количество итераций приближенных расчетов;
 - 2) GMINSTEPS - размер приращения проводимости в процентах от GMIN (используется при слабой сходимости итерационного процесса);
 - 3) SRCSTEPS - размер приращения напряжения питания в процентах от его номинального значения при вариации напряжения питания (используется при слабой сходимости итерационного процесса).
- г) Transient - настройки параметров режима анализа переходных процессов:
- 1) ITL4 - максимальное количество итераций за время анализа переходных процессов;
 - 2) MAXORD - максимальный порядок (от 2 до 6) метода интегрирования дифференциального уравнения;
 - 3) TRTOL - допуск на погрешность вычисления переменной;
 - 4) METHOD - метод приближенного интегрирования дифференциального уравнения;
 - 5) TRAPEZOIDAL - метод трапеций,
 - 6) GEAR - метод Гира;
 - 7) ACCT - разрешение на вывод статистических сообщений о процессе моделирования;
- д) Device - выбор параметров МОП-транзисторов:
- 1) DEFAD - площадь диффузионной области стока, m^2 ;
 - 2) DEFAS - площадь диффузионной области истока, m^2 ;
 - 3) DEFL - длина канала полевого транзистора, м;
 - 4) DEFW - ширина канала, м;
 - 5) TNOM - номинальная температура компонента;
 - 6) BYPASS - включение или выключение нелинейной части модели компонента;
 - 7) TRYTOCOMPACT - включение или выключение линейной части модели компонента.

2 Контрольно-измерительные приборы

Панель контрольно-измерительных приборов находится под полем меню рабочего окна и содержит цифровой мультиметр, функциональный генератор, двухканальный осциллограф, измеритель амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик, генератор слов (кодированный генератор), 8-канальный логический анализатор и логический преобразователь. Вид панели контрольно-измерительных приборов показан на рисунке 2.1. Общий порядок работы с приборами такой: иконка прибора курсором переносится на рабочее поле и подключается проводниками к исследуемой схеме. Для приведения прибора в рабочее (развернутое) состояние необходимо дважды щелкнуть курсором по его иконке.



Рисунок 2.1 - Панель контрольно-измерительных приборов

2.1 Мультиметр

Лицевая панель мультиметра показана на рисунке 2.2. На лицевой панели мультиметра расположен дисплей для отображения результатов измерения, клеммы для подключения к схеме и кнопки управления.



Рисунок 2.2 - Лицевая панель мультиметра

Ammeter resistance – внутреннее сопротивление вольтметра.

Voltmeter resistance – входное сопротивление вольтметра.

Ohmmeter current – ток через контролируемый объект;

Decibel standard – установка эталонного напряжения при измерении ослабления или усиления в децибелах.

2.2 Функциональный генератор

Лицевая панель генератора показана на рисунке 2.4. Управление генератора осуществляется следующими органами управления:

- выбор формы выходного сигнала: синусоидальной (выбрана по умолчанию), треугольной и прямоугольной;

- установка частоты выходного сигнала; 

- установка коэффициента заполнения в %: для импульсных сигналов это отношение длительности импульса к периоду повторения — величина

обратная скважности. Duty cycle 50 %

- установка амплитуды выходного сигнала

Amplitude 10 V

- установка смещения (постоянной составляющей) выходного сигнала.

Offset 0

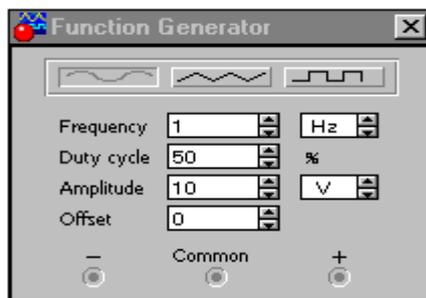


Рисунок 2.4 - Лицевая панель функционального генератора

2.3 Осциллограф

Лицевая панель осциллографа показана на рисунке 2.5. Осциллограф имеет два канала (CHANNEL) А и В с отдельной регулировкой чувствительности в диапазоне от 10 мкВ/дел (mV/Div) до 5 кВ/дел (kV/Div) и регулировкой смещения по вертикали (Y POS). Выбор режима по входу осуществляется нажатием кнопок. AC 0 DC. Режим AC предназначен для наблюдения только сигналов переменного тока (его еще называют режимом «закрытого входа»). В режиме 0 входной зажим замыкается на землю. В режиме DC (включён по умолчанию) можно проводить осциллографические измерения как постоянного так и переменного тока. Этот режим еще называют режимом «открытого входа».

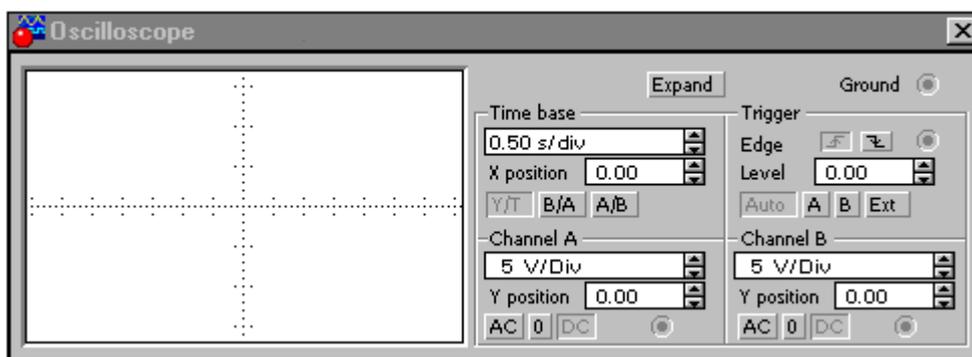


Рисунок 2.5 - Лицевая панель осциллографа

Режим развертки выбирается кнопками Y/T, B/A и A/B. В режиме Y/T (обычный режим, включен по умолчанию) реализуются следующие режимы развертки; по вертикали — напряжение сигнала, по горизонтали — время; в режиме B/A: по вертикали — сигнал канала В, по горизонтали — сигнал канала А; в режиме A/B: по вертикали — сигнал канала А, по горизонтали — сигнал канала В.

В режиме развертки Y/T длительность развертки (TIME BASE) может

быть задана в диапазоне от 0,1 нс/дел до 1 с/дел с возможностью установки смещения в тех же единицах по горизонтали, т.е. по оси X.

3

3.1 Источники тока

В общем случае источники тока могут быть представлены в виде генератора напряжения или генератора тока. Источники тока делятся на источники постоянного тока, переменного тока и управляемые (функциональные) источники. Кроме того, они подразделяются на измерительные источники и источники для электропитания.

Примером измерительного источника является функциональный генератор. Из источников постоянного тока в качестве измерительного широко используется так называемый нормальный элемент (электрохимический источник), обладающий высокой стабильностью выходного напряжения и используемый в высокоточных образцовых установках для проверки вольтметров, амперметров и других измерительных приборов. Источники постоянного тока в программе EWB представлены на рисунке 3.1

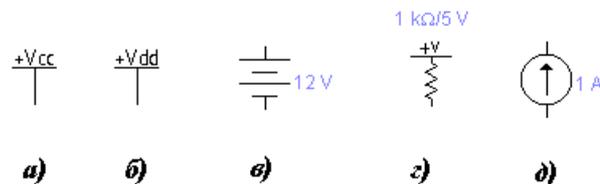


Рисунок 3.1 - Источники постоянного тока: источник с фиксированным напряжением +5V (а), источник с фиксированным напряжением +15V (б), с заданным напряжением (в), с заданным напряжением и внутренним сопротивлением (г), с заданным током (д).

Источники переменного тока в программе EWB подразделяются на источники немодулируемых и модулируемых сигналов (рисунки 3.2, 3.3).

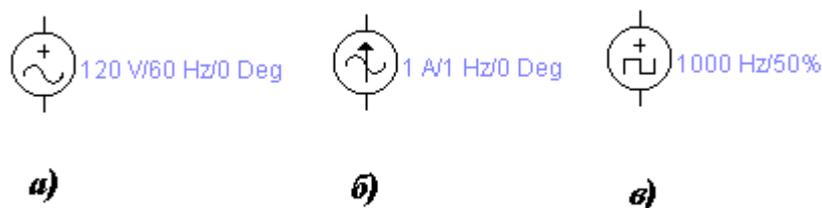


Рисунок 3.2 - Источники переменного тока: источники напряжения(а) и тока(б) с установкой эффективного значения напряжения, тока, фазы и частоты; источники прямоугольных импульсов с установкой амплитуды, частоты следования и коэффициента заполнения(в).

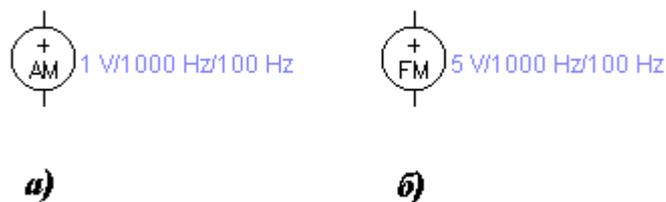


Рисунок 3.3 - Источники амплитудно-модулируемых (а) и фазомодулируемых (б) сигналов.

3.2. Индикаторные приборы

Вольтметры и амперметры (рисунок 3.4) обеспечивают отсчет измеряемой величины с точностью до третьего знака. Параметры приборов задаются в диалоговом окне. Для вольтметра первым и самым основным параметром является входное сопротивление прибора, а для амперметра это внутреннее сопротивление прибора. Эти параметры необходимо устанавливать в соответствии со значениями сопротивлений реальных приборов.

Отрицательная клемма для подключения этих приборов обозначена широкой черной полосой и может быть размещена на любой грани иконки при вращении изображения компонента (вращение выполняется нажатием комбинации клавиш Ctrl + R).

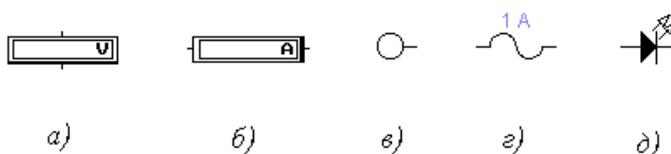


Рисунок 3.4 - Индикаторные приборы: вольтметр(а), амперметр(б), логический пробник(в), предохранитель(г), светодиод(д).

3.3. Коммутационные устройства

Под коммутационными устройствами (КУ) понимаются устройства, скачкообразно изменяющие значения своих параметров при определенном (пороговом) значении управляющего сигнала. В устройствах, предназначенных для коммутации электрических цепей, это реализуется практически мгновенным изменением электрического сопротивления или проводимости их исполнительных систем (рисунок 3.5).

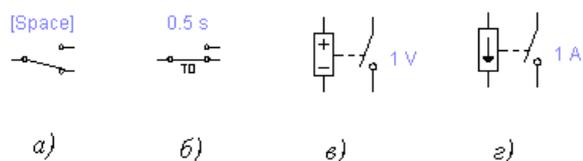


Рисунок 3.5 – Коммутационные устройства

3.4 Конденсаторы

Конденсаторы относятся к одному из наиболее распространенных компонентов РЭА. В программе EWB конденсаторы представлены тремя типами, показанными на рисунке 3.6.

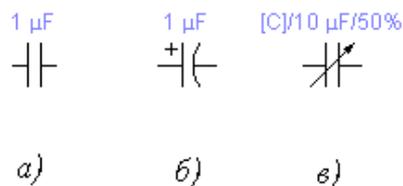


Рисунок 3.6 - Конденсаторы

Первый тип охватывает практически все конденсаторы, второй — электролитические, третий — подстроечные; значение емкости каждого конденсатора может быть установлено в пределах от 10^{-8} пФ до 10^8 Ф. Емкость подстроечного конденсатора может изменяться нажатием назначенной пользователем клавиши клавиатуры (по умолчанию — клавиши С), начиная от максимального значения до минимального с заданным шагом (от 1 до 100%). Все эти установки производятся с помощью диалогового окна.

3.5. Резисторы

Резисторы (рисунок 3.7) являются самыми массовыми изделиями электронной техники. В программе EWB резисторы представлены тремя типами — постоянным, подстроечным и набором из восьми резисторов.

Изменение сопротивления подстроечного резистора осуществляется по тому же принципу, что и для подстроечного конденсатора. В наборе резисторов сопротивление устанавливается одинаковым для всех восьми резисторов.

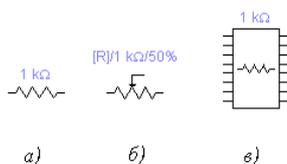


Рисунок 3.7 – Обозначение резисторов в программе EWB

4 Лабораторная работа №1. Исследование полупроводниковых диодов

4.1 Цель работы

Изучение свойств р-п – перехода, определяющих характеристики выпрямительного диода и стабилитрона.

4.2 Общие сведения

Комбинация двух полупроводниковых слоев с разным типом проводимости (р — дырочной и n — электронной) обладает выпрямляющими свойствами: она гораздо лучше пропускает ток в одном направлении, чем в

другом. Полярность напряжения, соответствующая большим токам, называется прямой, а меньшим — обратной. Обычно пользуются терминами прямое и обратное напряжение, прямой и обратный ток. Поверхность, по которой контактируют р- и n-слои, называется металлургической границей, а прилегающая к ней область объемных зарядов — электронно-дырочным переходом.

Электронно-дырочные переходы классифицируют по резкости металлургической границы и соотношению удельных сопротивлений слоев.

Ступенчатыми переходами (коэффициент плавности перехода $t=0,5$, в EWB 5.0 имеет обозначение M) называют переходы с идеальной границей, по одну сторону которой находятся дырки, а по другую — электроны. Такие переходы наиболее просты для анализа и поэтому все реальные переходы стараются, если это возможно, рассматривать как ступенчатые.

Плавными переходами ($t=0,333$) называют такие, у которых в области металлургической границы концентрация одного типа примеси постепенно уменьшается, а другого типа — растет. Сама металлургическая граница в этом случае соответствует равенству концентраций примесей. Все реальные р-n-переходы — плавные, степень их приближения к ступенчатым зависит от градиента эффективной концентрации в районе металлургической границы.

По соотношению концентраций примесей в р- и n-слоях переходы делятся на симметричные, несимметричные и односторонние. Симметричные переходы не типичны для полупроводниковой техники. Основное распространение имеют несимметричные переходы, у которых концентрации не одинаковы. В случае резкой асимметрии, когда концентрации примесей (а значит, и основных носителей) различаются на один-два порядка и более, переходы называют односторонними. На рисунке 4.1 приведена диаграмма несимметричного р-n – перехода.

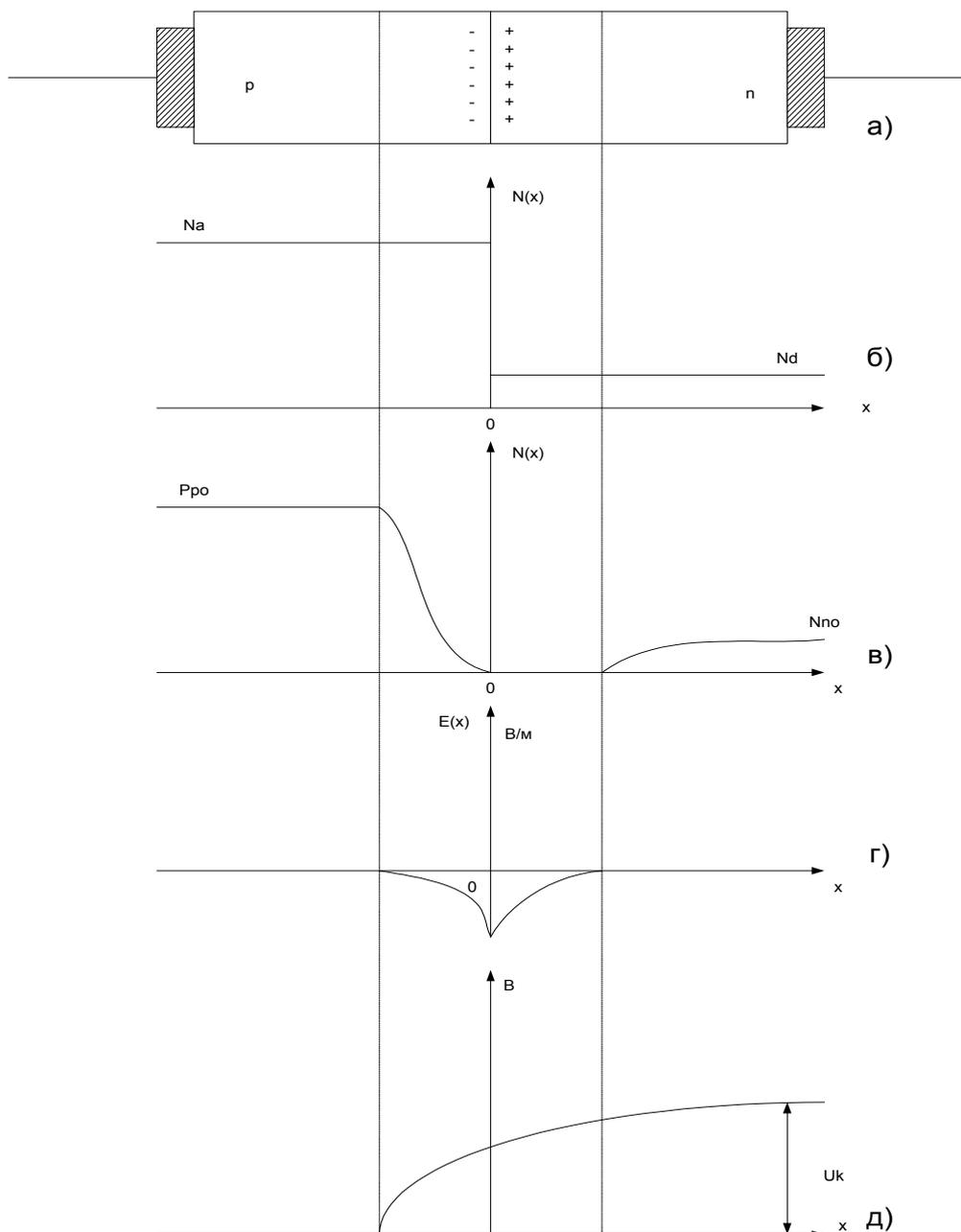


Рисунок 4.1 – Диаграммы несимметричного p-n - перехода

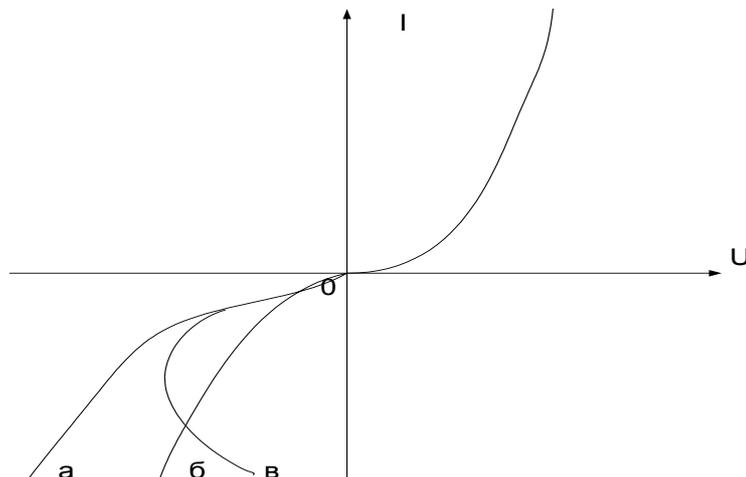
Концентрации донорной примеси n – области N_d меньше концентрации акцепторной примеси в области N_a . Соответственно различаются значения равновесной концентрации основных носителей в p и n областях: $P_{po} > N_{no}$, (смотри рисунок 4.1 в). Изменение величин ЭДС поля $E(x)$ и потенциала $\varphi(x)$ в области p - n – перехода показано на рисунке 4.1 г,д. Величина U_k называется контактной разностью потенциалов.

Если к p - n - переходу подключить обратное напряжение, то при определенном его значении переход пробивается. Различают три вида пробоя: туннельный, лавинный и тепловой (рисунок 4.2). Первые два связаны с увеличением напряженности электрического поля в переходе, а третий — с увеличением рассеиваемой мощности и, соответственно, температуры.

В основе туннельного пробоя лежит туннельный эффект, т.е. «просачивание» электронов сквозь тонкий потенциальный барьер перехода. В основе лавинного пробоя лежит «размножение» носителей в сильном

электрическом поле, действующем в области перехода. Электрон и дырка, ускоренные полем на длине свободного пробега, могут разорвать одну из ковалентных связей полупроводника. В результате рождается новая пара электрон—дырка и процесс повторяется уже с участием новых носителей. При достаточно большой напряженности поля, когда исходная пара носителей в среднем порождает более одной новой пары, ионизация приобретает лавинный характер, подобно самостоятельному разряду в газе. При этом ток будет ограничиваться только внешним сопротивлением. Явление пробоя находят практическое применение в стабилитронах — приборах, предназначенных для стабилизации напряжения.

В основе теплового пробоя лежит саморазогрев перехода при протекании обратного тока. С ростом температуры обратные токи резко возрастают, соответственно увеличивается мощность, рассеиваемая в переходе; это вызывает дополнительный рост температуры и т.д. Как правило, тепловой пробой не имеет самостоятельного значения: он может начаться лишь тогда, когда обратный ток уже приобрел достаточно большую величину в результате лавинного или туннельного пробоя.



- а – лавинный пробой
- б – туннельный пробой
- в – тепловой пробой

Рисунок 4.2 – Вольт-амперная характеристика диода

Исследование прямой ветви ВАХ диодов может быть проведено с помощью схемы на рисунке 4.3. Она состоит из источника тока I , амперметра A (можно обойтись и без него, поскольку регистрируемый ток точно равен задаваемому), исследуемого диода VD и вольтметра V для измерения напряжения на диоде.

Для исследования обратной ветви ВАХ диода используется схема на рисунке 4.4. В ней вместо источника тока используется источник напряжения U_i с защитным резистором R_z для ограничения тока через диод в случае его пробоя.

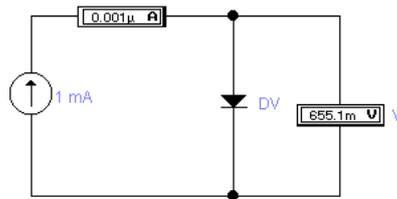


Рисунок 4.3 - Схема для исследования прямой ветви ВАХ диода

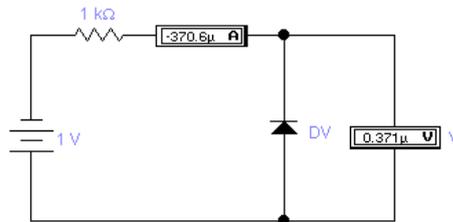


Рисунок 4.4 - Схема для исследования обратной ветви ВАХ диода

Барьерную емкость принято разделять на две составляющие: барьерную емкость, отражающую перераспределение зарядов в переходе, и диффузионную емкость, отражающую перераспределение носителей в базе. Такое разделение в общем условно, но оно удобно на практике, поскольку соотношение обеих емкостей различно при изменении полярности приложенного напряжения. При прямом напряжении главную роль играют избыточные заряды в базе и, соответственно, диффузионная емкость. При обратном напряжении избыточные заряды в базе малы и главную роль играет барьерная емкость. Обе емкости нелинейны: диффузионная емкость зависит от прямого тока, а барьерная — от обратного напряжения.

Набор задаваемых параметров для диодов в EWB 5.0 заметно больше по сравнению с EWB 4.1. Диалоговое окно для задания параметров диодов в EWB 5.0 состоит из двух одинаковых по внешнему виду закладок с помощью которых можно задать следующие параметры:

IS – обратный ток;

RS – сопротивление диода;

CJO – барьерная емкость диода при нулевом напряжении на переходе;

TT – время переключения;

N — коэффициент инжекции;

EG — ширина запрещенной зоны, эВ;

FC — коэффициент нелинейности барьерной емкости прямо смещенного перехода;

BV —напряжение пробоя (положительная величина, в EWB 4.1 она принята отрицательной), В;

IBV — начальный ток пробоя при напряжении BV;

XTI — температурный коэффициент тока насыщения;

KF — коэффициент фликкер-шума;

AF — показатель степени в формуле для фликкер-шума;

TNOM — температура диода, «С.

Кроме одиночных диодов, в библиотеке EWB имеется также диодный мостик, для которого можно дополнительно задать коэффициент эмиссии N.

4.3 Задание

4.3.1 С помощью средств программы EWB построить схемы для снятия вольтамперной характеристики диодов в соответствии с рисунками 4.3, 4.4.

Значение э.д.с. источника постоянного тока зависит от типа исследуемого диода. В большинстве случаев достаточно прикладывать к диоду в прямом направлении напряжение порядка 1В, а в обратном – 30-40 В.

4.3.2 Выбрать из библиотеки тип диода, задать реальные параметры. В таблице 4.1 приведены основные параметры некоторых диодов, получивших широкое применение в электронной аппаратуре.

Таблица 4.1 – Основные параметры некоторых диодов

Тип диода	Выпрямленный ток (среднее значение), А	Обратный ток, А	Максимальный обратный ток, mA	Постоянное прямое напряжение, В
Д7А-Д7Ж	1 - 3	0.1	50-400	0.5
Д202-Д205	0.4	0.5	100-400	1.0
Д226 Б,В,Г,Д	0.300	0.1	400,300, 200,100	1.0

4.3.3 Нажать кнопку «Пуск» на экране дисплея. Снять вольт-амперные характеристики двух выпрямительных диодов по схемам прямым и обратным напряжением.

4.3.4 Построить схему для снятия вольт-амперной характеристики диода с использованием осциллографа в соответствии с рисунком 4.6.

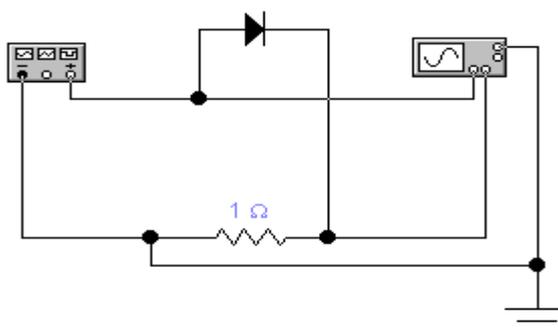


Рисунок 4.6 – Схема для снятия вольт-амперной характеристики диода с помощью осциллографа

Во входной цепи подключить источник синусоидального напряжения с низкой частотой.

4.3.5 Снять ВАХ диода с помощью осциллографа.

4.3.6 Определить коэффициент выпрямления исследуемых диодов, для чего значения прямого тока и обратного при напряжении 0,1-0,5 В подставить в формулу:

$$K_{\varepsilon} = \frac{I_{np}}{I_{обр}}$$

4.4 Контрольные вопросы

4.4.1 Какие физические процессы происходят в *p-n* переходе в отсутствие внешнего напряжения. Чему равен результирующий ток?

4.4.2 Чем обусловлены диффузионная и дрейфовая составляющие тока *p-n* перехода?

4.4.3 Что такое пробой *p-n* перехода? Его виды.

4.4.4 Виды диодов.

5 Лабораторная работа №2. Изучение биполярных транзисторов

5.1 Цель работы

Изучение особенностей работы биполярных транзисторов в разных схемах включения, построение статических характеристик

5.2 Общие сведения

Биполярный транзистор - это полупроводниковый прибор, содержащий два взаимодействующих *p-n* перехода и предназначенный для генерации, усиления и преобразования сигналов электромагнитной природы. В зависимости от чередования слоев существуют транзисторы типов *p-n-p* и *n-p-n*. (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Условное обозначение транзисторов

Трехслойная структура создается по сплавной или диффузной технологии. Один из слоев называется эмиттерным, его функция – инжектирование носителей заряда в базу; другой слой называется коллекторным, его функция – сбор носителей заряда. Пластина полупроводника, на которую наплавляют коллектор и эмиттер называется базой. Чтобы носители заряда, инжектированные эмиттером и проходящие через базу, полностью собирались коллектором, площадь коллекторного перехода делают больше площади эмиттерного перехода.

Различают три схемы включения биполярных транзисторов: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК), показанные на рисунке 5.2.

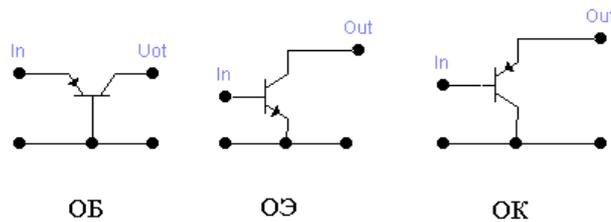


Рисунок 5.2 - Основные схемы включения транзисторов

На практике чаще всего используются два семейства ВАХ транзисторов - входные и выходные. Входные характеристики определяют зависимость входного тока (базы или эмиттера в зависимости от способа включения транзистора) от напряжения между базой и эмиттером при фиксированных значениях напряжения на коллекторе. Выходные характеристики определяют зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при фиксированных значениях тока базы или эмиттера (в зависимости от способа включения транзистора).

Входные характеристики имеют вид, аналогичный характеристикам диодов: ток экспоненциально возрастает с увеличением напряжения база-эмиттер. При повышении и понижении температуры входные характеристики смещаются в сторону меньших и больших входных напряжений соответственно. Напряжение между базой и эмиттером для кремниевых транзисторов уменьшается примерно на 2 мВ при увеличении температуры на каждый градус Цельсия.

Особенностью выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОБ, является слабая зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-база $U_{кб}$. При больших напряжениях $U_{кб}$ происходит пробой коллекторного перехода. При увеличении температуры выходные характеристики смещаются в сторону больших токов из-за увеличения обратного тока $I_{ко}$.

У транзистора, включенного по схеме с ОЭ, ток коллектора более сильно зависит от напряжения коллектор-эмиттер. Резкое возрастание тока коллектора начинается при меньшем коллекторном напряжении, чем для включения транзистора по схеме с ОБ. При повышении температуры выходные характеристики значительно смещаются в сторону больших токов, их наклон сильно увеличивается.

ВАХ транзисторов и диодов снимаются на постоянном токе (по точкам) или с помощью специальных приборов — характериографов, позволяющих избежать сильного нагрева приборов.

Входные и выходные характеристики транзисторов используются для расчета цепей смещения и стабилизации режима, расчета конечных состояний ключевых схем (режима отсечки, насыщения).

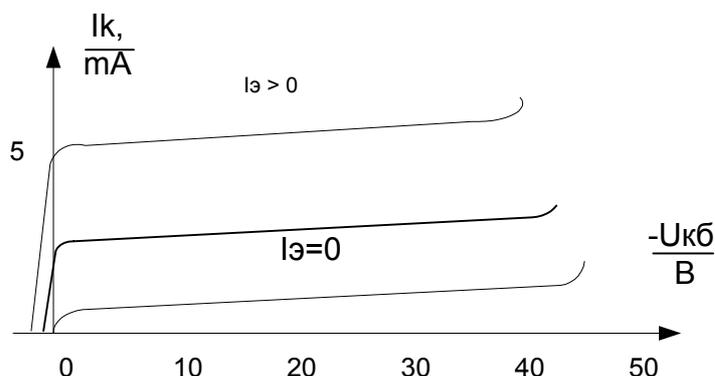


Рисунок 5.3 – Выходные характеристики транзистора подключенного по схеме с ОБ

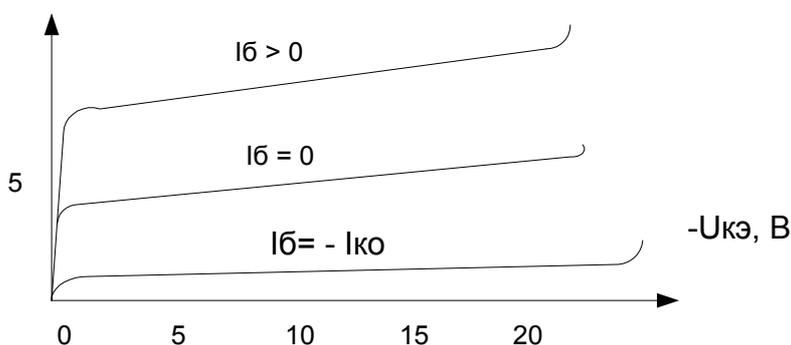


Рисунок 5.4 – Выходные характеристики транзистора подключенного по схеме с ОЭ

В библиотеку EWB включено достаточно большое количество импортных биполярных транзисторов, отечественные аналоги которых можно найти в справочной литературе. В некоторых случаях может оказаться более удобным самостоятельно создать отдельную библиотеку отечественных транзисторов.

В состав параметров транзисторов включены следующие:

- 1) Обратный ток коллекторного перехода - IS;
- 2) Коэффициент усиления тока в схеме с ОЭ - BF;
- 3) Коэффициент усиления тока в схеме с ОЭ при инверсном включении транзистора (эмиттер и коллектор меняются местами) - BR;
- 4) Объемное сопротивление базы, Ом - RB;
- 5) Объемное сопротивление коллектора, Ом - RC;
- 6) Объемное сопротивление эмиттера. Ом - RE;
- 7) Емкость эмиттерного перехода при нулевом напряжении, Ф - CJE;
- 8) Емкость коллекторного перехода при нулевом напряжении, Ф - CJC;
- 9) Емкость коллектор-подложка, Ф - CJS;
- 10) Время переноса заряда через базу, с - TF;
- 11) Время переноса заряда через базу в инверсном включении, с - TR;
- 12) Коэффициент плавности эмиттерного перехода - ME;
- 13) Коэффициент плавности коллекторного перехода - MC;
- 14) Напряжение Эрли, близкое к параметру $U_k \max B$ - VA;
- 15) Обратный ток эмиттерного перехода, А - ISE;

- 16) Ток начала спада усиления по току, близкое к параметру $I_{вп,вх} > A$ - I_{KF} ;
- 17) Коэффициент неидеальности эмиттерного перехода – NE ;
- 18) Контактная разность потенциалов перехода база-коллектор, V - V_{JC} ;

19) Контактная разность потенциалов перехода база-эмиттер, V - V_{JE} .

Набор задаваемых параметров для биполярных транзисторов в EWB 5.0 - заметно больше, чем в EWB 4.1 — они собраны в пяти окнах-закладках. Дополнительные параметры находятся в последних трех закладках. Эти параметры имеют следующее назначение:

NF — коэффициент неидеальности в нормальном режиме;

NR — коэффициент неидеальности в инверсном режиме;

I_{KR} — ток начала спада коэффициента усиления тока в инверсном режиме. A ;

NC — коэффициент неидеальности коллекторного перехода;

R_{BM} — минимальное сопротивление базы при больших токах, Ом ;

I_{RB} — ток базы, при котором сопротивление базы уменьшается на 50% от разницы $R_B - R_{BM}$, A ;

X_{TF} — коэффициент, определяющий зависимость времени T_F переноса зарядов через базу от напряжения коллектор-база;

V_{TF} — напряжение коллектор-база, при котором начинает сказываться его влияние на T_F , V ;

P_{TF} — дополнительный фазовый сдвиг на граничной частоте транзистора град.;

V_{JS} — контактная разность потенциалов перехода коллектор-подложка, V ;

M_{JS} — коэффициент плавности перехода коллектор-подложка;

X_{CJC} — коэффициент расщепления емкости база-коллектор;

FC — коэффициент нелинейности барьерной емкости прямо смещенных переходов;

EG — ширина запрещенной зоны, эВ;

X_{TB} — температурный коэффициент усиления тока в нормальном и инверсном режимах;

X_{TI} — температурный коэффициент тока насыщения;

KF — коэффициент фликкер-шума;

AF — показатель степени в формуле для фликкер-шума;

T_{NOM} — температура транзистора.

Рассмотрим способы измерения основных характеристик биполярных транзисторов.

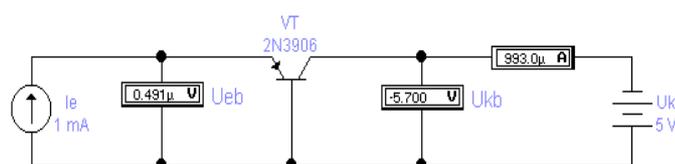


Рисунок 5.5 - Схема для исследования ВАХ биполярного транзистора

Вольтамперные характеристики. Схема для исследования ВАХ транзистора показана на рисунке 5.5. Семейство входных ВАХ снимается при фиксированных значениях U_{kb} путем изменения тока I_e и измерения U_{eb} . Семейство выходных ВАХ снимается при фиксированных значениях I_e , путем изменения напряжения U_{kb} , и измерения I_k .

5.3 Задание

5.3.1 Собрать схему для снятия характеристик транзистора с ОБ в соответствии с рисунком 5.6.

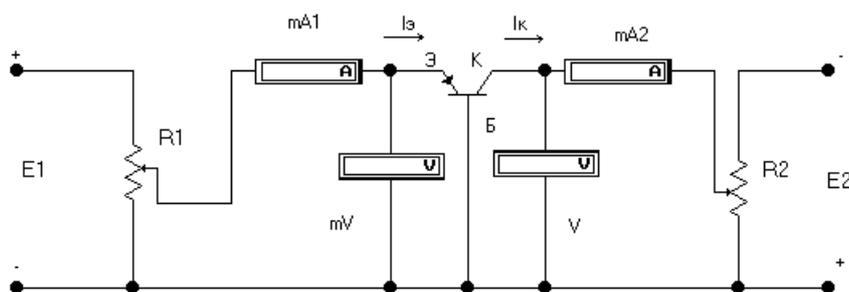


Рисунок 5.6 - Исследование ВАХ биполярного транзистора в схеме с общей базой.

В таблице 5.1 приведены предельно допустимые электрические параметры некоторых плоскостных транзисторов типа р-п-р .

Таблица 5.1 – Предельно допустимые электрические параметры плоскостных транзисторов типа р-п-р

Тип транзистора	Наибольший ток коллектора I_k , mA	Наибольшее напряжение между коллектором и базой $U_{КБ\max}$, В	Наибольшее напряжение между коллектором и эмиттером $U_{КЭ\max}$, В	Наибольшее напряжение между эмиттером и базой $U_{ЭБ\max\text{обр}}$, В
МП 40	20	15	15	15
МП 41	20	15	15	15
МП 202	2000	45	55	45
МП 10	10	10	10	1

Ориентировочные номиналы элементов схемы :

$E1 = 1 \div 5$ В, $E2 = 20 \div 30$ В.

Измерительные приборы подбираются удобными для снятия входных и выходных характеристик: mA1 и mA2 – 30 мА , mV – 300 мВ, V – 30 В.

5.3.2 Установить напряжение $U_{БК}$ с помощью потенциометра R2 порядка 50-60% от наибольшего значения этого напряжения для данного транзистора. Поддерживая это напряжение неизменным изменять напряжение $U_{КЭ}$ от 0 до 300-400 мВ. Следить за показаниями амперметра mA1. Величина тока I_e должна изменяться в пределах, достаточных для снятия входной характеристики транзистора.

Все измеренные значения занести в таблицу.

Таблица 5.2 – Результаты снятия входных статических характеристик

$$I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}}) \text{ при } U_{\text{КБ}} = \text{const}$$

$U_{\text{КБ}} = \quad, \text{В}$		$U'_{\text{КБ}} = \quad, \text{В}$		$U''_{\text{КБ}} = \quad, \text{В}$	
$U_{\text{ЭБ}}, \text{В}$	$I_{\text{Э}}, \text{мА}$	$U_{\text{ЭБ}}, \text{В}$	$I_{\text{Э}}, \text{мА}$	$U_{\text{ЭБ}}, \text{В}$	$I_{\text{Э}}, \text{мА}$

5.3.3 Выходные статические характеристики снимать для тока эмиттера 0, 100, 150, 200 мкА. Эти значения тока установить потенциометром R_1 и поддерживать неизменными. Напряжение $U_{\text{КБ}}$ изменять с помощью R_2 от 0 до 15-20 В. Данные занести в таблицу 5.3.

$$I_{\text{К}} = f(U_{\text{КБ}}) \text{ при } I_{\text{Э}} = \text{const}$$

Таблица 5.3 – Результаты снятия выходных статических характеристик

$I_{\text{Э}} = \quad, \text{мА}$		$I'_{\text{Э}} = \quad, \text{мА}$		$I''_{\text{Э}} = \quad, \text{мА}$	
$U_{\text{КБ}}, \text{В}$	$I_{\text{К}}, \text{мА}$	$U_{\text{КБ}}, \text{В}$	$I_{\text{К}}, \text{мА}$	$U_{\text{КБ}}, \text{В}$	$I_{\text{К}}, \text{мА}$

5.3.4 По таблицам 5.1, 5.2 и 5.3 построить входные и выходные характеристики транзистора в схеме с ОБ. Подсчитать коэффициент α

5.3.5 Построить схему включения транзистора с ОЭ в соответствии с рисунком 5.7.

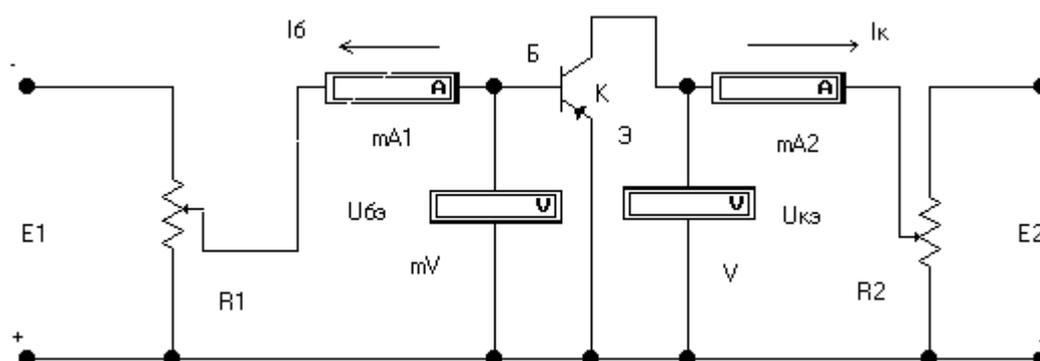


Рисунок 5.7 - Исследование ВАХ биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.

5.3.6 Входные статические характеристики транзистора снимают для трех значений $U_{\text{КЭ}}$, их устанавливают потенциометром R_2 . Поддерживая это напряжение неизменным, изменяют напряжение между базой и эмиттером $U_{\text{БЭ}}$ (потенциометр R_1) от 0 до 200-300 мВ, следят за показаниями прибора, измеряющего ток $I_{\text{Б}}$ до 200 мкА. Значения записывают в таблицу 5.4.

Таблица 5.4 – Входные статические характеристики в схеме с ОЭ

$U_{\text{КЭ}} = \quad, \text{В}$		$U'_{\text{КЭ}} = \quad, \text{В}$		$U''_{\text{КЭ}} = \quad, \text{В}$	
$U_{\text{БЭ}}, \text{В}$	$I_{\text{Б}}, \text{мА}$	$U_{\text{БЭ}}, \text{В}$	$I_{\text{Б}}, \text{мА}$	$U_{\text{БЭ}}, \text{В}$	$I_{\text{Б}}, \text{мА}$

$$I_B = f(U_{BЭ}) \text{ при } U_{КЭ} = \text{const}$$

5.3.7 Выходные характеристики транзистора

$$I_K = f(U_{КЭ}) \text{ при } I_B = \text{const}$$

Значения I_B устанавливают потенциометром R_1 и поддерживают неизменными. Напряжение $U_{КЭ}$ изменяют с помощью потенциометра R_2 от 0 до 10-15 В. результаты измерений занести в таблицу 5.5.

Таблица 5.5 – Выходные характеристики транзистора в схеме с ОЭ

$I_B = \quad , \text{ mA}$		$I'_B = \quad , \text{ mA}$		$I''_B = \quad , \text{ mA}$	
$U_{КЭ} , \text{ В}$	$I_K , \text{ mA}$	$U_{КЭ} , \text{ В}$	$I_K , \text{ mA}$	$U_{КЭ} , \text{ В}$	$I_K , \text{ mA}$

5.3.8 По таблице 5.4 построить статические характеристики транзистора в схеме с ОЭ. По выходным характеристикам определить значение коэффициента усиления по току $\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$

5.4 Контрольные вопросы

5.4.1 Как называются слои полупроводниковой структуры транзистора и почему?

5.4.2 Что такое эффект модуляции базы?

5.4.3 Что такое коэффициент передачи тока?

5.4.4 Чем обусловлено усиление по току в схеме включения транзистора с ОЭ?

5.4.5 Что такое область отсечки транзистора?

5.4.6 Назовите основные параметры биполярных транзисторов.

6. Лабораторная работа №3. Исследование полевых транзисторов

6.1 Цель работы

Изучение особенностей работы полевых транзисторов, построение статических характеристик транзисторов

6.2 Общие сведения

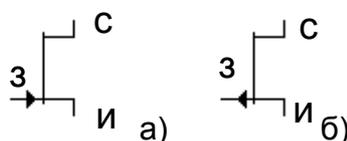
Первоначальное название полевых транзисторов — униполярные транзисторы — было связано с тем, что в таких транзисторах используются основные носители только одного типа (электронов или дырок). Процессы инжекции и диффузии в таких транзисторах практически отсутствуют, во всяком случае, они не играют принципиальной роли. Основным способом движения носителей является дрейф в электрическом поле.

Для того чтобы управлять током в полупроводнике при постоянном электрическом поле, нужно изменять удельную проводимость полупроводникового слоя или его площадь. На практике используются оба

способа и основаны они на эффекте поля (управление напряжением на затворе). Поэтому униполярные транзисторы обычно называют полевыми транзисторами. Проводящий слой, по которому протекает ток, называют каналом. Отсюда еще одно название такого класса транзисторов — каналные транзисторы.

Каналы могут быть приповерхностными и объемными. Приповерхностные каналы представляют собой либо обогащенные слои, обусловленные наличием донорных примесей в диэлектрике, либо инверсионные слои, образующиеся под действием внешнего поля. Объемные же каналы представляют собой участки однородного полупроводника, отделенные от поверхности обедненным слоем.

Транзисторы с объемным каналом отличаются тем, что обедненный слой создается с помощью р-п-перехода. Поэтому их часто называют полевыми транзисторами с р-п-переходом или просто полевыми транзисторами. Транзисторы такого типа впервые описаны Шокли в 1952 г



а) с каналом n – типа,

б) с каналом p – типа.

Рисунок 6.1 – Условное обозначение полевых транзисторов

Электрод, от которого начинают движение носители заряда, называют истоком, а электрод, к которому они движутся, - стоком. Для транзистора с каналом n-типа, оба р-слоя электрически связаны между собой и имеют общий внешний электрод, называемый затвором. Полярность внешних напряжений, подводимых к транзистору показана на рисунке 6.2

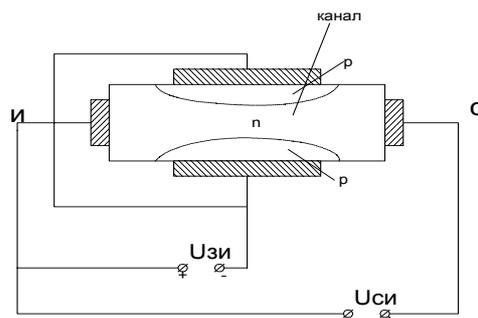


Рисунок 6.2 – Полярность внешних напряжений приложенных к полевому транзистору

Управляющее напряжение подается между затвором и истоком. Управляющие свойства транзистора объясняются тем, что при изменении напряжения $U_{зи}$ изменяется ширина его р-п – переходов, представляющие собой участки полупроводника, обедненные носителями заряда. Так как р-слой имеет большую концентрацию примеси, чем n-слой, изменение ширины р-п – переходов происходит в основном за счет более высокоомного n-слоя (эффект модуляции базы). Тем самым изменяются сечение токопроводящего канала и

его проводимость, то есть выходной ток I_c прибора.

Вольт-амперные характеристики полевых транзисторов с р-п – переходом - стоковые отражают зависимость тока стока от напряжения сток – исток при фиксированном напряжении затвор – исток.

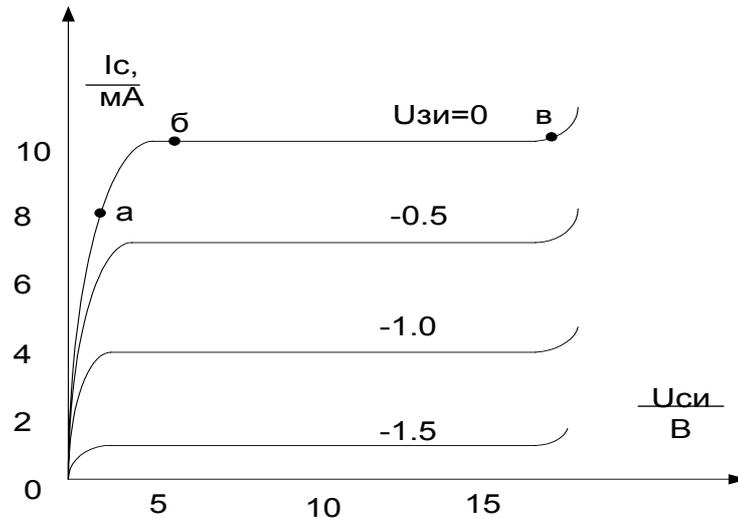


Рисунок 6.3 – Семейство стоковых характеристик полевого транзистора с р-п – переходом

В области малых напряжений (участок 0 – а , рисунок 6.3) влияние напряжения $U_{си}$ на проводимость канала незначительно, в связи с чем здесь практически линейная зависимость. По мере увеличения напряжения (участок а-б на рисунке 6.3) сужение токопроводящего канала оказывает все большее влияние на его проводимость, что приводит к уменьшению крутизны нарастания тока. При подходе к границе (точка б) сечение токопроводящего канала уменьшается до минимума. Дальнейшее увеличение напряжения на стоке не должно приводить к увеличению тока через прибор. Наличие увеличения тока объясняется тем, что у реальных приборов существуют утечки.

Стоко-затворная характеристика полевого транзистора показывает зависимость тока стока от напряжения затвор – исток при фиксированном напряжении сток – исток.

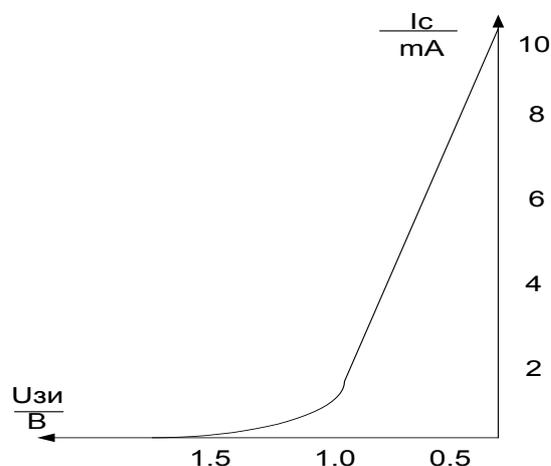


Рисунок 6.4 – Стоко-затворная характеристика полевого транзистора с р-п – переходом

Параметры моделей полевых транзисторов задаются с помощью

диалогового окна и перечислены ниже:

1) Напряжение отсечки (VTO) — напряжение между затвором и истоком полевого транзистора с р-n- переходом или с изолированным затвором, работающих в режиме обеднения, при котором ток стока достигает заданного низкого напряжения. Для транзисторов с изолированным затвором, работающих в режиме обогащения, этот параметр называется пороговым напряжением;

2) Коэффициент пропорциональности – KP;

3) Параметр модуляции длины канала, $1/B - LAMBDA$;

4) Объемное сопротивление области стока, Ом – RD;

5) Объемное сопротивление области истока, Ом – RS;

6) Ток насыщения р-n-перехода, — только для полевых транзисторов с р-n-переходом – IS;

7) Емкость между затвором и стоком при нулевом смещении, Ф – CGD;

8) Емкость между затвором и истоком при нулевом смещении, Ф – CGS;

9) Контактная разность потенциалов р-n-перехода, В — только для полевых транзисторов с р-n-переходом – PB.

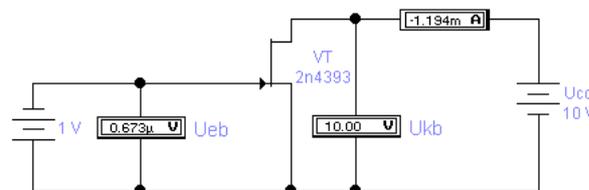


Рисунок 6.5 - Схема для исследования ВАХ полевого транзистора с управляющим р-n-переходом

По аналогии с биполярными транзисторами различают три схемы включения полевых транзисторов: с общим затвором (ОЗ), с общим истоком (ОИ) и с общим стоком (ОС).

Для исследования семейства выходных ВАХ полевого транзистора в схеме с ОИ может быть использована схема на рисунке 6.5. Она содержит источник напряжения затвор-исток U_g , исследуемый транзистор VT, источник питания U_{cc} , вольтметр U_d для контроля напряжения сток-исток и амперметр I_d для измерения тока стока. Выходная ВАХ снимается при фиксированных значениях U_g путем изменения напряжения U_d и измерения тока стока I_d . Напряжение U_g , при котором ток I_d имеет близкое к нулю значение, называется напряжением отсечки.

Располагая характеристиками $I_d=f(U_d)$, можно определить крутизну $S=dI_d/dU_g$, являющейся одной из важнейших характеристик полевого транзистора как усилительного прибора.

Другой тип полевых транзисторов — транзисторы с приповерхностным каналом и структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-транзисторы). В частном случае, если диэлектриком является окисел (двуокись кремния), используется название МОП-транзисторы.

МДП-транзисторы бывают двух типов: транзисторы со встроенным и с индуцированным каналами (в последнем случае канал наводится под действием напряжения, приложенного к управляющим электродам).

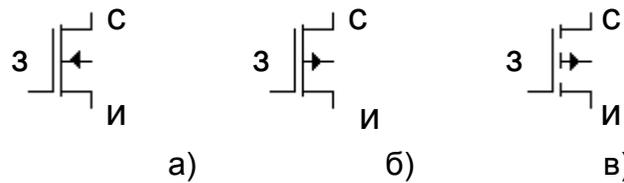


Рисунок 6.6 – Условные обозначения МДП транзисторов со встроенным каналом n и p – типа (а, б); с индуцированным каналом (в).

МДП – транзисторы в общем случае представляют собой приборы с четырьмя выводами. Четвертый вывод, подложка, выполняет вспомогательную функцию.

Стоковые характеристики полевого транзистора со встроенным каналом n – типа показаны на рисунке 6.7.

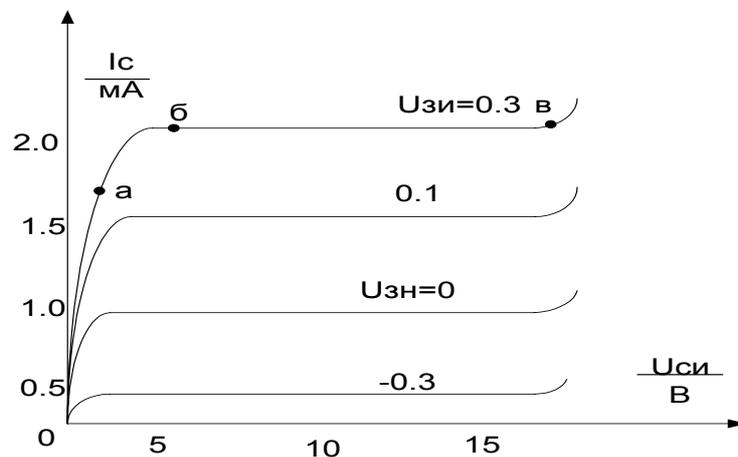


Рисунок 6.7 – Стоковые характеристики МДП - транзистора
Стоко-затворные характеристики МДП – транзистора показаны на рисунке 6.8.

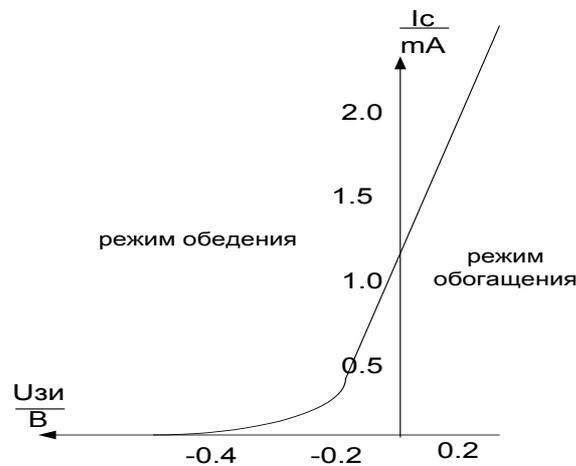


Рисунок 6.8 – Стоко-затворная характеристика МДП – транзистора.

Транзисторы со встроенным каналом могут работать как в режиме обеднения канала носителями заряда, так и в режиме обогащения. Транзисторы

с индуцированным каналом можно использовать только в режиме обогащения. В отличие от транзисторов с управляющим р-n-переходом металлический затвор МДП-транзисторов изолирован от полупроводника слоем диэлектрика и имеется дополнительный вывод от кристалла, называемый подложкой, на которой выполнен прибор.

Управляющее напряжение подается между затвором и подложкой. Под влиянием образующегося электрического поля у поверхности полупроводника создается р-канал за счет отталкивания электронов от поверхности вглубь полупроводника в транзисторе с индуцированным каналом. В транзисторе со встроенным каналом происходит расширение или сужение имеющегося канала. Под действием управляющего напряжения изменяется ширина канала и, соответственно, сопротивление и ток транзистора.

Напряжение на затворе, при котором индуцируется канал, называется пороговым напряжением. При практическом определении этого напряжения обычно задается определенный ток стока, при котором потенциал затвора достигает порогового напряжения (0,2-1 В для транзисторов с n-каналом и 2-4 В с р-каналом).

По мере удаления от поверхности полупроводника концентрация индуцированных дырок уменьшается. На расстоянии, приблизительно равном половине толщины канала, электропроводность становится собственной (беспримесной). Далее располагается участок, обедненный основными носителями заряда, в котором существует область положительно заряженных ионов донорной примеси. Наличие обедненного участка обусловлено также отталкиванием основных носителей заряда от поверхности вглубь полупроводника.

Таким образом, сток, исток и канал, представляющие собой рабочие области МДП-транзистора, изолированы от подложки р-n-переходом. Очевидно, что ширина р-n-перехода и ширина канала изменяется при подаче на подложку дополнительного напряжения, т.е. током истока можно управлять не только путем изменения напряжения на затворе, но и за счет изменения напряжения на подложке. В этом случае управление МДП-транзистором аналогично полевому транзистору с управляющим р-n-переходом.

Толщина инверсного слоя значительно меньше толщины обедненного слоя. Если последний составляет сотни или тысячи нанометров, то толщина индуцированного I канала составляет всего 1-5 нм. Другими словами, дырки индуцированного канала «прижаты» к поверхности полупроводника, поэтому структура и свойства границы полупроводник-диэлектрик играют в МДП-транзисторах очень важную роль.

Дырки, образующие канал, поступают в него не только из подложки г-типа, где их мало и генерируются они сравнительно медленно, но также из слоев р-типа истока и стока, где их концентрация практически не ограничена, а напряженность поля вблизи этих электродов достаточно велика.

В транзисторах со встроенным каналом ток в цепи стока будет протекать и при нулевом напряжении на затворе. Для его прекращения необходимо к затвору приложить положительное напряжение (при структуре с каналом р-типа), равное или большее напряжения отсечки. При этом дырки из

инверсного слоя будут практически полностью вытеснены вглубь полупроводника и канал исчезнет. При приложении отрицательного напряжения канал расширяется и ток снова увеличивается. Таким образом, МДП-транзисторы со встроенными каналами работают в режимах как обеднения, так и обогащения.

Как и полевые транзисторы с управляющим р-п- переходом, МДП-транзисторы при малых напряжениях сток—исток ведут себя подобно линейному сопротивлению. При увеличении этого напряжения ширина канала уменьшается вследствие падения на нем напряжения и уменьшении напряженности электрического поля. Особенно сильно это проявляется в той части канала, которая находится вблизи стока. Перепады напряжения, создаваемые током стока I_d , приводят к неравномерному распределению смещения на затворе вдоль канала, причем оно уменьшается по мере приближения к стоку.

Важным преимуществом МДП-транзисторов по сравнению с биполярными является малое падение напряжения на них при коммутации малых сигналов. Так, если в биполярных транзисторах в режиме насыщения напряжение коллектор-эмиттер принципиально не может быть меньше нескольких десятых долей вольт, то для МДП-транзисторов при малых токах стока это напряжение при работе транзистора в начальной области выходной ВАХ может быть сведено к ничтожно малой величине.

Стокосые характеристики полевого транзистора с индуцированным каналом n-типа очень близки по виду аналогичным характеристикам транзистора со встроенным каналом и имеют тот же характер зависимости. Отличие заключается в том, что управление током транзистора осуществляется напряжением одной полярности, совпадающей с полярностью напряжения $U_{си}$. Их вид приведен на рисунке 6.9.

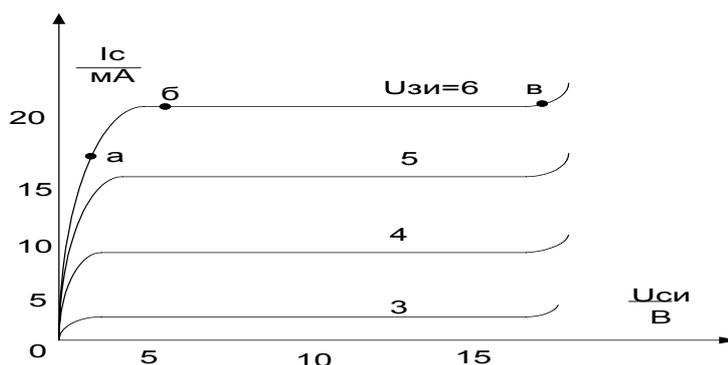


Рисунок 6.9 – Стокосые характеристики

Стоко-затворные характеристики показаны на рисунке 6.10.

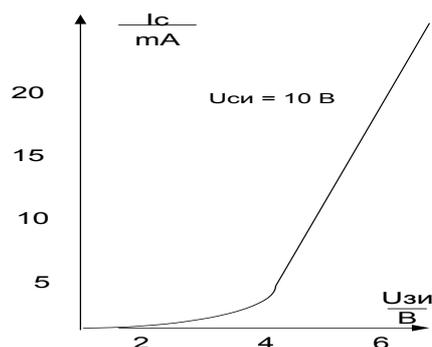


Рисунок 6.10 – Стоко-затворные характеристики МДП – транзистора с индуцированным каналом

В библиотеке компонентов программы EWB МДП-транзисторы со встроенным каналом представлены двумя образцами: n-канальным и p-канальным. Каждый тип МДП-транзистора представлен в двух вариантах: с отдельным выводом подложки и общим выводом подложки и истока.

Параметры МДП – транзисторов:

- 1) Поверхностный потенциал, В – Φ_{HI} ;
- 2) Коэффициент влияния потенциала подложки на пороговое напряжение – GAMMA;
- 3) Емкость между затвором и подложкой, Ф – CGV;
- 4) Емкость донной части перехода сток-подложка при нулевом смещении, Ф – CBD;
- 5) Емкость донной части перехода исток-подложка при нулевом смещении, Ф – CBS;
- 6) Напряжение инверсии приповерхностного слоя подложки, В – PV.

В программе EWB 5.0 количество параметров моделей МДП-транзисторов увеличено. Они размещаются в трех диалоговых окнах-закладках. К дополнительно введенным относятся следующие параметры:

- LD — длина области боковой диффузии, м;
- RSH — удельное сопротивление диффузионных областей истока и стока, Ом;
- JS — плотность тока насыщения перехода сток (исток)-подложка, A/m^2 ;
- CJ — удельная емкость донной части p—га-перехода сток (исток)-подложка при нулевом смещении, Φ/m^2 ;
- CJSW — удельная емкость боковой поверхности перехода сток (исток)-подложка, Φ/m ;
- MJ — коэффициент плавности перехода подложка-сток (исток);
- CGSO — удельная емкость перекрытия затвор-исток (за счет боковой диффузии), Φ/m ;
- CGDO — удельная емкость перекрытия затвор-сток на длину канала (за счет боковой диффузии), Φ/m ;
- CGBO — удельная емкость перекрытия затвор-подложка (вследствие выхода области затвора за пределы канала), Φ/m ;
- NSUB — уровень легирования подложки, $1/cm^3$;

NSS — плотность медленных поверхностных состояний на границе кремний — подзатворный оксид, $1/\text{см}^2$;
 ТОХ — толщина оксида, м;
 ТРГ — легирование затвора; +1 — примесью того же типа, как и для подложки, -1 примесью противоположного типа, 0 — металлом;
 UO — подвижность носителей тока в инверсном слое канала, см²/В·с;
 FC — коэффициент нелинейности барьерной емкости прямо смещенного перехода подложки.

Для исследования характеристик МДП-транзисторов используется схема на рисунке 6.11. С ее помощью можно получить семейство выходных характеристик МДП-транзисторов при фиксированных значениях напряжения на затворе U_g и подложке U_b . Располагая такими характеристиками, можно определить крутизну транзистора S при управлении со стороны затвора, а также крутизну при управлении со стороны подложки $S_b = dI_d/dU_b$; статический коэффициент усиления $M = dU_d/dU_g$; выходное дифференциальное сопротивление $R_d = dU_d/dI_d$ и другие параметры.

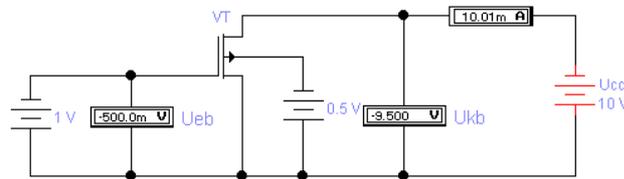


Рисунок 6.11 - Схема для исследования характеристик МДП-транзисторов

6.3 Задание

6.3.1 Построить схему включения полевого транзистора в соответствии с рисунком 6.5. Задать параметры элементов схемы.

6.3.2 Снять стоковые характеристики полевого транзистора с р - n переходом и каналом n – типа: $I_c = f(U_{зи})$, $U_{зи} = \text{const}$. Первоначально установить $U_{зи} = 0$ и записывать изменение параметров I_c и $U_{зи}$ в таблицу 6.1. Затем задать два других значения $U_{зи}$ и заполнить таблицу полностью.

Таблица 6.1 – Экспериментальные данные

$U_{зи} = 0 \text{ В}$		$U_{зи} = -0.5 \text{ В}$		$U_{зи} = -1.0 \text{ В}$	
$I_c, \text{ mA}$	$U_{зи}, \text{ В}$	$I_c, \text{ mA}$	$U_{зи}, \text{ В}$	$I_c, \text{ mA}$	$U_{зи}, \text{ В}$

6.3.3 В соответствии с таблицей 6.1 построить стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора.

6.3.4 Стоко-затворные характеристика: $I_c = f(U_{зи})$, $U_{зи} = \text{const}$

Установить $U_{зи} = 10 \text{ В}$, при этом значении снять показания приборов для $U_{зи}$ и I_c , заполнить таблицу 6.2 и построить график характеристики.

Таблица 7.2 – Экспериментальные данные

Is, mA	Uзи, В

6.3.5 Определить крутизну стоко-затворной характеристики $S = \frac{dI_c}{dU_{зУ}}$,

при $U_{си} = \text{const}$.

Типичные значения параметров транзисторов:

$U_{зи} = 0.8 - 10$ В – напряжение отсечки;

$R_i = 0.02 - 0.5$ МОм – внутреннее сопротивление транзистора;

$S = 0.3 - 7$ mA/V – крутизна стоко-затворной характеристики;

$R_{вх} = 10^8 - 10^9$ Ом – входное сопротивление транзистора;

$C_{из} = C_{си} = 6 - 20$ пФ, $C_{зс} = 2 - 8$ пФ – межэлектродные емкости.

6.4 Контрольные вопросы

6.4.1 Чем обусловлено название полевых транзисторов?

6.4.2 Чем объясняется управляющие свойства полевых транзисторов с p-n - переходом?

6.4.3 В чем различие полевых транзисторов транзисторов с p-n – переходом и МДП – транзисторов?

6.4.4 Каковы основные параметры полевых транзисторов с p-n – переходом?

6.4.5 Что такое режим обеднения и режим обогащения в МДП – транзисторах?

6.4.6 Каковы преимущества МДП – транзисторов перед биполярными транзисторами?

7 Лабораторная работа № 4. Исследование тиристора

7.1 Цель работы

Исследование физических процессов, происходящих в тиристоре, построение его вольтамперной характеристики, изучение способов переключения тиристора.

7.2 Общие сведения

Тиристор – это четырехслойный полупроводниковый прибор, обладающий двумя устойчивыми состояниями: состоянием низкой проводимости (тиристор закрыт) и состоянием высокой проводимости (тиристор открыт).

Тиристор как ключевой элемент нашел широкое применение в цепях постоянного и переменного токов. Режим работы, когда отпирание прибора следует после достижения на нем напряжения переключения (переключение по цепи анода), используется в схемах с динисторами. Для тиристора переключение по цепи анода представляет интерес лишь с точки зрения анализа принципа действия. Практически же применяется режим отпирания

тиристора по управляющему электроду, то есть за счет подачи на управляющий электрод отпирающего импульса напряжения.

Основные параметры тиристорov:

$U_{вкл}$ – прямое анодное напряжение, при котором происходит включение тиристора;

$I_{вкл}$ – ток включения;

$I_{у\ вкл}$ – отпирающий ток управления - наименьший ток в цепи управляющего электрода, который обеспечивает переключение при данном напряжении анода;

$I_{пр\ max}$ – максимально допустимый ток в прямом направлении

Существуют двухэлектродные тиристоры - динисторы; трехэлектродные тиристоры - тринисторы, в которых возможно управление напряжением включения тиристора. Разработаны тиристоры, имеющие одинаковые ВАХ при различной полярности приложенного напряжения. Это симметричные тиристоры - симисторы. Включение тиристора как это следует из вышесказанного, можно производить: а) путем медленного увеличения анодного напряжения; б) путем подачи напряжения на управляющий электрод. Возможно также включение тиристора путем быстрого увеличения анодного напряжения. При этом через прибор будут протекать значительные емкостные токи, приводящие к уменьшению напряжения включения с ростом скорости изменения напряжения $\partial U/\partial t$.

Восстановление запирающих свойств осуществляется за счёт приложения к тиристорy обратного напряжения. Величина $t_в$ определяет время в течение которого происходит полное рассасывание носителей заряда в базовых слоях ранее проводившего тиристора при приложении обратного напряжения, по окончании которого к прибору может быть вновь приложено напряжение в прямом направлении без опасения его самопроизвольного отпираания. Процесс восстановления запирающих свойств происходит за счет двух факторов: протекания обратного тока через тиристор, при котором отводится основная часть носителей заряда, накопленных в базах прибора, и рекомбинации оставшихся носителей заряда. Величины $t_{вк}$ и $t_к$ определяют частотные свойства тиристора и зависят от его типа. Время $t_{вк}$ составляет от 1-5 до 30 мкс, а время $t_в$ от 5-12 до 250 мкс.

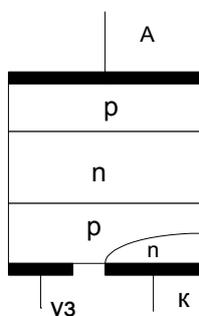


Рисунок 7.1 – Полупроводниковая структура тиристора.

Вольтамперные характеристики тиристора представлены на рисунке 7.2.

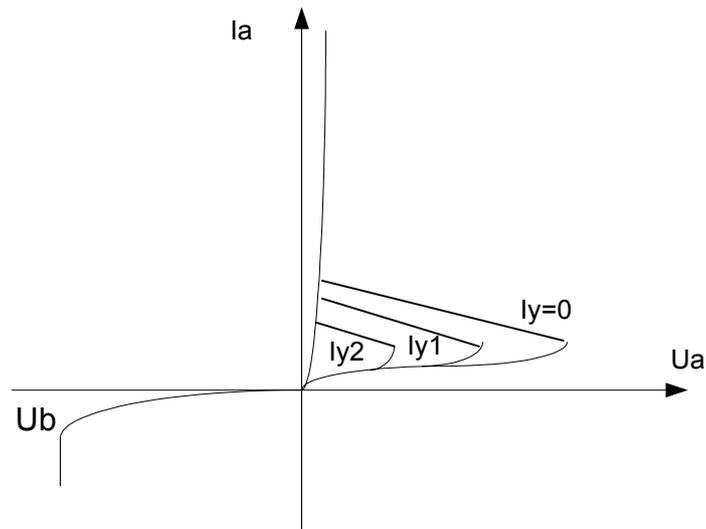


Рисунок 7.2 - Вольтамперные характеристики тиристора

Для тиристорov можно задать значения следующих параметров:

I_S — обратный ток динистора;

I_{DRM} — то же, но для тринистора;

V_S — напряжение, при котором динистор переключается в открытое состояние;

V_{DRM} — то же, но для тринистора при нулевом напряжении на управляющем электроде;

V_{TM} — падение напряжения в открытом состоянии;

I_{TM} — ток в открытом состоянии;

T_G — время переключения в закрытое состояние;

I_H — минимальный ток в открытом состоянии (если он меньше установленного, то прибор переходит в закрытое состояние);

dV/dt — допустимая скорость изменения напряжения на аноде тринистора, при котором он продолжает оставаться в закрытом состоянии (при большей скорости тринистор открывается);

C_{JO} — барьерная емкость динистора при нулевом напряжении на переходе;

V_{GT} — напряжение на управляющем электроде открытого тринистора;

I_{GT} — ток управляющего электрода;

V_D — отпирающее напряжение на управляющем электроде.

Перечисленные параметры можно задать с помощью диалоговых окон.

Исследование прямой ветви ВАХ тринистора можно проводить с использованием схемы на рисунке 7.3.

Следует отметить, что снятие ВАХ переключательных диодов может быть осуществлено также и в режиме заданных токов в силовой и управляющей цепи.

7.3 Задание

7.3.1 Собрать схему изображенную на рисунке 7.3 для исследования тиристора. Выбрать в библиотеке тиристор в соответствии с таблицей 7.1

Таблица 7.1 – Значения параметров тиристора

Напряжение в открытом состоянии, В	Отпирающее напряжение УЭ при $I_y=100$ мА, В	Ток в закрытом состоянии, мА	Минимальный ток в открытом состоянии, мА	Предельные допустимые значения				
				Прямое напряжение на УЭ, В	Постоянный ток в открытом состоянии, А	Постоянное обратное напряжение, В	Обратный ток на УЭ, мА	Остаточное прямое напряжение, В
2	6	5	100	10	2	25	5	30

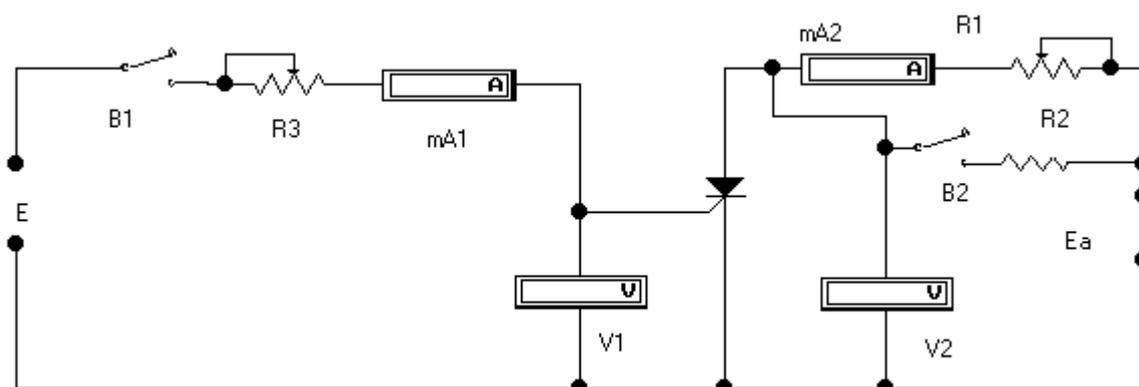


Рисунок 7.3 - Схема для исследования тиристоров

7.3.2 Снять ВАХ тиристора для различных напряжений на управляющем электроде (0; 0,5; 1,0; 2 В) При снятии характеристик следить за тем, чтобы ток тиристора не превышал максимально допустимый ток $I_a \text{ max}$. Миллиамперметры должны иметь пределы измерений 20 – 30 мА, вольтметр V1 – 2,5 В, V2 – 3 В. Данные занести в таблицу 7.2

Таблица 7.2 – Экспериментальные данные

$U_y = 0, \quad I_y = \dots$		$U_y = 0,5 \text{ В}, \quad I_y = \dots$		$U_y = 1 \text{ В}, \quad I_y = \dots$	
$U_a, \text{ В}$	$I_a, \text{ мА}$	$U_a, \text{ В}$	$I_a, \text{ мА}$	$U_a, \text{ В}$	$I_a, \text{ мА}$

7.3.3 Используя таблицы построить ВАХ тиристора;

7.3.4 Исследовать способ выключения тиристора за счет уменьшения анодного тока;

1) Включить ключ B1 и установить с помощью R3 минимальное значение управляющего тока. Изменяя плавно анодное напряжение добиться включения тиристора. После выключения тумблера B1 убедиться, что тиристор остаётся в открытом состоянии.

2) Плавно изменяя сопротивление R1 добиться отключения тиристора, за счёт уменьшения анодного тока. Записать это значение и сравнить его с табличными значениями при минимальном значении управляющего тока.

7.3.5 Исследовать способ выключения тиристора изменяя анодное напряжение на тиристоре;

1 Повторить последовательность включения тиристора аналогично как в пункте 7.3.4

2 Плавно уменьшая анодное напряжение на источнике E_a , перевести тиристор в закрытое состояние.

3 Затем вновь включить тумблер В1 и повышая анодное напряжение на источнике E_a добиться включения тиристора.

4 Записать значение анодного напряжения, когда тиристор переходит во включенное состояние, и когда тиристор переходит в закрытое состояние.

7.3.6 Исследовать способ выключения тиристора током управляющего электрода.

1) Включить тумблер В1 и установить с помощью R3 среднее значение управляющего тока.

2) Изменяя плавно анодное напряжение добиться включения тиристора. После выключения тумблера В1 убедиться, что тиристор остался в открытом состоянии.

3) Переключить полярность напряжения на управляющем электроде на положительную.

4) Снова включить тумблер В1. Тиристор должен перейти в закрытое состояние. Если этого не произойдет, плавно уменьшая сопротивление R3, добиться такого значения управляющего тока, при котором произойдет выключение тиристора.

7.3.7 Используя данные таблицы 7.2 построить пусковую характеристику тиристора, которая показывает зависимость тока, протекающего через управляющий электрод тиристора во включенном состоянии, от анодного тока.

7.4 Контрольные вопросы

7.4.1 Каковы особенности вольт-амперной характеристики неуправляемого тиристора?

7.4.2 Какие составляющие токов протекают в управляемом тиристоре?

7.4.3 Какими способами можно включить тиристор?

7.4.4 Какими способами можно выключить тиристор?

7.4.5 Как зависит ВАХ тиристора от величины тока на управляющем электроде тиристора?

7.4.6 В каких схемах используют тиристор?

8 Лабораторная работа №5. Изучение операционных усилителей

8.1 Цель работы

Изучение принципа действия аналоговых схем на операционных усилителях.

8.2 Общие сведения

Термин «операционные усилители» относится к усилителям постоянного тока с большим коэффициентом усиления, имеющим дифференциальный вход (два входных вывода) и один общий выход.

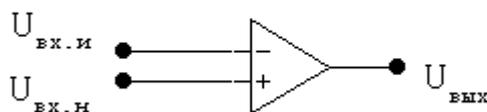


Рисунок 8.1 – Операционный усилитель

Один из входов усилителя ($U_{вх.н}$ «+») называется неинвертирующим, а второй ($U_{вх.и}$ «-») - инвертирующим. При подаче сигнала на неинвертирующий вход приращение выходного сигнала совпадает по знаку (фазе) с приращением входного сигнала. Если же сигнал подан на инвертирующий вход, то приращение выходного сигнала имеет обратный знак (противоположный по фазе) по сравнению с приращением входного сигнала. Инвертирующий вход часто используется для введения в операционный усилитель внешних отрицательных обратных связей.

Основу ОУ составляет дифференциальный каскад, применяемый в качестве входного каскада усилителя. Выходным каскадом ОУ обычно служит эмиттерный повторитель, обеспечивающий требуемую нагрузочную способность всей схемы. Поскольку коэффициент усиления по напряжению эмиттерного повторителя близок к единице, необходимое значение K_u ОУ достигается с помощью дополнительных усилительных каскадов, включаемых между дифференциальным каскадом и эмиттерным повторителем.

Рассмотрим некоторые примеры построения аналоговых схем на ОУ.

8.2.1 Инвертирующий усилитель (рисунок 8.2)

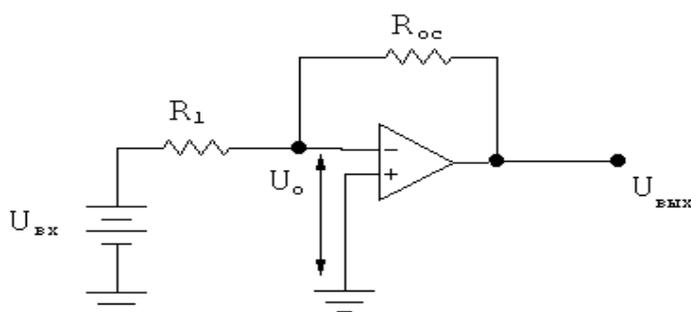


Рисунок 8.2 – Инвертирующий усилитель

Инвертирующий усилитель, изменяющий знак выходного сигнала относительно входного, создается введением по инвертирующему входу ОУ с помощью резистора R_{oc} параллельной отрицательной обратной связи по напряжению. Входной сигнал подается через резистор R_1 на инвертирующий вход ОУ.

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_{Uu} = -\frac{R_{oc}}{R_1}$$

Выбор $R_{oc} = R_1$, когда $K_{Uu} = -1$, придает схеме свойство инвертирующего повторителя напряжения (инвертора сигнала).

8.2.2 Неинвертирующий усилитель (рисунок 8.3).

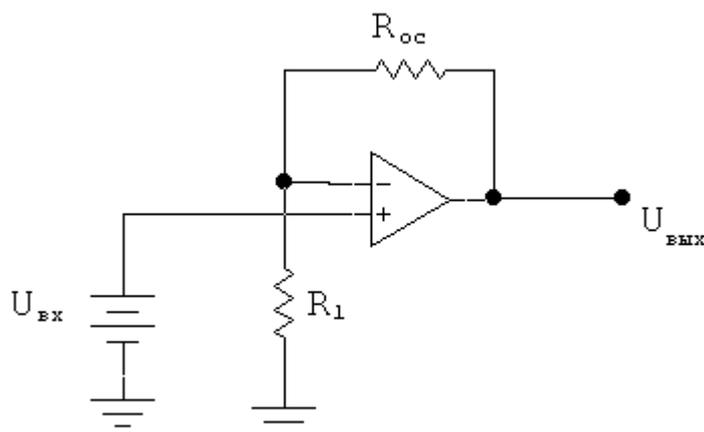


Рисунок 8.3 – Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель содержит последовательную отрицательную обратную связь по напряжению, поданную по инвертирующему входу, входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ. Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

$$K_{U_{\text{н}}} = 1 + \frac{R_{\text{oc}}}{R_1}$$

При $R_{\text{oc}} = 0$ и $K_1 = \infty$ приходим к схеме повторителя (рисунок 8.4).

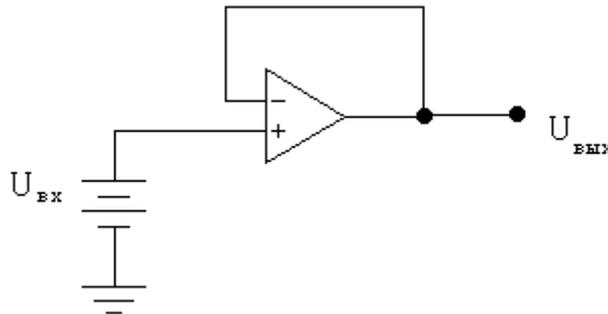


Рисунок 8.4 - Схема повторителя

8.2.3 Преобразователь тока в напряжение (рисунок 8.5).

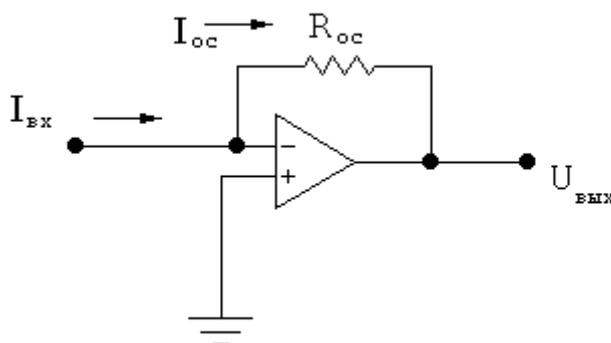


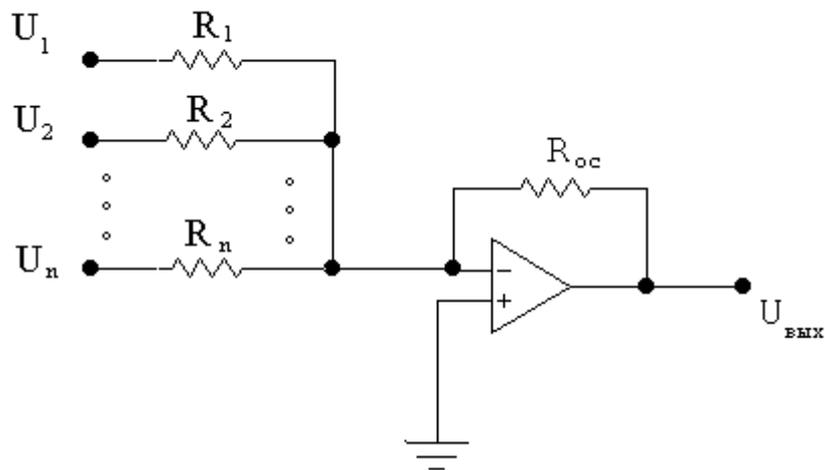
Рисунок 8.5 - Преобразователь тока в напряжение

Схема осуществляющая преобразование тока в напряжение, является вариантом схемы на рисунке 2 при $R_1 = 0$.

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{oc}} = -\frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{oc}}}$$

$$U_{\text{вых}} = -I_{\text{вх}} R_{\text{oc}}$$

Малое входное и выходное сопротивления являются важными преимуществами схемы при ее использовании для преобразования тока источников сигнала в напряжение.



8.2.4 Инвертирующий сумматор (рисунок 8.6)

Рисунок 8.6 - Инвертирующий сумматор

Схема выполняется по типу инвертирующего усилителя с числом параллельных ветвей на входе, равным количеству сигналов, предназначенных для сложения.

Выходное напряжение определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = - \left(\frac{R_{oc}}{R_1} U_1 + \frac{R_{oc}}{R_2} U_2 + \dots + \frac{R_{oc}}{R_n} U_n \right)$$

5.2.5 Неинвертирующий сумматор (рисунок 8.7)

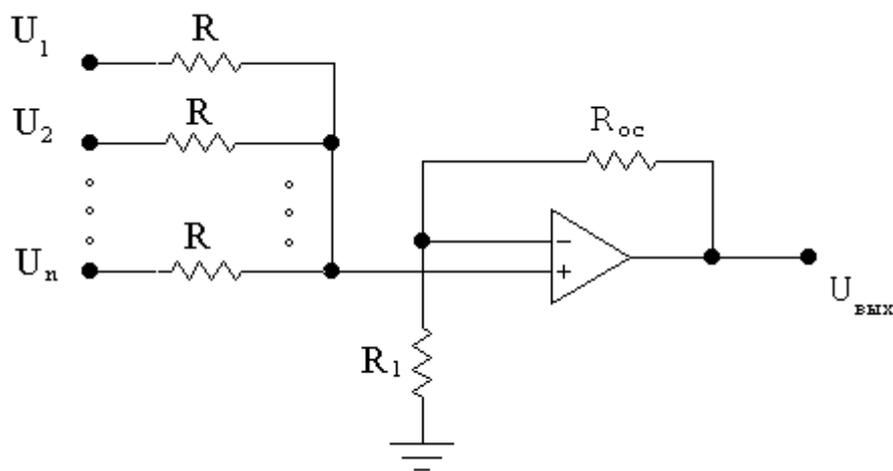


Рисунок 8.7 - Неинвертирующий сумматор

Выходные напряжения выражаются:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R_1 + R_{oc}}{nR} (U_1 + U_2 + K + U_n)$$

8.2.6 Интегратор (рисунок 8.8)

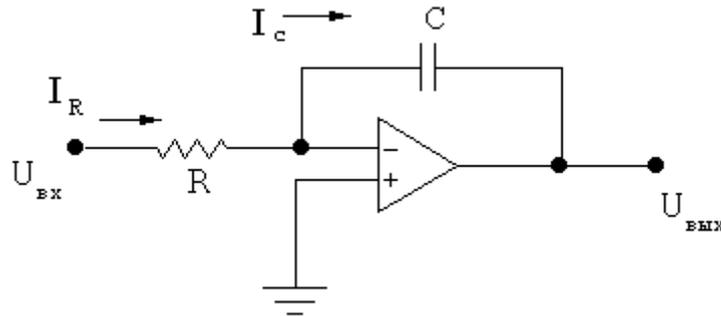


Рисунок 8.8 - Схема интегратора

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{вх}} dt + U_{\text{вых}_0}$$

где $U_{\text{вых}_0}$ - выходное напряжение при $t = 0$

Временные диаграммы, иллюстрирующие характер изменения выходного напряжения при наличии единичного скачка напряжения на входе изображены на рисунке 8.9.

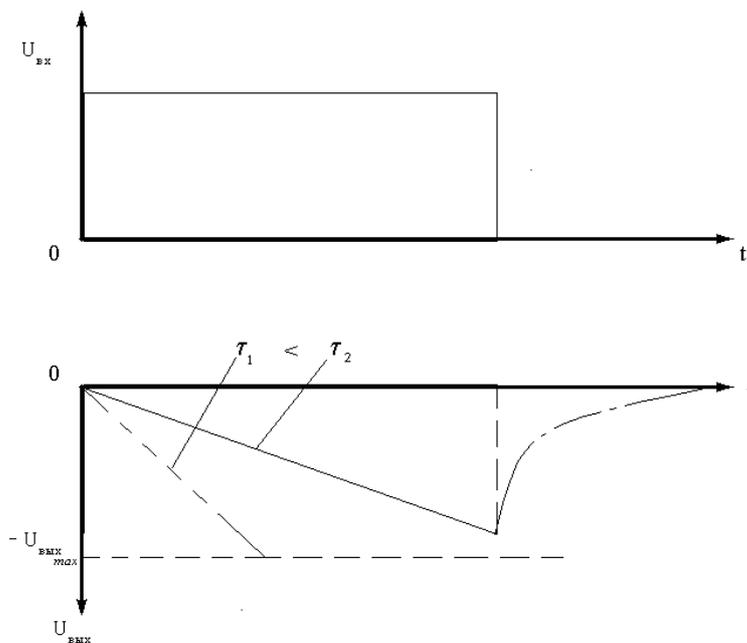


Рисунок 8.9 - Временные диаграммы, иллюстрирующие характер изменения выходного напряжения при наличии единичного скачка напряжения на входе

Отсчет времени ведут с момента поступления входного сигнала, причем обычно при $t=0$ $U_{вх} = 0$ и $U_{вых} = 0$. В связи с этим выходное напряжение определяется выражением

$$U_{вых} = -\frac{1}{\tau} \int_0^e U_{вх} dt$$

где $\tau=RC$ — постоянная интегрирования.

Интегратор широко используют при построении аналоговых решающих и моделирующих устройств на его основе выполняют генераторы линейно изменяющегося напряжения.

Параметры ОУ.

1. Коэффициент усиления напряжения $K_{и}$ (Open-loop gain A) – отношение выходного напряжения ко входному. В общем случае коэффициент усиления ОУ, не охваченного обратной связью, может достигать нескольких миллионов, однако с ростом частоты он уменьшается.

2. Частота единичного усиления f_1 , Гц (Unity-gain bandwidth f_u) – значение частоты входного сигнала, при котором коэффициент усиления ОУ уменьшается до единицы. Этот параметр определяет максимально возможную полосу пропускания ОУ.

3. Максимальное выходное напряжение $+U_{вых макс.}$, В (Positive voltage swing, V_{sw+}) и $-U_{вых макс.}$, В (Negative voltage swing, V_{sw-}) – максимальное выходное напряжение положительной и отрицательной полярности, при котором нелинейные искажения пренебрежимо малы при рекомендуемой изготовителем схеме включения ОУ. Это напряжение измеряется относительно нулевого потенциала при заданном сопротивлении нагрузки. При уменьшении этого сопротивления максимальное выходное напряжение уменьшается.

4. Скорость нарастания выходного напряжения $V_{вых}$, В/мкс (Slew rate SR) – отношение изменения выходного напряжения от 10 до 90% от своего номинального значения ко времени, за которое произошло это изменение. Этот параметр характеризует скорость отклика ОУ, охваченного отрицательной обратной связью, на ступенчатое изменение выходного сигнала при усилении 1 или 10. ОУ при $V_{вых}=15...150$ В/мкс относятся к классу быстродействующих.

5. Напряжение смещения нуля $U_{см}$, В (Input offset voltage V_{os}) – напряжение, которое нужно подать на вход ОУ, чтобы выходное напряжение равнялось нулю. Эта величина определяется разбросом параметров компонентов, входящих в состав ОУ (см. 7.2); для компенсации $U_{см}$ в большинстве ОУ имеются специальные выводы для подключения цепей подстройки.

6. Входные токи $I_{вх}$, (Input bias current I_{bs}) – токи, протекающие через входные зажимы ОУ; они обусловлены токами базы входных биполярных транзисторов или токами утечки затворов полевых транзисторов. Входные токи создают на внутреннем сопротивлении источника сигнала падение напряжения,

которое вызывает появление напряжения на выходе при отсутствии на входе внешнего сигнала.

7. Разность входных токов $\Delta I_{вх}$, (Input offset current I_{os}) - достигает 10-20% от $I_{вх}$, создает на входе ОУ разность потенциалов, приводящую к смещению нуля на выходе.

8. Коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{ос\ сф, дБ}$ (Common mode rejection ratio $CMRR$) – отношение коэффициента усиления напряжения, приложенного между входами ОУ, к коэффициенту усиления напряжения, приложенного между общей шиной и каждым входом.

9. Выходной ток короткого замыкания $I_{вых, А}$ (Output short circuit current I_{sc}) – максимальное значение выходного тока ОУ, при котором гарантируется работоспособность прибора.

10. Input resistance R_i , Ом - входное сопротивление.

11. Output resistance R_o , Ом - выходное сопротивление.

12. Phase margin pm - запас по фазе на частоте единичного усиления в градусах; характеризует устойчивость ОУ.

13. Compensation capacitance C_c , Ф - емкость корректирующего конденсатора, служит для обеспечения устойчивости ОУ при введении ООС, В ОУ ранних выпусков предусматривались специальные выводы для подключения такого конденсатора, сейчас он в большинстве случаев реализуется на кристалле ОУ.

14. Location of second pole fp_2 , Гц - частота второго полюса передаточной характеристики (только для линейной модели ОУ).

15. Максимальное входное напряжение $U_{вх}$, В (в списке параметров ОУ в программе EWB отсутствует) – напряжение между входными клеммами ОУ, превышение которого приводит к выходу прибора из строя.

16. Максимальное синфазное входное напряжение $U_{вх\ сф}$, В (в EWB отсутствует) – наибольшее значение напряжения, прикладываемого одновременно к обеим входным клеммам ОУ относительно нулевого потенциала (земли), превышение которого нарушает работоспособность прибора (увеличиваются входные токи и смещение нуля, существенное уменьшается коэффициент усиления).

17. Коэффициент влияния источников напряжения питания $K_{вл\ ип}$, мкВ/В – характеризует изменение выходного напряжения прецизионных ОУ при изменении напряжения источников питания (нормируется на уровне 1..10 мкВ/В).

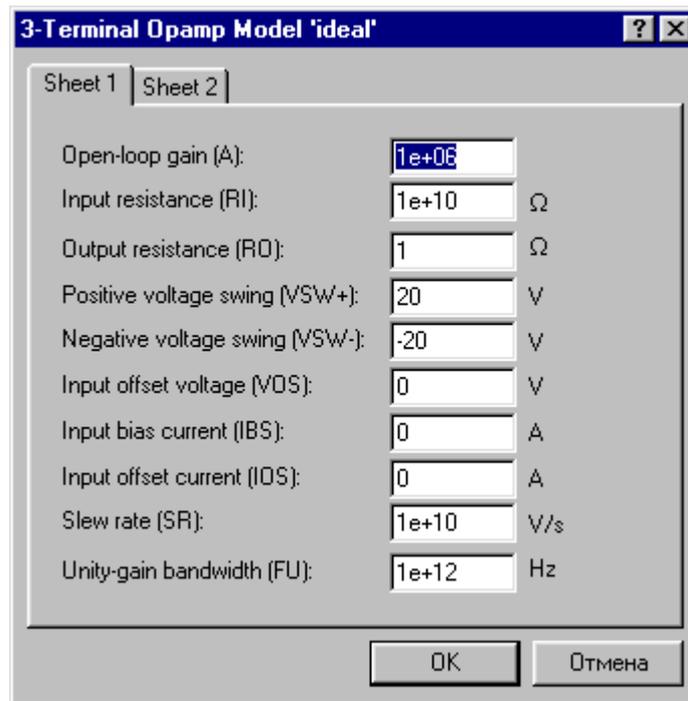


Рисунок 8.10 - Окно установки параметров ОУ

8.3 Задание

8.3.1 Построить схему инвертирующего усилителя в соответствии с рисунком 8.2.

8.3.2 Рассчитать параметры схемы таким образом, чтобы получить коэффициент усиления по напряжению = - 10.

8.3.3 С помощью измерительных приборов программы EWB проверить полученные усиления по напряжению.

8.3.4 Построить схему неинвертирующего усилителя в соответствии с рисунком 8.3.

8.3.5 Рассчитать параметры схемы таким образом, чтобы получить коэффициент усиления по напряжению =20.

8.3.6 С помощью измерительных приборов программы EWB проверить полученные усиления по напряжению.

8.3.7 Изменить параметры схемы так, чтобы получить повторитель. Проверить результат.

8.3.8 Построить схему неинвертирующего сумматора в соответствии с рисунком 8.7. Выбрать параметры схемы и рассчитать результирующее напряжение на выходе сумматора. Проверить с помощью измерительных приборов правильность расчетов.

8.3.9 Построить схему интегратора в соответствии с рисунком 8.8. Задавая различные значения постоянной интегрирования τ , наблюдать изменения формы выходного напряжения с помощью осциллографа.

8.4 Содержание отчета

По каждому пункту задания привести чертеж схемы, результаты расчета, и результаты измерения.

8.5 Контрольные вопросы

8.5.1 Что составляет основу ОУ?

8.5.2 Какие основные параметры ОУ?

8.5.3 Где используются инвертирующие и неинвертирующие усилители?

8.5.4 Виды обратных связей в усилителях. Какую роль играет отрицательная обратная связь?

8.5.5 Как определяется коэффициент усиления неинвертирующего усилителя?

8.5.6 Что такое постоянная интегрирования? Какое влияние она оказывает на выходное напряжение интегратора?

8.5.7 Какие преимущества схемы преобразователя тока в напряжение вы знаете?

Список использованных источников

1. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и её применение. -М.: Солон-Р, 1999 –506с.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника, -М: Высшая школа, 1982.- 496с.
3. ЛачинВ.И., Савёлов Н.С., Электроника. – Ростов н/Д.: Феника ,2000 –448с.
4. Васильев В.И., Гусев Ю.М., Миронов В.Н. Электронные промышленные устройства. - М .: Высшая школа, 1988.- 303с.
5. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. - М .: Энергоатомиздат, 1992.- 296с.