

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра «Строительные и дорожные машины»

А.И.АНТОНЕВИЧ

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА

**Лабораторный практикум
по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника»**

Часть 1

Учебное электронное издание

Минск 2007

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Лабораторная работа № 1	
<i>ИЗУЧЕНИЕ ПРОГРАММЫ «ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ»</i>	4
1. Краткие сведения из теории	4
1.1 Характеристика программы	4
1.2 Элементы управления	5
1.3 Создание схем	6
1.4 Создание блоков элементов	8
1.5 Инструменты анализа логических схем	9
2. Порядок выполнения работы	15
3. Содержание отчета.....	15
4. Контрольные вопросы	16
Лабораторная работа № 2	
<i>ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ</i>	17
1. Краткие сведения из теории	
Основы принципов работы диодов	17
2. Порядок выполнения работы	22
3. Содержание отчета.....	25
4. Контрольные вопросы	25
Лабораторная работа №3	
<i>ТРАНЗИСТОРЫ</i>	26
1. Краткие сведения из теории	
Основы принципов работы транзисторов.....	26
2. Порядок выполнения работы	35
3. Содержание отчета.....	38
4. Контрольные вопросы	38
Лабораторная работа №4	
<i>ЦИФРОВЫЕ МИКРОСХЕМЫ</i>	39
1. Краткие сведения из теории	
Основы принципов работы цифровых микросхем.....	39
2. Порядок выполнения работы	45
3. Содержание отчета.....	46
4. Контрольные вопросы	46
ПРИЛОЖЕНИЕ №1	
Система моделирования Eletctronics Workbench.....	47
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	51

ВВЕДЕНИЕ

Целью данного цикла лабораторных работ является изучение принципов работы основных элементов и устройств электроники, на базе программы «Электронная лаборатория» (*“Electronics Workbench”*) фирмы *“Interactive Image Technologies”*, а также получение практических навыков при создании электронных устройств или анализа их работы.

Рассмотрены наиболее распространенные контрольно-измерительные приборы, широко используемые в электронике при исследовании работы устройств, а также современные методы анализа. Взамен физического моделирования устройств, связанного с большими материальными затратами, рассмотрен метод математического моделирования с использованием средств и методов вычислительной техники.

Выполнение лабораторных работ предусматривает предварительное изучение их теоретической части.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ПРОГРАММЫ «ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ»

Ц е л ь р а б о т ы. Изучить основные элементы и конструкции программы «Электронная лаборатория», предназначенные для синтеза и анализа схем, и научиться строить с их помощью простейшие электронные устройства.

1. Краткие сведения из теории

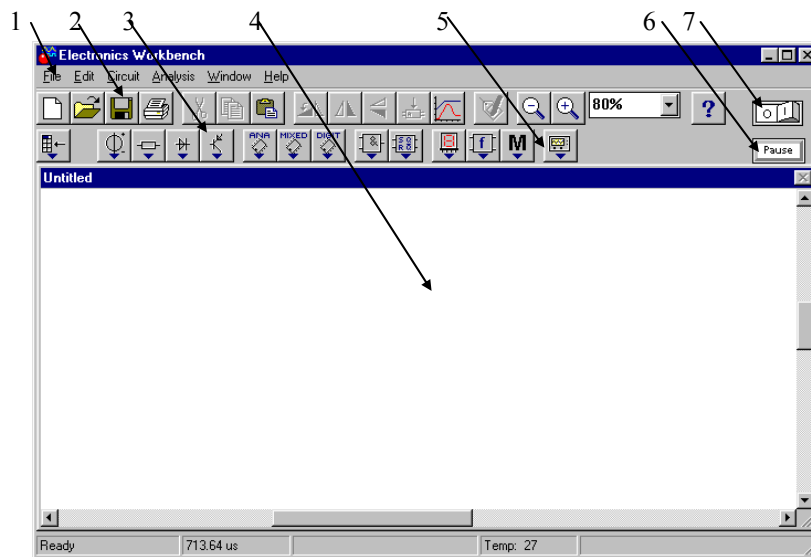
1.1 Характеристика программы

Программа «Электронная лаборатория» [1,4] предназначена для синтеза и анализа дискретных и аналоговых схем на основе стандартных компонентов, входящих в базовый набор программы.

Для работы с данной программой не требуется практически никакой подготовки, так как программа имеет интуитивный интерфейс, т.е. самый простой и легко осваиваемый. Программа разработана для работы в среде *Windows*.

1.2 Элементы управления

Меню программы (рисунок 1.1) предназначено для выбора действий пользователя при работе с файлами, справочной системой, распечаткой созданных схем, импортом-экспортом данных, редактированием схем, операциями с окнами и др.



1 – панель меню программы; 2 – панель с кнопками наиболее часто используемых команд; 3 – панель базовых элементов программы с ниспадающими меню; 4 – поле для рисования схем; 5 – панель инструментов программы с ниспадающими меню; 6 – кнопка «Пауза»; 7 – кнопка «Запуска/Остановки» процесса моделирования

Рисунок 1.1 – Примерный вид программы «Электронная лаборатория» при запуске

Рассмотрим основные команды программы, с которыми придется оперировать при анализе и синтезе дискретных схем.

Раздел меню «**File**» содержит в себе такие основные команды, как:

- 1) *New* – создать новый файл;
- 2) *Open* – открыть существующий файл;
- 3) *Save* – записать файл;
- 4) *Save as...* – записать файл с другим именем;
- 5) *Revert to Saved* – вернуться к записанному файлу, т. е. отмена всех исправлений в файле;

- 6) *Print* – распечатать файл на принтере;
- 7) *Print setup* – настройка печати;
- 8) *Exit* – выход из программы и др.

Меню «**Edit**» содержит такие основные команды:

- 1) *Cut* – вырезать, т. е. удаление и перенос выделенного фрагмента схемы в буфер обмена;
- 2) *Copy* – копирование выделенного фрагмента в буфер;
- 3) *Paste* – вставка из буфера фрагмента схемы;
- 4) *Delete* – удаление выделенного фрагмента;
- 5) *Select All* – выделить всю схему для копирования, переноса или удаления;
- 6) *Show Clipboard* – показать содержимое буфера обмена и др.
- 7) *Copy as Bitmat* – команда превращает курсор мыши в крестик, которым по правилу прямоугольника можно выделить нужную часть экрана, после отпускания левой кнопки мыши выделенная часть копируется в буфер обмена.

Меню «**Circuit**» содержит следующие команды:

- 1) *Rotate* – повернуть элемент на 90 градусов по часовой стрелке, повторный выбор – еще на 90 градусов и т. д.;
- 2) *Flip Horizontal* – отражение элемента в горизонтальной плоскости;
- 3) *Flip Vertical* – то же в вертикальной плоскости;
- 4) *Component Properties* – свойства компонента;
- 5) *Create Subcircuit* – создать из выделенного фрагмента схемы блок;
- 6) *Zoom In* – увеличение масштаба;
- 7) *Zoom Out* – уменьшение масштаба;
- 8) *Schematic Options* – опции схемы;

Остальные меню практически не требуются для работы: это команды вызова справки – «**Help**», работы с окнами – «**Window**», опций анализа схемы – «**Analysis**».

1.3 Создание схем

При построении схемы требуется выбрать пиктограмму необходимой группы базовых элементов на панели базовых элементов и щелкнуть на ней левой кнопкой мыши. При этом раскроется ниспадающее меню, в котором можно выбрать

необходимый тип элемента, и, удерживая левую кнопку мыши нажатой, перетащить требуемый элемент из ниспадающего меню поля базовых элементов на поле для рисования схем, при этом элемент появляется на поле схемы.

Для того чтобы соединить два элемента между собой, нужно подвести курсор мыши к выводу первого элемента, нажать левую кнопку мыши (при этом у вывода элемента появится небольшой квадратик) и, удерживая кнопку мыши нажатой, перетянуть указатель мыши к выводу другого элемента. При этом будет вычерчиваться линия слежения за курсором мыши, и вокруг вывода другого элемента появится такой же небольшой квадратик. Затем кнопка мыши отпускается и провод, соединяющий два вывода, готов. Он будет нарисован в поле схемы.

Для удаления элемента из схемы достаточно навести курсор мыши на элемент, который требуется удалить, и нажать левую кнопку мыши, при этом элемент окрасится в красный цвет. После чего нажимается клавиша «Delete» («Del») или выбирается пункт «Delete» в меню «Edit» и элемент удаляется из схемы.

В программе также можно задать имя элементу или блоку. В этом случае следует выделить элемент (блок) и выбрать в меню «Circuit» команду «Component Properties» или два раза «щелкнуть» левой кнопкой мыши на выбранном элементе (блоке). После этого появится меню «...Properties», в котором требуется выбрать закладку «Label» и в поле «Label» набрать задуманное имя элемента (желательно английскими буквами). Затем нажимается кнопка «OK», и название элемента появляется над ним.

Если требуется задать ошибки в работу какого-либо элемента, то в окне «...Properties», вызванном, как и в предыдущем случае, выбирается закладка «Fault». В этой закладке можно выбрать такие неисправности, как: короткое замыкание указанных цифрами выводов элемента (*Short*), обрыв на заданных цифрами выводах (*Open*), задать величину сопротивления утечки (*Leakage*) либо выбрать отметку, обозначающую отсутствие ошибок (*None*).

Для изменения цвета проводника, соединяющего элементы, надо дважды щелкнуть на нем левой кнопкой мыши. При этом появится меню «Wire Properties», в котором нужно нажать кнопку «Set Wire Color» и в появившемся подокне выбрать желаемый цвет проводника. После этого нажать «OK».

1.4 Создание блоков элементов

Программа «Электронная лаборатория» дает возможность упрощения построения схем путем создания необходимых блоков.

Для создания блока следует выделить схему (участок схемы), которую необходимо поместить в блок. Это можно выполнить следующим образом: за пределами схемы нажимается левая кнопка мыши и, не отпуская ее, указатель мыши двигается по диагонали. При этом образуется рамка и выделяются красным цветом все элементы, попавшие в нее.

Затем выбирается команда «*Create Subcircuit*» в меню «*Circuit*». После чего появится меню, в котором следует набрать имя создаваемого блока и нажать одну из предлагаемых клавиш «*Copy From Circuit*» (копировать из схемы), «*Move From Circuit*» (переместить из схемы), «*Replace in Circuit*» (заменить в схеме), «*Cancel*» (отменить). В зависимости от выбранного варианта часть схемы, выбранная для блока, будет либо скопирована из схемы, либо перемещена из нее, либо заменена блоком с указанным именем. Блок будет представлен отдельным окном, которое может быть закрыто путем нажатия кнопки с крестиком в правом верхнем углу (рисунок 1.2). После закрытия окна блока он помещается в специальной области, под названием «*Favorites*», из которой блок можно извлечь и поместить на поле схемы. Для этого следует нажать кнопку «*Favorites*», которая размещается первой слева на панели базовых элементов программы. После нажатия кнопки, появится окошко с элементом «*Sub*», на котором следует нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее нажатой, переместить мышь на область рисования схемы. Затем надо отпустить кнопку. В результате появится меню «*Choose SUB*», в котором надо выбрать имя созданного ранее блока и нажать кнопку «*Accept*». На поле для рисования схем появится небольшой прямоугольник с выбранным именем. Это и есть сформированный ранее блок. Для того чтобы его рассмотреть, на прямоугольнике можно выполнить двойной щелчок левой кнопкой мыши, и блок развернется в окно со схемой. В этом окне можно сделать необходимые выводы для подключения схемы. Для этого надо подвести курсор к выводу элемента и, когда появится окно выделения на выводе, удерживая левую кнопку мыши, вывести курсор за пределы окна в том месте, где требуется

вывод. При этом на границе окна появится небольшой квадратик, и, если закрыть окно, отобразится прямоугольник с выводами, к которым можно подключать другие элементы.

Блокам можно назначать любые имена. В этом случае можно будет создать целую библиотеку цифровых микросхем и цифровых устройств.

На рисунке 1.2 приведен пример создания блока из трех логических элементов с четырьмя выводами для подключения под именем “Blok”.

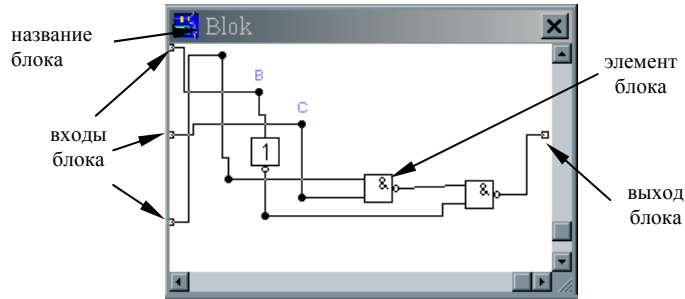


Рисунок 1.2 – Развернутое окно созданного блока

1.5 Инструменты анализа логических схем

Программа имеет в своем составе семь приборов, которые будут использованы нами для анализа схем.

1. Мультиметр (*Multimeter*) предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений и уровней в различных точках схемы (рисунок 1.3). Например, для измерения напряжений на выводах схемы его достаточно перетащить с помощью мыши на поле рисования схем и подключить к исследуемой цепи.

Для этого у мультиметра на корпусе есть два вывода: “+” и “-”. На лицевой панели мультиметра расположены кнопки управления:



– выбор режима измерения тока, напряжения, сопротивления и ослабления;



- выбор режима измерения переменного или постоянного тока.

Непосредственно перед исследованием схемы необходимо осуществить, путем нажатия левой кнопки мыши соответствующей



Рисунок 1.3 – Мультиметр в развернутом виде

кнопки управления, выбор режимов измерения. Чтобы увидеть показания мультиметра, надо два раза быстро нажать левую кнопку мыши на нем.

2. Генератор кодов (*Word Generator*) служит для выработки различных кодовых последовательностей в шестнадцатеричном коде в различных режимах (рисунок 1.4). Для набора комбинаций необходимо щелкнуть мышью на соответствующем разряде

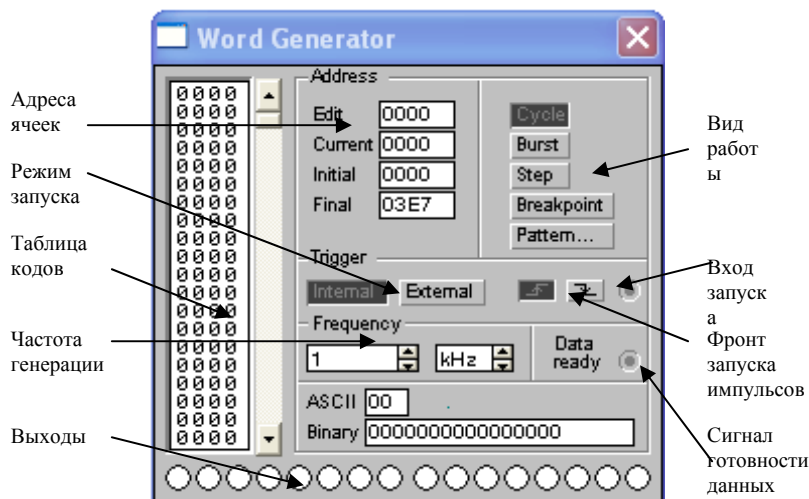


Рисунок 1.4 – Генератор кодовых последовательностей в развернутом виде и затем ввести с клавиатуры шестнадцатеричный код. Сформированные слова, выдаются на 16 расположенных в нижней части прибора выходных клемм-индикаторов: с индикацией в двоичном коде и в текстовом (ASCII), в пошаговом (при нажатии кнопки STEP); циклическом (при нажатии кнопки (BURST) при заданной частоте (установка – нажатием кнопок в окнах (FREQUENCY); с прерыванием работы генератора в указанной ячейке (при нажатии кнопки BREAKPOINT). Кнопкой PATTERN вызывается меню, в котором можно задать необходимые манипуляции с содержимым ячеек. В процессе работы генератора в

отсеке ADDRESS индицируется номер текущей ячейки (CURRENT), ячейки начала работы (INITIAL) и конечной ячейки (FINAL). Генератор имеет внутренний (кнопкой INTERNAL) или внешний (кнопкой EXTERNAL) запуски. Последний осуществляется по переднему или заднему фронту (устанавливается кнопками режима запуска) сигнала синхронизации, поступающего на вход запуска. Сигнал с клеммы DATA READY сопровождает каждую выдаваемую на выход кодовую комбинацию.

3. Логический анализатор (*Logic Analyzer*) – 16-канальный анализатор логических уровней (рисунок 1.5). Прибор предназначен для визуального наблюдения логических уровней в шестнадцати точках схемы. Анализатор снабжен двумя визирными линейками, что позволяет получать точные отсчеты временных интервалов T1, T2 и T2-T1, а также линейкой прокрутки по горизонтали. В блоке Clock имеются клеммы для подключения как обычного (External),

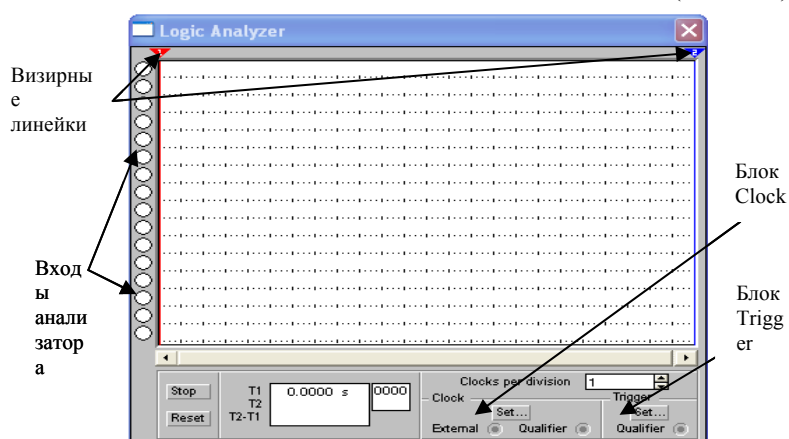


Рисунок 1.5 – Логический анализатор

так и избирательного (Qualifier) источника запускающих сигналов, параметры которых могут быть установлены с помощью меню, вызываемого кнопкой (Set). Дополнительные условия запуска анализатора могут быть выбраны с помощью диалогового окна, которое вызывается кнопкой Set в блоке Trigger.

4. Логический преобразователь (*Logic Converter*), показанный на рис.1.6, имеет: клеммы-индикаторы входов А, В,...,Н и один выход OUT; экран для отображения таблицы истинности исследуемой схемы; экран-строка для отображения ее булевого выражения.

Преобразователь используется для преобразования или нахождения таблицы истинности схемы, преобразования таблицы истинности в функцию алгебры логики, преобразования таблицы истинности в упрощенную логическую формулу, преобразования логической формулы в таблицу истинности, а также для преобразования логической формулы в логическую схему в базисе “И-ИЛИ-НЕ” либо в базисе “И-НЕ” и др.

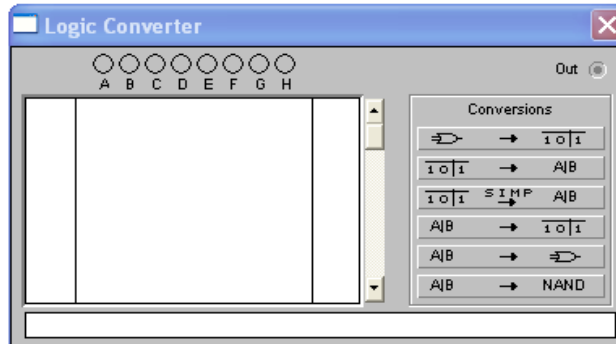


Рис.1.6 – Логический преобразователь

Для создания таблицы истинности требуется нажать кнопку мыши требуемое количество раз (до восьми) в кружках, обозначенных латинскими буквами “A, B, C, D, E, F, G и H”. При этом в поле значений входов появятся последовательные многоразрядные двоичные числа. Чтобы уменьшить число разрядов, следует также нажать левую кнопку мыши в кружках требуемых входов. После этого можно подвести курсор мыши к нужному разряду, нажать левую кнопку мыши, при этом логическое значение выделится квадратиком, и изменить значение на “1” или “0”.

После этого таблицу истинности можно преобразовать в логическую формулу или упрощенную логическую формулу, логическую формулу можно преобразовать в схему в базисе “И-ИЛИ-НЕ” или базисе “И-НЕ”, нажав левой кнопкой мыши на определенную кнопку логического преобразователя.

Для преобразования схем нужно подключить входы схем к входам логического преобразователя, а выход схемы – к выводу “OUT” логического преобразователя, после этого можно преобразовывать схему. Для этого надо подвести курсор мыши к

прибору, нажав и удерживая левую кнопку мыши, перетащить его в нужное место схемы.

5. Осциллограф (Oscilloscope) имеет два канала (CHANNEL) А и В с отдельной регулировкой чувствительности и регулировкой смещения по вертикали (Y POS) (рисунок 1.7).

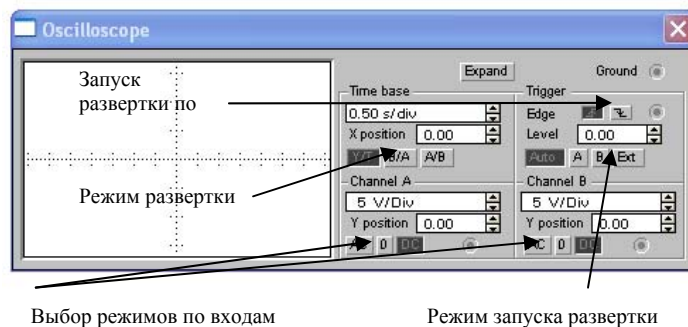


Рисунок 1.7. – Осциллограф

Выбор режима по входу обеспечивает: наблюдение сигналов переменного (AC) тока (режим «закрытого входа»); наблюдение сигналов как переменного, так и постоянного тока (DC) (режим «открытого входа»); замыкание входа на землю (режим 0).

Режим развертки обеспечивает следующие режимы развертки: Y/T – по вертикали напряжение сигнала, по горизонтали – время; B/A – по вертикали – сигнал B, по горизонтали – сигнал A; A/B – по вертикали – сигнал канала A, по горизонтали – сигнал B. В режиме Y/T устанавливается длительность развертки (TIME BASE) с возможностью смещения по горизонтали (X POS). Кроме того, предусмотрен также ждущий режим (TRIGGER) с запуском развертки (EDGE) по переднему или заднему фронту запускающего сигнала при регулируемом уровне (LEVEL) запуска, а также в режиме AUTO (от канала A или B), от канала A, от канала B или от внешнего источника (EXT), подключаемого к зажиму в блоке управления TRIGGER. Заземление осциллографа осуществляется с помощью клеммы GROUND.

При нажатии кнопки EXPAND лицевая панель меняется - увеличивается размер экрана, появляется возможность прокрутки изображения по горизонтали и его сканирования с помощью вертикальных визирных линий. При этом в индикаторных окошках

под экраном приводятся результаты измерений напряжения, временных интервалов и их приращений (между визирными линиями). Изображение можно инвертировать нажатием кнопки REVERSE и записать данные в файл (SAVE). Возврат к исходному состоянию осциллографа производится нажатием кнопки REDUCE.

6. Функциональный генератор (*Function Generator*) показан на рисунке 1.8. Возможны установить следующие формы выходного сигнала: синусоидальный, треугольный и прямоугольный. Частота сигнала задается в окне FREQUENCY, амплитуда – в окне AMPLITUDE, смещение – в окне OFFSET, коэффициент заполнения в процентах – в окне DUTY CYCLE. Сигнал подается на моделируемую схему через выходные зажимы «+», «-». Причем, при заземлении клеммы COM (общий) получаем на выходах парафазный сигнал.

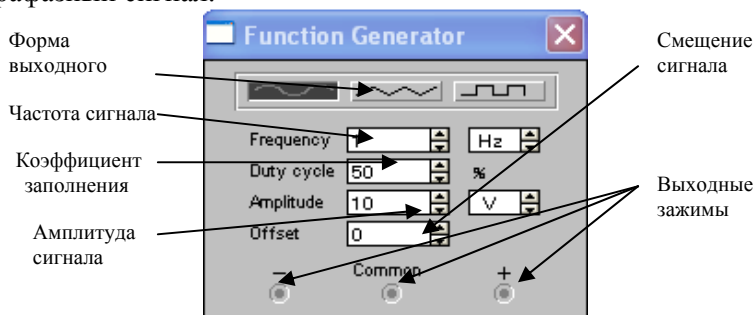


Рисунок 1.8. – Функциональный генератор

7. Измеритель АЧХ и ФЧХ (*Bode Plotter*), показанный на рис.1.9. предназначен для анализа амплитудно-частотных (кнопка MAGNITUDE включена) и фаза-частотных (при нажатой кнопке PHASE) характеристик при логарифмической (кнопка LOG) или линейной шкале по осям Y (VERTICAL) и X (HORIZONTAL). Выбор пределов измерения коэффициентов передачи и вариации частоты осуществляется с помощью кнопок в окошках F – максимальное и I – минимальное значение. Значение частоты и коэффициента передачи или фазы индицируются в окошках в правом нижнем углу. Значения указанных величин можно получить с помощью вертикальной визирной линейки. Подключение прибора к исследуемой схеме осуществляется с помощью зажимов IN (вход) и OUT (выход). Левые клеммы зажимов подключаются ко

входу и выходу исследуемого устройства, а правые – к общей шине. Ко входу устройства нужно подключить функциональный генератор или другой источник переменного напряжения.

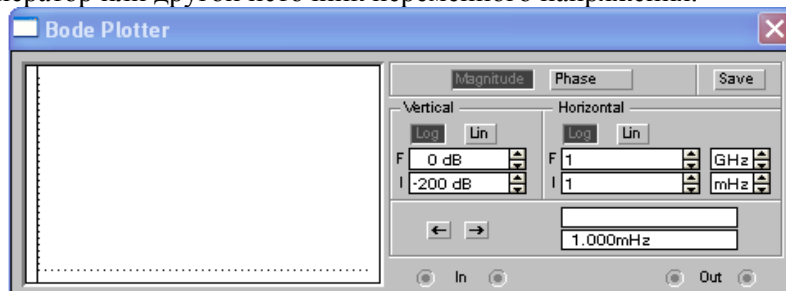


Рисунок 1.9. – Измеритель АЧХ и ФЧХ

2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться по данным методическим указаниям с правилами работы и основными базовыми элементами программы «Электронная лаборатория».
2. Запустить программу в среде «Windows».
3. Просмотреть состав и научиться работать со всеми компонентами программы.
4. Нарисовать схему, заданную преподавателем, и выполнить ее анализ, используя средства программы «Электронная лаборатория».
5. Сделать выводы по работе, в которых отразить особенности анализа схем при помощи программы «Электронная лаборатория».

3. Содержание отчета

Наименование и цель работы, краткая характеристика программы «Электронная лаборатория», перечень основных элементов анализа программы с кратким их описанием, схема заданная преподавателем (построенная средствами программы «Электронная лаборатория»), ответы на заданные преподавателем контрольные вопросы, выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Назначение программы «Электронная лаборатория».
2. Для чего служит логический анализатор в программе?
3. Назначение мультиметра в программе.
4. Выделите особенности логического преобразователя.
5. Назначение осциллографа.
6. Для чего служит генератор слова?
7. Назначение измерителя АЧХ и ФЧХ.
8. Опишите процедуру создания блока пользователя.
9. Охарактеризуйте основные элементы управления программой.
10. В чем заключаются особенности создания схем при помощи программы «Электронная лаборатория»?

Лабораторная работа № 2

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Ц е л ь р а б о т ы. Изучить принципы работы полупроводниковых диодов, их назначение, основные параметры.

1. Краткие сведения из теории Основы принципов работы диодов

Принцип действия полупроводниковых диодов основан на свойствах контакта двух кристаллов с различными типами проводимости: *p*-дырочной и *n*-электронной. Первый получается путем легирования полупроводника акцепторной примесью, второй – легированием полупроводника донорной примесью. В месте контакта кристаллов [2] образуется узкая область, называемая *p-n* переходом. В *p*-области концентрация дырок (основных носителей зарядов) значительно превышает концентрацию электронов (неосновных носителей). В *n*-области, наоборот, концентрация электронов (основных носителей зарядов) выше концентрации дырок (неосновных носителей). Эти большие градиенты концентраций электронов и дырок вызывают диффузионные потоки (токи) дырок из *p*-области в *n*-область, а электронов из *n*-области в *p*-область. Когда дырки диффундируют из *p*- области, в ней остается равное число отрицательных неподвижных ионов акцепторной примеси. Аналогично, когда электроны диффундируют из *n*-области в ней остаются положительные неподвижные ионы донорной примеси. Эти прилегающие к переходу области, содержащие неподвижные заряды, образуют область пространственного (объемного) заряда, потенциальный барьер. В результате чего возникает электрическое поле, препятствующее диффузионному току и способствующее движению неосновных носителей заряда – дрейфовому току. Дрейфовый ток направлен встречно диффузионному. Когда суммарный ток становится равным нулю, наступает динамическое равновесие. Нужно сказать, что диффузия и дрейф происходит

только вблизи перехода, а вдали от него, p - и n -области нейтральны и однородны.

Если к p - n переходу приложить внешнее напряжение таким образом, чтобы p -область стала положительной по отношению к n -области, то все приложенное напряжение в основном падает на область объемного заряда. Внешнее напряжение уменьшает электрическое поле в области объемного заряда относительно значения, соответствующего равновесию. Баланс между диффузией и дрейфом носителей заряда нарушается и начинает преобладать диффузионная составляющая. Требуется довольно небольшое напряжение (меньше 1 В), чтобы получить большие токи. Такая полярность напряжения соответствует *прямому напряжению* или *прямому смещению*. При прямом смещении концентрация неосновных носителей вблизи перехода сильно возрастают, это увеличение концентрации вследствие диффузии называется *инжекцией неосновных носителей*.

Когда к p - n переходу приложено напряжение обратной полярности - *обратное смещение*, то оно также почти целиком прикладывается к области объемного заряда и изменяет электрическое поле. Однако в этом случае напряжение увеличивает поле объемного заряда и препятствует диффузии основных носителей. Перенос зарядов за счет диффузии фактически прекращается, а поле вытягивает неосновные носители из соответствующих нейтральных областей и заставляет их дрейфовать через область объемного заряда. Данный отрицательный ток через переход называется *обратным током*. При обратном смещении, при котором прекращается диффузия (обычно это доли вольта), ток перестает зависеть от дальнейшего увеличения напряжения. Так как концентрация неосновных носителей на много порядков меньше концентрации основных носителей, то обратный ток будет во много раз меньше, чем ток при прямом смещении. Тем самым электронно-дырочный переход обладает выпрямляющими свойствами: он гораздо лучше пропускает ток в одном направлении, чем в другом.

Вольтамперная характеристика p - n перехода описывается выражением [2]:

$$I = I_0 [\exp(U/U_t) - 1],$$

где I -ток через переход при напряжении U , I_0 – обратный ток, U_t – температурный потенциал, равный при комнатной температуре 26 мВ.

Если к переходу подключить обратное напряжение, то при определенном значении переход пробивается. Различают три вида пробоя: *туннельный*, *лавинный* и *тепловой*. 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. При этом ток будет ограничиваться только внешним сопротивлением. Явление пробоя находит практическое применение в *стабилитронах* – приборах, предназначенных для стабилизации напряжения. В основе теплового пробоя лежит саморазогрев перехода при протекании обратного тока, что может привести к разрушению этого перехода. Тепловой пробой не имеет самостоятельного значения, он может начаться лишь в результате лавинного или туннельного пробоя.

При контакте с полупроводниками некоторых металлов, вблизи границы металл – полупроводник в полупроводнике возникает слой объемного заряда. Данный переход является также выпрямляющим, и называется *барьером Шоттки*. Барьер Шоттки нашел применение в *диодах Шоттки*, отличающихся малым уровнем шумов и высоким быстродействием.

Для изготовления диодов используют германий, кремний, соединения галлия. Диоды представляют собой большой класс полупроводниковых приборов включающий: диоды выпрямительные, универсальные, импульсные; выпрямительные столбы и блоки; диоды сверхвысокочастотные; варикапы; диоды

туннельные и туннельные обращенные; диоды излучающие; генераторы шума; диоды Ганна; стабилизаторы тока; стабилитроны и стабисторы; динисторы, тринисторы и симметричные динисторы и тринисторы и др.

Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока низкой частоты (обычно до 50 кГц). Основные параметры: постоянное прямое $U_{пр}$ и обратное $U_{обр}$ напряжение, постоянный прямой $I_{пр}$ и обратный $I_{обр}$ ток, средний (за период) прямой $I_{пр.ср}$ и обратный $I_{обр.ср}$ ток, средняя рассеиваемая мощность $P_{ср}$, максимально допустимые: постоянное обратное напряжение $U_{обр.мах}$; постоянный прямой ток $I_{пр.мах}$; средний выпрямленный ток $I_{вып. ср.мах}$; средний прямой ток $I_{пр.ср.мах}$.

Высокочастотные диоды – приборы универсального назначения – для выпрямления токов с частотой до 10 кГц, модуляции. Детектирования сигналов и других нелинейных преобразований.

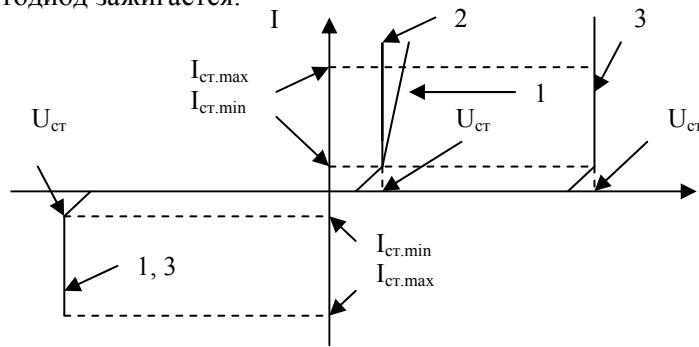
Стабилитроны и стабисторы (рис. 2.1) предназначены для стабилизации уровня напряжения при изменении протекающего через них тока. У стабилитронов рабочей является обратная ветвь, у стабисторов – прямая, а двуханодных стабилитронов – обе ветви.

Варикап – диод, емкость которого можно изменять в широких пределах путем приложения обратного напряжения. Варикапы используют в устройствах автоподстройки частоты, генераторах. Варикап, предназначенный для умножения частоты сигнала. Называется варактором.

Вольт - амперная характеристика *туннельного диода* содержит участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (отношением приращения напряжения к приращению тока). Данный диод используют в усилителях и генераторах, импульсных устройствах.

В *светодиоде* предусмотрена возможность вывода светового излучения из области перехода сквозь прозрачное окно в корпусе. При прохождении через диод тока в прилегающих к переходу областях полупроводника происходит интенсивная рекомбинация носителей зарядов – электронов и дырок. Часть освобождающейся энергии выделяется в виде квантов света. Излучение может иметь длину волны либо в области видимого света (от красного до голубого), либо невидимого – инфракрасного. Важнейшими параметрами светодиода является яркость, измеряемая в нитах при

определенном значении прямого тока, и цвет свечения. Для светодиода дополнительно указывается минимальный ток в прямом направлении Turn-on-current (I_{on}), при превышении которого светодиод загорается.



1-характеристика стабилитрона; 2-характеристика стабистора; 3-характеристика двуханодного стабилитрона

Рисунок 2.1 – Вольт - амперная характеристики стабилитрона и стабистора

Фотодиод чувствителен к падающему на него излучению. При этом чем оно сильнее, тем больше обратный ток через диод. Используется в фототехнике, датчиках частоты вращения и т.д.

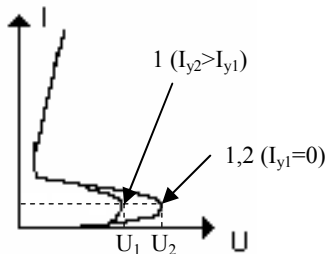


Рис 2.2. Вольт – амперная характеристики тристора-1 и динистора-2

называют динисторами, а приборы с третьим выводом (от одного из средних электродов) тристорами. Кроме того, к классу тиристоров относятся симисторы – симметричные динисторы (диаки), симметричные тринисторы (триаки) и достаточно редкий тип динистора – диод Шокли. На рис. 2.2 показаны характеристики

Магнитодиод – прибор, реагирующий на изменение внешнего магнитного поля. При этом изменяется прямое напряжение на диоде. Магнитодиод может быть использован в бесконтактных датчиках положения, частоты вращения.

Переключающие диоды с p-n-p-n и n-p-n-p структурами – это тиристоры. Тиристоры, имеющие выводы от крайних электродов,

поясняющие работу переключающих диодов. Так диностор при достижении напряжения значения U_2 переключается в открытое состояние, как и тринистор при управляющем токе (токе на третьем выводе) $I_{y1}=0$. На рисунках условно показано, что характеристики диностора и тринистора при $I_{y1}=0$ совпадают. Подачей управляющего тока на тринистор, можно регулировать напряжение переключения прибора в открытое состояние U_1 при I_{y2} . При I_y равным току, называемому током спрямления, характеристика тиристора совпадает с прямой характеристикой диода.

На рис.2.3 показаны обозначения в программе EWB 5.12: (слева направо) диод Шокли, тринистор, диак, симмистор.

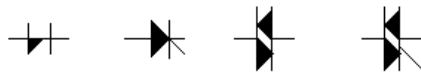


Рисунок 2.3 – Переключающие диоды

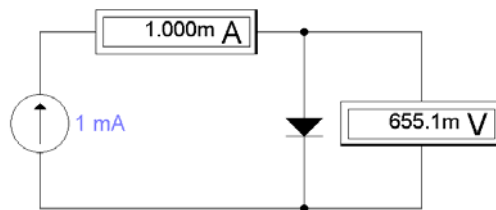


Рисунок 2.4. – Схема для исследования ВАХ прямой ветви диода

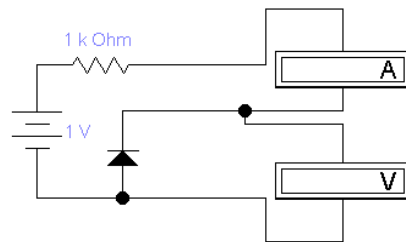


Рисунок 2.5. – Схема для исследования ВАХ обратной ветви диода

по схеме на рис. 2.7. Измерение ВАХ проводится при изменении U от 0 до 35 В.

2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с принципами работы полупроводниковых диодов.
2. Провести исследование характеристики диода с помощью схемы на рисунке 2.4. Измерение ВАХ проводится при изменении I от 1 до 100 мА.
3. Провести исследование ВАХ с помощью характериографа, показанного на рис. 2.5.
4. Провести исследование обратной ВАХ диода с помощью схемы, показанной на рис.2.6.
5. Провести исследование стабилитрона с помо-

6. Провести исследование схемы на рис 2.8. Измерение ВАХ проводится при изменении U от 0 до 15 В.

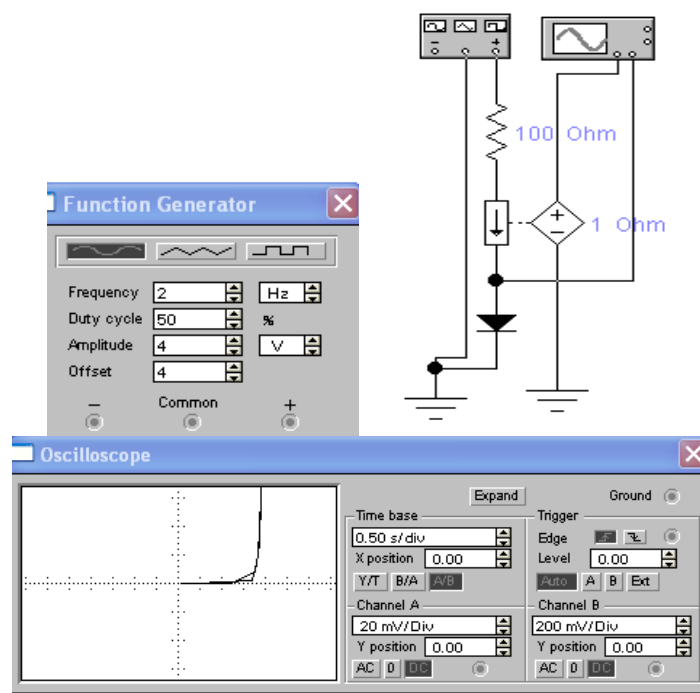


Рисунок 2.6 – Схема характериографа и полученная на нем ВАХ диода

7. Провести исследование ВАХ диода Шокли с помощью схемы на рис. 2.9. Измерения проводить при изменении U в диапазоне от 0 до 110 В и затем от 110 В до 0 В.

8. Провести исследование ВАХ тринистора с помощью схемы на рис. 2.10. Измерения проводить при изменении U от 0 до 210 В и затем от 210 В до 0 В при фиксированных значениях V_i : 0 В; 5 В; 10 В; 15 В.

9. Провести по аналогии исследования ВАХ диода и симмистора.

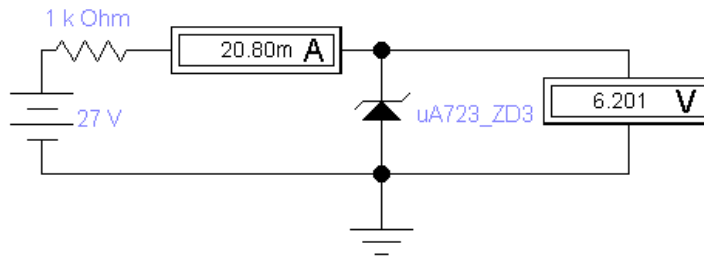


Рисунок 2.7 – Схема для исследования ВАХ стабилитрона.

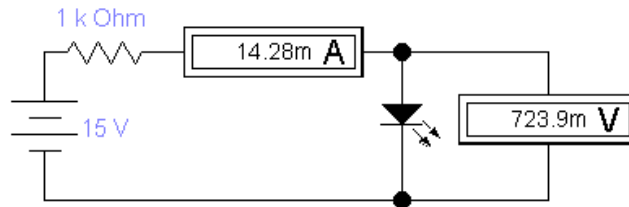


Рисунок 2.8. – Схема для исследования ВАХ светодиода.

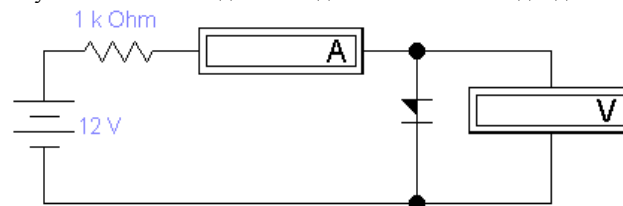


Рисунок 2.9. – Схема для исследования ВАХ диода Шокли.

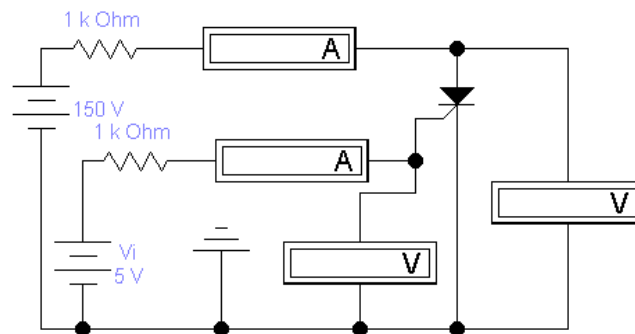


Рисунок 2.10. – Схема для исследования ВАХ транистора.

3. Содержание отчета

Наименование и цель работы; краткие сведения из теории; построенные ВАХ характеристики исследуемых полупроводниковых приборов, приведенные вместе со схемами для исследования, выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Как устроен полупроводниковый диод?
2. Какие типы $p-n$ переходов Вы знаете?
3. Какой формулой описывается ВАХ $p-n$ перехода?
4. Назовите и кратко охарактеризуйте типы полупроводниковых диодов.
5. Назовите типы пробоев $p-n$ перехода и дайте их краткую характеристику.
6. Назовите типы и особенности переключающих диодов.
7. По результатам исследований поясните следующие параметры для переключающих диодов:
 - напряжение, при котором они переключаются в открытое состояние;
 - падение напряжения в открытом состоянии;
 - ток в открытом состоянии;
 - минимальный ток в открытом состоянии (если он меньше установленного, то прибор переходит в закрытое состояние);
 - напряжение на управляющем электроде открытого тринистора (симмистора);
 - ток управляющего электрода;
 - отпирающее напряжение на управляющем электроде.

Лабораторная работа №3

ТРАНЗИСТОРЫ

Ц е л ь р а б о т ы. Изучить принципы работы транзисторов, их назначение, основные параметры.

1. Краткие сведения из теории Основы принципов работы транзисторов

Различают два типа транзисторов [3]: биполярные и униполярные (полевые). В биполярных транзисторах используются два типа основных носителей электроны и дырки. В униполярных – один (электроны или дырки). Биполярный транзистор – полупроводниковый элемент с тремя электродами, который служит для усиления или переключения сигнала. Различают кремниевые и германиевые транзисторы. Они бывают $p-n-p$ и $n-p-n$ типа. На рис. 3.1 показаны их условные обозначения и основные схемы включения: с общей базой (ОБ) и с общим коллектором (ОК) транзистора $p-n-p$ типа; с общим эмиттером транзистора $n-p-n$ типа.

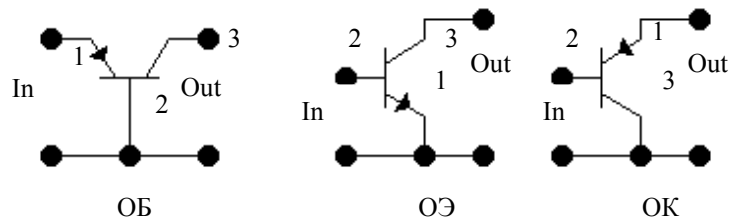


Рисунок 3.1 – Основные схемы включения биполярных транзисторов
(1 – эмиттер; 2 – база; 3 – коллектор)

На рис. 3.2 показана структура типичного $n-p-n$ биполярного транзистора, имеющего два $p-n$ перехода, между которыми находится область базы. Принцип действия биполярного транзистора как управляющего элемента основан на сочетании процесса *инжекции* носителей через один $p-n$ переход и *собираения* их на другом $p-n$ переходе. При работе транзистора в режиме

усиления эмиттерный переход смещается в прямом направлении, а коллекторный переход – в обратном. При прямом смещении на эмиттерном переходе число неосновных носителей (электронов в транзисторе $n-p-n$ типа) в базе около этого перехода сильно возрастает. Концентрация электронов около смещенного в обратном направлении коллекторного перехода со стороны базы, до тех пор пока инжектированные электроны не достигли этого перехода, очень мала. Такая комбинация двух $p-n$ переходов, смещенных в противоположных направлениях, создает большой *градиент концентрации* неосновных носителей в области базы. Вследствие теплового движения в базе образуется диффузионный

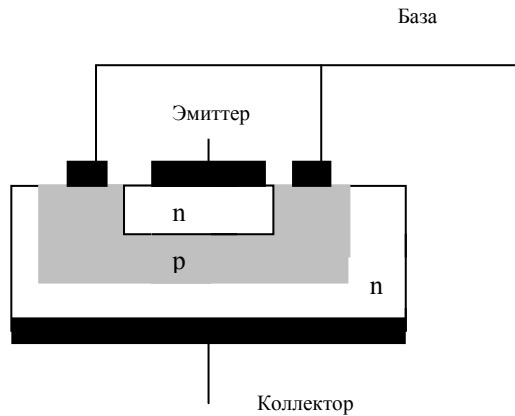


Рисунок 3.2 – Структура биполярного транзистора

поток неосновных носителей от эмиттерного перехода, где они в избытке, к коллекторному переходу и далее в область коллектора (см. рис. 3.3.). Почти все инжектированные в базу электроны достигают коллектора. Однако незначительное их число рекомбинирует с дырками в базе. Для компенсации дырок, убывающих в результате реком-

бинации, а также вследствие инжекции их из области базы в область эмиттера, некоторое количество дырок должно поступать в базу через базовый вывод. 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).

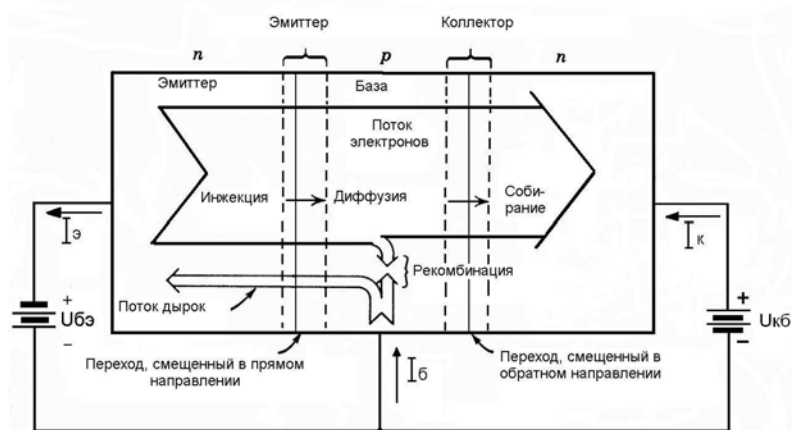


Рисунок 3.3 – Потoki электронов и дырок в транзисторе $n-p-n$ типа, работающем в режиме усиления.

На рис.3.4. показано включение транзистора по схеме с ОЭ. При этом возможны три режима работы транзистора. При работе в режиме усиления эмиттерный переход смещается в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. Два других режима имеют место, когда эмиттерный переход не смещен в прямом направлении или коллекторный переход не смещен в обратном направлении. Первый из них называется режимом отсечки, а второй – режимом насыщения.

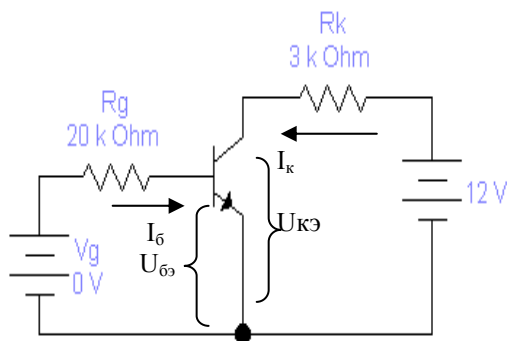


Рисунок 3.4 – Включение транзистора по схеме с общим эмиттером

Если напряжение между базой и эмиттером ($U_{бэ}$) меньше пороговой величины (0,6 В для кремния), заметной инжекции в базу не происходит. При этом токи базы, коллектора и эмиттера равны нулю. Это и есть режим отсечки, который определяется одним из соотношений: ($U_{бэ}$) < 0,6 В или $I_б=0$.

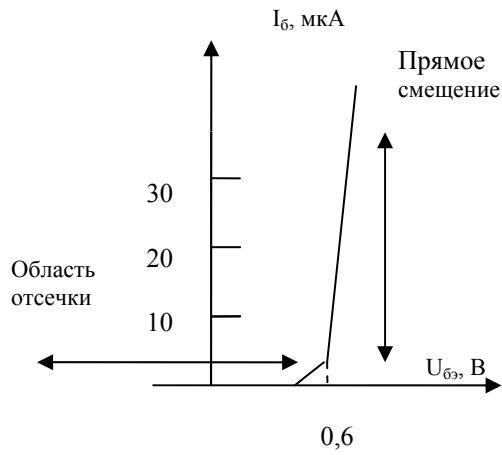


Рисунок 3.5 – Входная характеристика транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Если коллекторный переход не смещен в обратном направлении, то носители будут инжектироваться в базу не только из эмиттера, но также и из коллектора. Это и есть режим насыщения, при котором токи транзистора определяются внешней цепью. Условия работы транзистора в режиме усиления:

$I_b > 0$ и $U_{кэ} > U_{кэ\text{нас}}$ (где $U_{кэ\text{нас}}$ – напряжение насыщения указывается в паспорте транзистора).

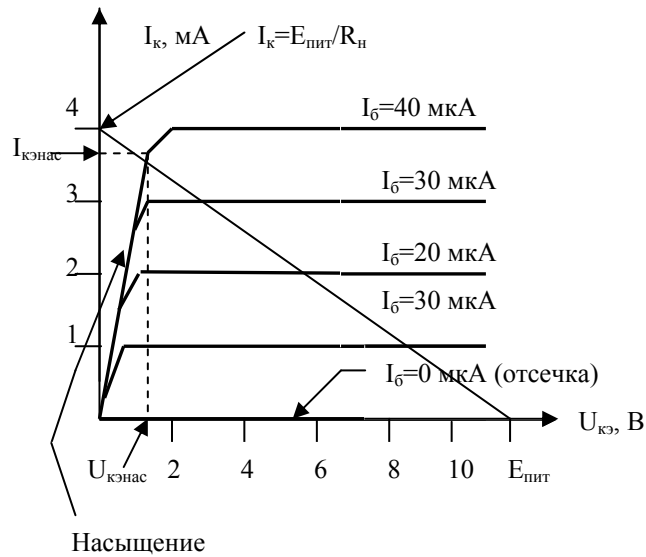


Рисунок 3.6 – Выходная характеристика транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

На рис. 3.5, рис. 3.6 показаны ВАХ транзистора включенного по схеме с ОЭ и показаны области отсечки, насыщения и усиления. Для биполярного транзистора справедливы следующие соотношения: $I_k = I_3 \alpha$ (α – коэффициент передачи тока в схеме с ОБ); $I_k = I_6 \beta_f$ (β_f – коэффициент усиления тока в схеме с ОЭ); $\beta_f = \alpha / (1 - \alpha)$; $I_3 = I_6 + I_k$, где I_3 , I_k , I_6 – соответственно, эмиттерный, коллекторный и базовый токи. Входная характеристика имеет вид, аналогичная характеристике диода. На выходной характеристике показана линия выходной нагрузки. Она пересекается с осями в следующих точках: $U_{кэ} = E_{пит}$ (12 В) при $I_k = 0$ – режим отсечки; $I_k = E_{пит} / R_k$ при $U_{кэ} = 0$. Режим насыщения соответствует рабочей точке: $I_k = I_{кэнас}$, $U_{кэ} = U_{кэнас}$, где: $I_{кэнас}$, $U_{кэнас}$, соответственно, ток и напряжение насыщения. В усилителях рабочая точка выбирается из условия, чтобы во всем диапазоне изменения входного сигнала транзистор работал в режиме усиления. Это обеспечивается цепью смещения базы.

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

Основным [2] способом движения носителей в полевых транзисторах является дрейф в электрическом поле. Различают следующие типы полевых транзисторов: полевые транзисторы с управляющим $p-n$ переходом n -канальные (рис.3.7ж), p -канальные (рис.3.7а) и МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) транзисторы: со встроенным каналом n -типа (рис.3.7б,д), со встроенным каналом p -типа (рис. 3.7с,е); с индуцированным каналом n -типа (рис.3.7з, л), с индуцированным каналом p -типа (рис.3.7к,м). В частности, если в МДП-транзисторах диэлектриком является окисел (двуокись кремния), используется название МОП-транзисторы.

На рис.3.8 схематически изображена структура полевого транзистора. Основная часть, сделанная из полупроводника n -типа называется *каналом*, а выводы от двух его торцов носят названия *исток* и *сток*. Затемненная область представляет собой полупроводник p -типа и называется *затвором*. На границе раздела двух областей образуется $p-n$ переход. Если отрицательное напряжение подается на затвор транзистора, то область пространственного заряда проникает в глубь канала, при этом сужается сечение той части, в которой находятся свободные

носители заряда. Тем самым, изменяя величину отрицательного напряжения на затворе, можно управлять проводимостью канала между его истоком и стоком. Максимальная проводимость достигается при напряжении между затвором и истоком $U_{зи}=0$, так как глубина проникновения обедненного слоя в этом случае минимальна, а сечение проводящей части канала максимально. При некоторой величине напряжения на затворе обедненный слой проникает на всю толщину канала, полностью перекрывая его, что

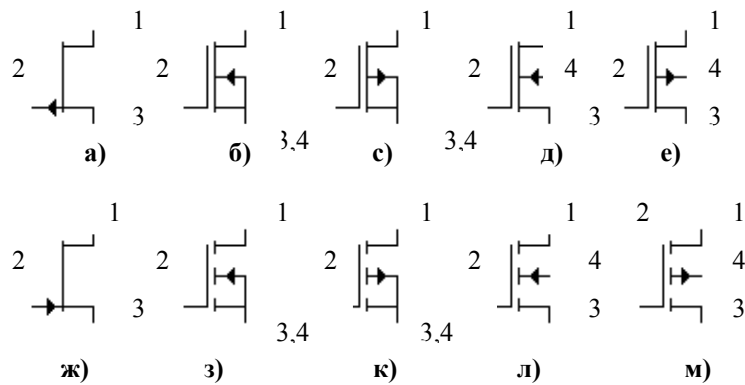


Рисунок 3.7 – Условные изображения полевых транзисторов в схемах: 1- сток, 2 – затвор, 3 – исток, 4 - подложка

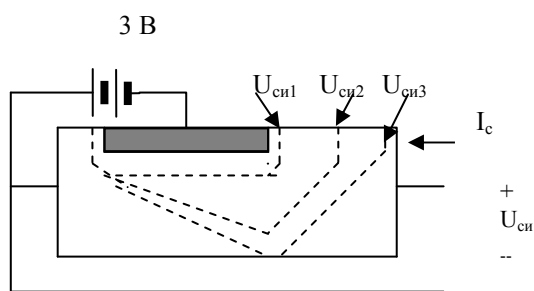


Рисунок 3.8.- Структура транзистора с $p-n$ переходом и каналом n -типа

величине сравнимо или больше $V_{отс}$, оно приводит к более

приводит к снижению проводимости до нуля. Напряжение $U_{зи}$, при котором наступает этот эффект, называется *напряжением отсечки* – $V_{отс}$. В случае, когда напряжение между стоком и истоком $U_{си}$ по величине сравнимо или больше $V_{отс}$, оно приводит к более

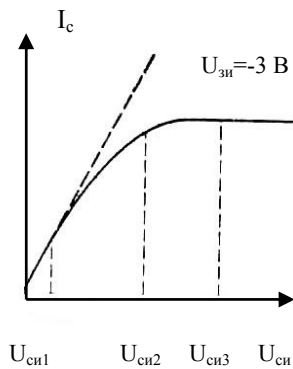


Рисунок 3.9. – Выходная ВАХ.

наблюдается эффект отсечки, то ток стока I_c , несмотря на дальнейшее повышение $U_{си}$, больше не возрастает (рис. 3.9). По характеристикам $I_c=f(U_{си})$ (рис.3.10) можно определить крутизну $S=dI_c/dU_{зи}$ транзистора.

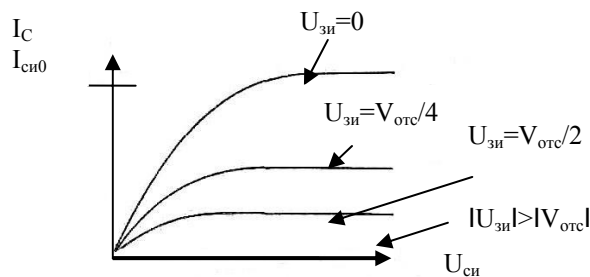


Рисунок 3.10 – Семейство выходных ВАХ ($I_{си0}$ определяется как предельный ток стока при $U_{зи}=0$)

МДП-транзистор представляет собой структуру, содержащую сток и исток, выполненные из сильно легированных областей (обозначены $n+$), чем канал и подложки. Металлический электрод затвора отделен от проводящего канала тонким слоем диэлектрика (рис. 3.11). Такая структура называется *полевым транзистором с изолированным затвором* или *МДП- транзистором со встроенным каналом*. Конструкция затвор-диэлектрик-канал представляет

глубокому проникновению обедненного на том конце структуры, где расположен сток. Поэтому дальнейшее увеличение $U_{си}$ ведет к сужению сечения проводящей части канала и является причиной того, что характеристики отличаются от линейного закона, справедливого при малых значениях $U_{си}$. Когда напряжение $U_{си}$ достигает величины, при которой у стокового конца канала

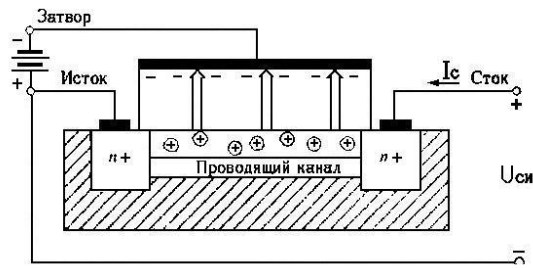


Рисунок 3.11 – МДП-транзистор, работающий в режиме обеднения.

зается обедненный слой, появляющийся вследствие ухода из него свободных электронов. Плотность заряда и ширина обедненного слоя зависят от напряжения $U_{зи}$, что и обуславливает механизм модуляции проводимости между истоком и стоком. При достаточно большом отрицательном напряжении $U_{зи}$ весь канал перекрывается обедненным слоем, что приводит к эффекту отсечки.

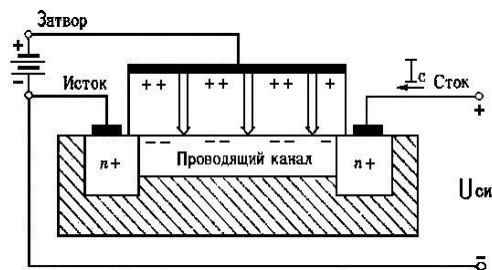


Рисунок 3.12 – МДП-транзистор, работающий в режиме обогащения

канале у поверхности раздела с диэлектриком появляется отрицательный заряд. Этот заряд подвижен; он увеличивает число носителей заряда по сравнению с равновесной концентрацией свободных электронов, заряд которых компенсируется зарядом неподвижных положительных ионов атомов примеси. Появление избыточных электронов приводит к увеличению проводимости канала. Тем самым проводимость управляется напряжением на затворе. Такой режим работы транзистора, при котором в приповерхностном слое канала концентрация носителей выше

собой плоский конденсатор. При подаче отрицательного напряжения на затвор (рис.3.11.) металлический электрод заряжается отрицательно и одновременно у прилегающей к диэлектрику поверхности канала образ-

Диелектрический слой препятствует прохождению тока затвора для любой полярности $U_{зи}$. Если приложить к затвору положительное напряжение (рис.3.12), то поверхность металлического электрода заряжается положительно, а в

равновесной, называется *режимом обогащения*. Выходные ВАХ транзистора показаны на рис.3.13.

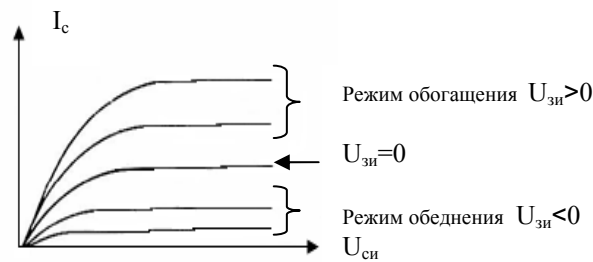


Рисунок 3.13 – Выходные ВАХ МДП-транзистора со встроенным каналом *n*-типа в режимах обеднения и обогащения.

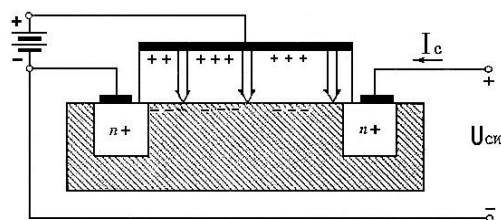


Рисунок 3.14.- МДП-транзистор с индуцированным каналом

В МДП-транзисторе с индуцированным каналом (рис.3.14) при $U_{зи}=0$ между стоком и истоком течет ток очень малой величины, так как один из *p-n⁺* обязательно смещен в обратном направлении. При

положительном напряжении $U_{зи}$, превышающем некоторую пороговую величину $V_{пор}$, в приповерхностном слое подложки *p*-типа из сильнолегированной области истока к стоку начинается движение электронов. Этот слой, называется *слоем инверсной проводимости*, представляет собой *индуцированный канал*, который ничем не отличается от встроенного канала. Поскольку в рассматриваемом транзисторе индуцированный канал появляется лишь при положительном напряжении на затворе, то работа прибора ограничивается режимом обогащения. Выходные характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом показаны на рис. 3.15. В МДП-транзисторах изменением

проводимости можно управлять также путем изменения напряжения на подложке. Для МДП-транзисторов определяют следующие параметры: крутизна – $S = dI_c/dU_{зи}$; крутизна при

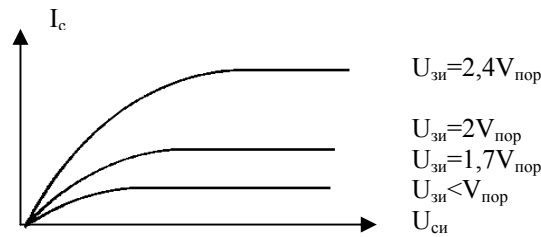


Рисунок 3.15 – Выходные характеристики транзистора

управлении со стороны подложки – $S_b = dI_c/dU_{пи}$; статический коэффициент усиления – $M = dU_{си}/dU_{зи}$, где $U_{пи}$ – напряжение подложка исток; I_c – ток стока; $U_{си}$ – напряжение сток исток; $U_{зи}$ – напряжение затвор исток.

2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с принципами работы полупроводниковых транзисторов.

2. С помощью схемы на рис. 3.16 получите семейство входных характеристик при значениях $U_{кб} = 0, 5$ и 10 В. Семейство входных ВАХ $I_c = f(U_{эб})$ снимается при фиксированных значениях $U_{кб}$ путем измерения тока I_c и измерения $U_{эб}$.

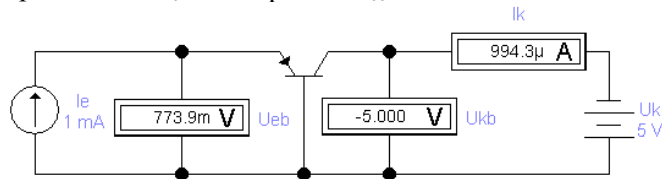


Рисунок 3.16 – Схема для исследования ВАХ биполярного транзистора.

3. С помощью схемы на рис. 3.16 получите семейство выходных характеристик при $I_c = 1, 5$ и 10 мА. Семейство выходных

ВАХ $I_k=f(U_{kb})$ снимается при фиксированных значениях I_e путем изменения U_{kb} и измерения I_k .

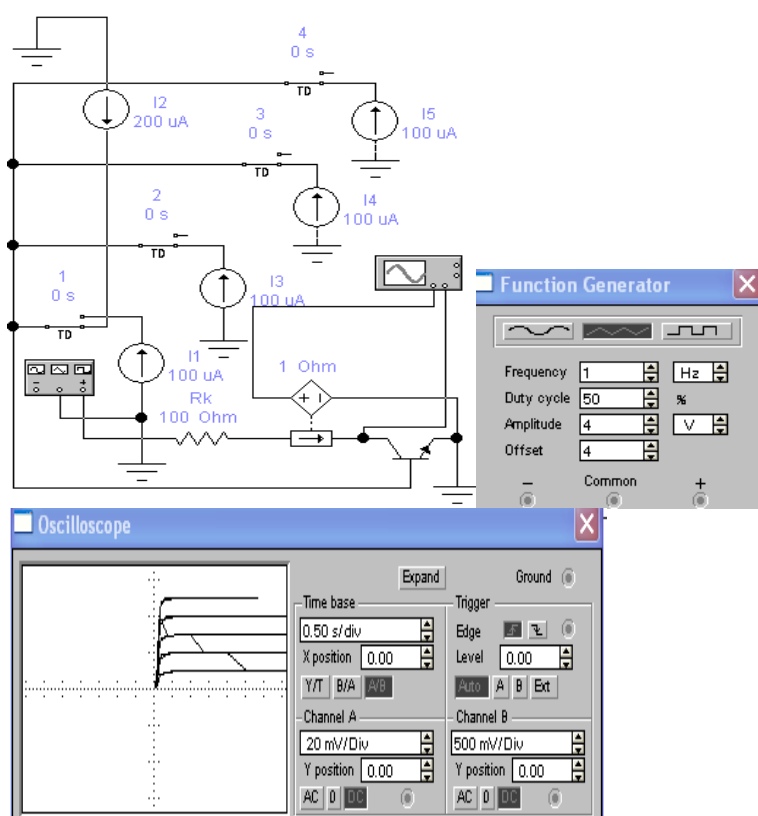


Рисунок 3.17 – Схема для исследования ВАХ биполярного транзистора

4. Собрать схему характерографа для исследования выходных ВАХ транзисторов (рис. 3.17). В схеме ток базы задается источниками постоянного тока $I_1 \dots I_5$, подключаемых к базе исследуемого транзистора с помощью программно управляемых 1...4 клавиш (рис.3.17), для которых время включения выбрано одинаковым и равным нулю ($T_{ON}=0$), а время выключения $T_{OFF}=1, 2, 3,$ и 4 с соответственно. Базовый ток равен сумме токов источников, выбранных переключателями

через 1 с в следующей последовательности: I1 (в момент $t=0$ – начало моделирования все переключатели переводятся в положение, противоположное показанному на рис. 3.17), I2, I2+I3, I2+I3+I4, I2+I3+I4+I5. Указанный временной интервал выбран из условия синхронизации момента подключения очередного источника тока к базе транзистора с началом максимально возможного периода 1 с (частота 1 Гц) следования треугольных импульсов с функционального генератора, используемого в качестве источника испытательного напряжения (режимы работы генератора показаны на рисунках). При этом амплитуда импульсов выбирается из условия, при котором ее двойное значение было больше падения напряжения $\beta I_{б \text{ макс}} R_k$, где β – коэффициент усиления тока в схеме с ОЭ ($\beta=100$), $I_{б \text{ макс}} = 500 \text{ мкА}$ – максимальный ток базы. Следовательно для схемы на рис. 3.17 амплитуда сигналов должна быть выбрана более 2,5 В (выбрано 3). Формирование ВАХ осуществляется в режиме развертки A/B, т.е. сигнал в канале A (падение напряжения на резисторе R_k) разворачивается по оси X сигналом, поступающим с коллектора транзистора. Провести исследование характеристик транзистора на данных характеристиках и полученные осциллограммы, привести в отчетах.

5. С помощью схемы на рис. 3.18, получите семейство выходных характеристик полевого транзистора при $U_g = -1, -0,5, 0, +1, +2, +5 \text{ В}$. По этим характеристикам определите напряжение отсечки и крутизну выходной характеристики в начальной области и при эффекте отсечки.

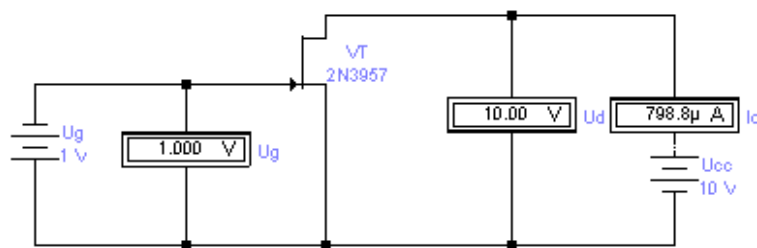


Рисунок 3.18 – Схема для исследования ВАХ полевого транзистора с управляющим $p-n$ переходом.

6. С помощью схемы на рис.3.19 снимите семейство выходных характеристик МДП-транзистора при изменении U_g и U_b в диапазоне от -5 до +5В и по ним определите S , S_b , M .

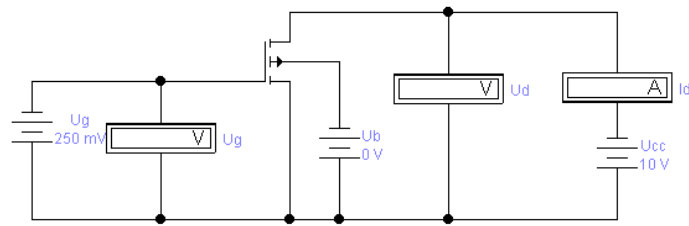


Рисунок 3.19 – Схема для исследования характеристик МДП-транзисторов.

3. Содержание отчета

Наименование и цель работы; краткие сведения из теории; построенные ВАХ характеристики исследуемых полупроводниковых приборов, приведенные вместе со схемами для исследования; полученные осциллограммы; определенные по ВАХ параметры транзисторов; выводы по работе.

4. Контрольные вопросы

1. Какие схемы включения транзисторов вы знаете?
2. Перечислите параметры транзисторов.
3. Какие бывают биполярные транзисторы?
4. Назовите три режима работы биполярного транзистора.
5. Как работает биполярный транзистор?
6. Чем отличаются униполярные, полевые и каналные транзисторы?
7. Как устроен полевой транзистор с $p-n$ переходом?
8. Чем отличаются МДП и МОП транзисторы?
9. Как работают МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналом?
10. Какую роль играет подложка в МДП-транзисторах?
11. Что такое пороговое напряжение и напряжение отсечки?

Лабораторная работа №4

ЦИФРОВЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Ц е л ь р а б о т ы. Изучить принципы работы интегральных микросхем, выполненных по ТТЛ- и КМОП- технологиям (ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика с использованием биполярных транзисторов, КМОП – с использованием комплементарных МОП-транзисторов), их назначение, основные параметры.

1. Краткие сведения из теории

Основы принципов работы цифровых микросхем

В зависимости от технологии изготовления интегральные микросхемы (ИМС) подразделяются на серии (семейства), различающиеся физическими параметрами базовых элементов и их функциональным назначением. Наибольшее распространение получили ИМС, изготавливаемые по ТТЛ- и КМОП- технологиям.

Первой была выпущена ТТЛ-серия SN74/SN54 (74 – коммерческая, 54 – для военных применений). Отечественным аналогом серии SN74 стала популярная в свое время серия 155. В 1967 г. дополнительно разработаны семейства SN74Н/54Н (быстродействующая, отечественные аналоги – серии 131 и 130) и SN74L/54L (маломощная, аналоги – серии 158 и 136). В 1969 г. разработана серия SN74LS/54LS (серии 555 и 533), в 1979 г. – серия SN74F/54F (серия 1531), в 1980 г. – серия SN74ALS/54ALS (серия 1533), в 1982 г. – серия SN74AS/54AS. Использование диодов с барьером Шоттки позволило значительно повысить быстродействие ИМС за счет предотвращения глубокого насыщения транзисторов в ключевом режиме.

Цифровые ИМС по КМОП-технологии разработаны фирмой RCA в 1968 г. Эта серия имела название CD4000 (отечественные аналоги - серии 164 и 176), затем последовали серии CD4000А, CD4000В (отечественные аналоги – 564, 561 и 1561), а также MC14000А и MC14000В и 54НС (отечественный аналог – серия 1564). Цифровые ИМС КМОП-серии получили название от своего базового элемента, в котором используется так называемая

комплементарная пара из двух МОП-транзисторов различной проводимости. Такие ИМС характеризуются: малым потреблением мощности в статическом режиме (0,02...1 мкВт на вентиль); большим диапазоном питающих напряжений (3...18 В); высоким входным сопротивлением (до десятков Том); большой нагрузочной способностью; незначительной зависимостью характеристик от температуры; малыми размерами транзисторов в интегральном исполнении и, как следствие, более высокой степенью интеграции по сравнению с ТТЛ-микросхемами.

Совокупность ИМС, реализующих логические функции и объединенных общим типом схемы, называется *логическим семейством*. Предпочтительный выбор семейства ИМС для конкретных целей определяется такими факторами, как быстродействие, стоимость, помехозащищенность, рассеиваемая мощность, логические возможности. В цифровых ИМС *логические переменные* принимают только два значения (двоичная система): *логический 0* или *логическая 1*. Наиболее простой реализацией логической функции является инвертор [2]. Им может служить обычный каскад с ОЭ (рис. 4.1а). Из вида передаточной характеристики (рис.4.1б) следует, что напряжения сигналов должны лежать в диапазоне $0 \leq U \leq E_{пит}$.

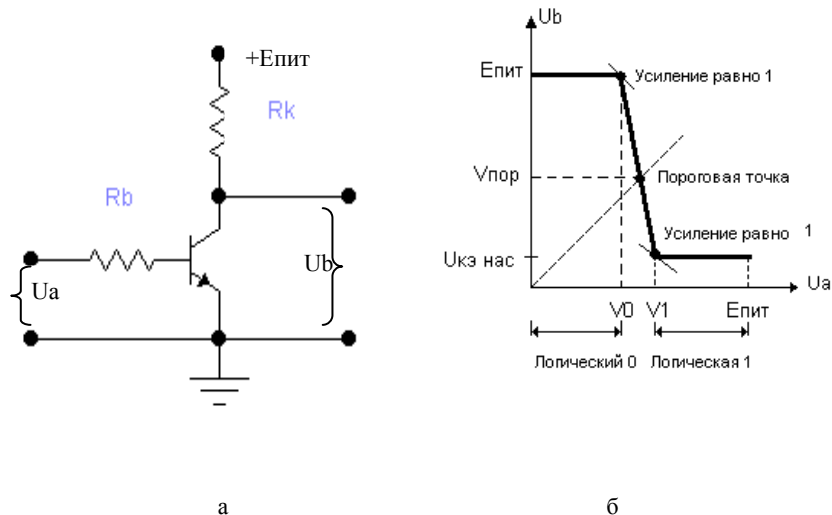


Рисунок 4.1 – Схема (а) и передаточная характеристика инвертора (б)

Если мы условимся считать 1 более положительный уровень напряжения ($V1$ -Епит) и 0 – более отрицательный (0 - $V0$), то эта условная система называется *положительной логикой*. Для *негативной логики* 1 соответствует интервал напряжений (0 - $V0$), а 0 – ($V1$ -Епит). *Пороговая точка* соответствует границе раздела между уровнями напряжений 0 и 1 (см.рис. 4.1б) и есть точка пересечения передаточной характеристики с линией, проведенной из начала координат под углом 45° . Более четкими границами интервалов напряжений, соответствующих логическим 0 и 1, являются точки передаточной характеристики, в которых коэффициент усиления равен 1: $0 \leq U_0 \leq V0$, $V1 \leq U_1 \leq \text{Епит}$. Отметим, что существует также интервал напряжений между $V0$ и $V1$, неопределенный в отношении логических: 0 и 1.

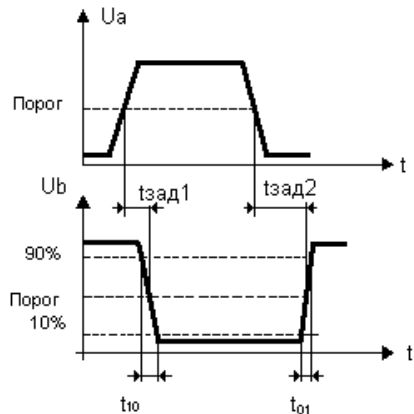


Рисунок 4.2 – Определение времен переключения и задержки передачи

Для обеспечения надежной работы цифровой ИМС необходимо предусмотреть меры предосторожности, чтобы предотвратить возможность появления ложных срабатываний (сбоев), вызванных паразитными сигналами или шумами, которые могут присутствовать наряду с полезными сигналами.

Шумовую устойчивость логической схемы определяют так называемым *шумовым запасом* по постоянному току и представляемым в

виде разности между напряжением сигнала и напряжением, соответствующим точке передаточной характеристики, в которой усиление равно 1. Шумовой запас по постоянному току: в состоянии $0=V0-Ua$, а в состоянии $1=Ua-V1$ (где Ua – входное напряжение). Максимальное число входов, которые могут быть подсоединены к выходу данного элемента без нарушения его работоспособности, называется *коэффициентом разветвления по выходу* (нагрузочной способностью) элемента. Данный параметр выражается через *единичную нагрузку*, которая соответствует

входной мощности элемента с минимальным потреблением. Быстродействие логической интегральной микросхемы определяется временем переходных процессов (см. рис.4.2).

Время переключения: из 1 в 0 (t_{10}) и из 0 в 1 (t_{01}) определяются как интервалы времени, за которые напряжение изменяется от 10 до 90% полной амплитуды. Время, необходимое для того, чтобы перепад, поданный на вход логического элемента, был передан на выход, называется *временем задержки передачи* и измеряется между пороговыми точками входного и выходного сигналов ($t_{зад1}$, $t_{зад2}$).

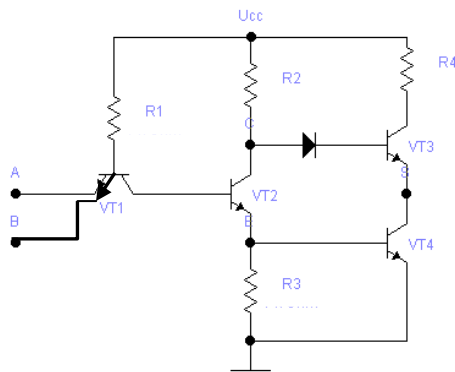


Рисунок 4.3 – Базовая схема элемента TTL-серии

Схема базового элемента TTL-серии показана на рис.4.3. Она содержит три основных каскада: входной - на транзисторе VT1, фазарашепительный на транзисторе VT2 с возможностью реализации на нем логической функции ИЛИ и выходной усилитель на транзисторах VT3 и VT4. В качестве транзистора VT1 используется многоэмиттерный транзистор, отсутствующий в библиотеке

EWB. Если на входы A и B подаются логические 1 (положительная логика), то ток через R1 и коллекторный диод потечет в базу транзистора VT2. В результате чего транзисторы VT2, VT4 открываются. Напряжение в точке E составляет не более, чем напряжение база-эмиттер транзистора VT4, а в точке С – напряжение в точке E плюс напряжение насыщения транзистора VT2. На выходе S присутствует сигнал логического нуля – напряжение насыщения транзистора VT4. Если хотя бы на один из входов A или B подан сигнал логического нуля, то транзисторы VT2, VT4 будут закрыты, а транзистор VT3 – открыт. На выходе S присутствует сигнал логической 1 - напряжение близкое к напряжению питания U_{cc} . Таким образом, базовый логический элемент выполняет логическую функцию 2И-НЕ. Резистор R4

служит для защиты транзистора VT3 при закорачивании выхода S на “землю”.

Простейшим элементом ИМС КМОП-серии является инвертор (рис. 4.4, а). Схема реализует логическую операцию НЕ и обеспечивает работу в режиме положительной логики. При подаче на вход логического нуля, открыт транзистор VT1, а транзистор VT2 – закрыт. На выходе присутствует сигнал логической 1. При подаче на вход инвертора логической 1, открывается транзистор VT2 и закрывается транзистор VT1. На выходе присутствует сигнал логического 0.

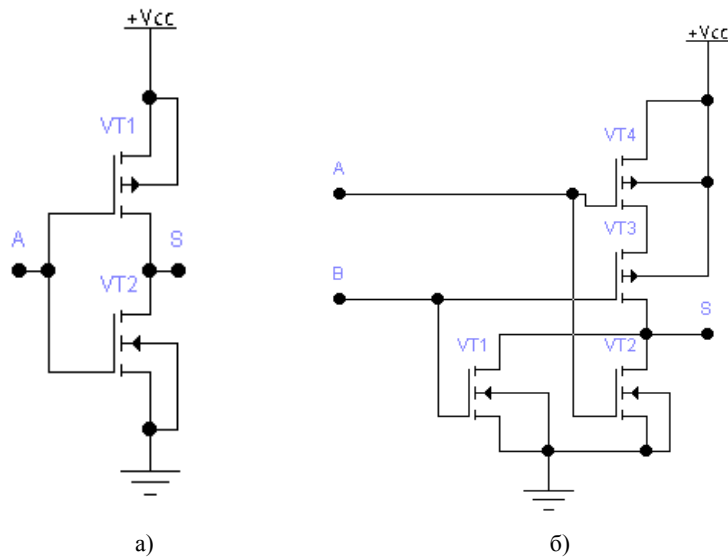


Рисунок 4.4 – Базовая схема инвертора (а) и элемента 2ИЛИ-НЕ КМОП серии

Для реализации функции ИЛИ-НЕ (рис 4.4, б) используется параллельное включение МОП-транзисторов *n*-типа и последовательное (ярусное) включение транзисторов *p*-типа.

Мощность, потребляемая схемой на КМОП-транзисторах, расходуется в основном во время переходного процесса на заряд выходных паразитных емкостей схемы и собственных емкостей

логическому 0 напряжение в точке А будет равно: $U_a = U_{пр} + (U_{cc} - U_{пр})R_d / (R_d + R_2)$, где $U_{пр}$ – падение напряжения на диоде VD1, что недостаточно для открытия транзисторов VT3 и VT4. Таким образом, выход схемы полностью отключается от нагрузки, что может быть зафиксировано мультиметром в режиме омметра: он будет измерять очень большое сопротивление (режим *третьего состояния - Z-состояния*).

2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с параметрами и принципами работы цифровых ИМС.
2. Провести исследование базового элемента серии 54/74 (рис.4.6).
3. Провести исследование базового элемента КМОП-серии (рис.4.7).
4. Провести исследование элемента с тремя состояниями (рис.4.5).

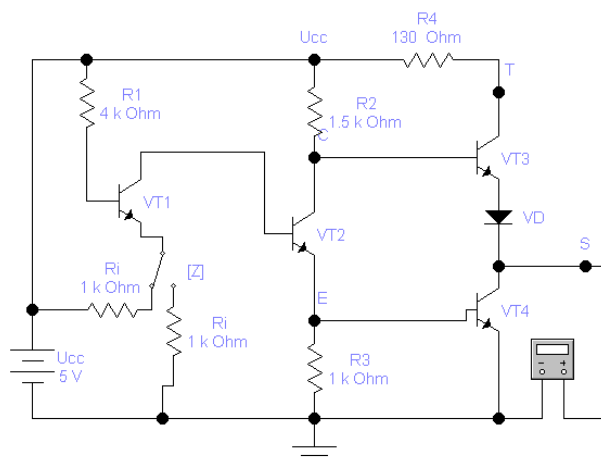


Рисунок 4.6 – Схема базового элемента серии 54/74

5. Провести испытания ИМС 74125 (155ЛП8, 4 буферных элемента с тремя состояниями) с обозначением выводов: А – вход, Y – выход, G – управление третьим состоянием.

3. Содержание отчета

Наименование и цель работы; краткие сведения из теории; результаты проведенных исследований схем, которые должны быть приведены в отчете вместе с описанием их работы; выводы по работе.

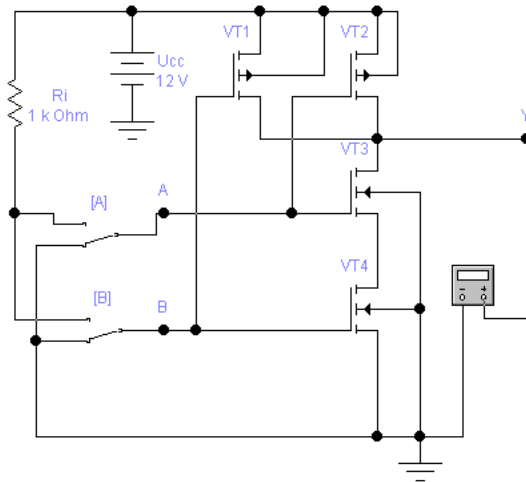


Рисунок 4.7 – Схема базового элемента КМОП-серии

4. Контрольные вопросы

1. Когда и где были созданы первые микросхемы?

2. Что из себя представляют ТТЛ- и КМОП-серии цифровых ИМС?

3. Что позволило повысить быстродействие ТТЛ-серии?

4. Какое основное преимущество имеют цифровые КМОП-

микросхемы по сравнению с ТТЛ и на каких частотах оно проявляется?

5. Какие функции выполняет многоэмиттерный транзистор в ИМС ТТЛ-серии?

6. Какими свойствами обладает логический элемент с тремя состояниями, какие задачи цифровой техники он позволил решить?

7. Назовите основные параметры цифровых ИМС.

ПРИЛОЖЕНИЕ №1

Система моделирования Eletctronics Workbench

Процесс моделирования в программе сводится к следующему. После запуска моделирования данные моделируемой схемы считываются программой (с экрана монитора), затем компоненты заменяются их математическими моделями и составляется система линейных, нелинейных или дифференциальных уравнений по методу, аналогичному методу узловых потенциалов. Для решения системы уравнений применяется численный метод Ньютона-Рафсона.

Рабочее окно программы Eletctronics Workbench содержит поле меню, линейки контрольно-измерительных приборов с библиотеками компонентов, панель с кнопками наиболее часто используемых команд.

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

1. Команды меню: New, Open, Save, Save As – типичные для Windows.

2. Revert to saved – стирание всех изменений;

3. Print – выбор данных для вывода на принтер;

4. Print setup – настройка принтера;

5. Exit – выход из программы;

6. Install – установка дополнительных программ с гибких дисков;

7. Import from Spice - импорт текстовых файлов в формате Spice.

8. Export to Spice – задание на моделирование в формате Spice.

9. Export to PCB – составление списка соединений схемы разработки печатных плат.

10. Import/Export – обмен данными с программой разработки печатных плат EWB Layout.

Меню Edit позволяет выполнять команды редактирования схем и копирование экрана.

1. Cut – стирание (вырезание) выделенной части схемы с сохранением ее в буфере обмена.

2. Copy – копирование выделенной части в буфер обмена.
3. Paste – вставка содержимого буфера обмена.
4. Delete – стирание выделенной части схемы.
5. Select All – выделение всей схемы.
6. Copy as Bitmap – команда позволяет выделить нужную часть экрана с последующим при этом копированием в буфер обмена.
7. Show Clipboard – показать содержимое буфера обмена.

Меню Circuit используется при подготовке схем, а также задания параметров моделирования.

1. Rotate – поворот компонента на 90° ;
2. Flip Horizontal – зеркальное отображение компонента по горизонтали;
3. Flip Vertical – зеркальное отображение по вертикали;
4. Component properties - имеет следующие закладки:
 - A) Label – ввод позиционного обозначения выделенного компонента (R1, C5); В строке Reference ID указывается позиционное обозначение компонента, используемое в дальнейшем при выполнении команд меню Analysis.
 - Б) Value – задаются номинальное значение параметра компонента, значения линейного (TC1) и квадратичного (TC2) температурных коэффициентов сопротивления, точность задания параметра компонента.
 - В) Fault - имитация неисправности выделенного компонента путем введения: сопротивления утечки, короткого замыкания, обрыва или отсутствия неисправности (включается по умолчанию).

При выборе закладки Display задается характер вывода на экран обозначений компонента; при выборе опции Use Schematic Options global setting используются установки, принятые для всей схемы, в противном случае используется индивидуальная настройка вывода на экран позиционного обозначения и номинального значения для каждого компонента. Закладка Analysis Setup позволяет установить температуру для каждого компонента индивидуально или использовать ее номинальное значение.

5. Create subcircuit – преобразование предварительно выделенной части схемы в подсхему.
6. Команды масштабирования схемы: увеличения Zoom In и уменьшения Zoom Out.

7. Диалоговое окно команды Schematic Options имеет ряд закладок позволяющих задавать сетку для удобства рисования схемы; показывать: позиционные обозначения компонентов; наименование моделей компонентов; номиналы компонентов; нумерацию нод – всех точек соединений компонентов; по умолчанию не показывать состав библиотеки компонентов; сохранять положение используемой библиотеки компонентов на экране; устанавливать тип и размер шрифта для обозначения компонента; устанавливать масштаб выводимой на принтер информации; осуществлять манипуляции с прокладкой проводников на схеме.

Меню Analysis включает следующие команды:

1. Activate – запуск моделирования.
2. Stop – остановка моделирования.
3. Pause – прерывание моделирования.
4. Analysis Options – набор команд для установки параметров моделирования:

A) Global – настройки общего характера

B) DC – настройки для расчета режима по постоянному току

B) Transient – настройка параметров режима анализа переходных процессов

C) Device – выбор параметров МОП-транзисторов

B) Instruments – настройка параметров контрольно-измерительных приборов.

5. DC Operating Point – расчет режима по постоянному току; в этом режиме из моделируемой схемы исключаются все конденсаторы и закорачиваются индуктивности.

6. AC Frequency – расчет частотных характеристик. Задаются: границы частотного диапазона; масштаб по горизонтали и вертикали; число рассчитываемых точек; список всех нод цепи и их номера.

7. Transient – расчет переходных процессов. Задаются: времена начала и окончания анализа переходных процессов; временной шаг вывода результатов моделирования на экран монитора.

8. Fourier – проведение Фурье-анализа (спектрального анализа). Задаются: номер контрольной точки (ноды); основная частота колебания (частота первой гармоники); число

анализируемых гармоник; масштаб по оси Y; количество отсчетов (выборок) на одну гармонику; частота следования выборок; вывод на экран распределения фаз и амплитуд всех гармонических составляющих в виде непрерывной функции.

9. Monte Carlo – статистический анализ по методу Монте-Карло. Задаются: количество статистических испытаний; отклонение параметров резисторов, конденсаторов, индуктивностей, источников переменного и постоянного тока и напряжения; начальное значение случайной величины; закон распределения случайных чисел.

10. Display Graph – команда вызова на экран графиков результатов выполнения одной из команд моделирования.

Меню Window содержит команды:

Arrange – упорядочение информации в рабочем окне;

Circuit – вывод схемы на передний план;

Description – вывод на передний план описания схемы (если оно имеется) или окна-ярлыка для его подготовки (на английском языке).

Меню Help построено стандартным для Windows способом.

Библиотека компонентов EWB содержит следующие разделы:

1. Favorites – в этом разделе размещаются подсхемы (при условии наличия их в данной схеме).
2. Sources – источники сигналов
3. Basic – пассивные компоненты и коммутационные устройства
4. Diodes – диоды
5. Transistors – транзисторы
6. Analog ICs – аналоговые микросхемы
7. Mixed ICs – микросхемы смешанного типа. Сюда входят также АЦП, ЦАП, мультивибратор и интегральный таймер.
8. Digital ICs – цифровые микросхемы
9. Logic Gates – логические цифровые микросхемы.
10. Digital – цифровые микросхемы
11. Indicators – индикаторные устройства
12. Controls – аналоговые вычислительные устройства.
13. Miscellaneous – компоненты смешанного типа.
14. Instruments – контрольно-измерительные приборы.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. Издание 2-е дополненное и переработанное, ООО Издательство “СОЛОН - Р”, Москва 2001, 726с.
2. Сентурия С., Уэдлок Б. Электронные схемы и их применение. Издательство «Мир», Москва 1977. – 595 с., ил.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с., ил.
4. Electronics Workbench Professional Edition. Technical Reference. Ver. 5. Interactive Image Technologies Ltd. Toronto, Ontario, Canada, 1966.