

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ (ЭП)

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ *p-n* ПЕРЕХОДОВ
В ПРИБОРАХ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

Методическое пособие к лабораторной работе
для студентов бакалавриата по направлению
11.03.04 – «Электроника и наноэлектроника»
профиль: «Квантовая и оптическая электроника»

Разработчик:
профессор кафедры ЭП
_____ В.Н. Давыдов

«15 » марта 2016 года

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ
2. ОПИСАНИЕ РЕДАКТОРА «Electronic Workbench»
 - 2.1. Общие сведения
 - 2.2. Общие правила работы с редактором
3. КОНТРОЛЬНО – ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ
 - 3.1. Мультиметр
 - 3.2. Функциональный генератор
 - 3.3. Осциллограф
 - 3.4. Плоттер
4. ТЕОРЕТИЧЕСАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ
 - 4.1. Вольт-амперная характеристика $p-n$ перехода
 - 4.2. Дифференциальное сопротивление $p-n$ перехода
 - 4.3. Частотные свойства $p-n$ перехода
5. Часть 1: ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
 - 5.1. Составление измерительной схемы
 - 5.2. Сборка схемы на рабочем столе *EWB*
 - 5.3. Выбор параметров измерительной цепи
 - 5.4. Задание к части 1 лабораторной работы
 - 5.5. Порядок выполнения части 1 лабораторной работы
6. Часть 2: ИЗМЕРЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ $p-n$ ПЕРЕХОДА
 - 6.1. Задание к части 2 лабораторной работы
 - 6.2. Порядок выполнения части 2 лабораторной работы
7. Часть 3: ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ РЕЛАКСАЦИИ $p-n$ ПЕРЕХОДА
 - 7.1. Задание к части 3 лабораторной работы
 - 7.2. Порядок выполнения части 3 лабораторной работы
8. Часть 4: ИЗЛУЧАЮЩИЕ СВОЙСТВА $p-n$ ПЕРЕХОДА
 - 8.1. Задание к части 4 лабораторной работы
 - 8.2. Порядок выполнения части 4 лабораторной работы
9. ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
10. ЛИТЕРАТУРА

1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе выполнения данной лабораторной работы студенты должны научиться составлять измерительные схемы для снятия характеристик оптоэлектронных приборов, содержащих p - n переходы, собирать схему измерения с помощью редактора *Electronics Workbench*, регистрировать в различных точках схемы формы напряжений и токов. В частности, в работе требуется вычислить значения параметров элементов измерительной цепи, получить вольт-амперную характеристику (ВАХ) p - n перехода, определить основные параметры перехода, а также моделировать работу этой схемы. Важной составляющей задания к лабораторной работе является также понимание влияния различных параметров прибора на вид измеряемых характеристик.

Для удобства выполнения лабораторная работа разбита на четыре части, в каждой из которых сначала излагается физическое значение предлагаемого к измерению параметра или характеристики, а затем излагается идеология их измерения средствами редактора *Electronics Workbench* версии 4.1 или 5.0.

2. ОПИСАНИЕ РЕДАКТОРА «Electronics Workbench»

2.1. Общие сведения

Программа *Electronics Workbench* (версия *Wewb* 4.1) рассчитана для работы в среде Windows 3.1 или 95/98 и занимает около 5 Мбайт дисковой памяти. Версия *Wewb* 5.0 работает в среде Windows 95/98 и требует 16 Мбайт дисковой памяти. Для размещения временных файлов редактору необходимо около 20 Мбайт свободного пространства памяти.

Программа моделирует лабораторный стол с источниками питания, необходимым набором радиоэлектронных элементов и контрольно-измерительной аппаратуры. При этом реализуется полная имитация органов управления и экранов измерительных приборов. Использование компьютерных моделей графопостроителя (*Bode Plotter*) и двухлучевого осциллографа (*Oscilloscope*) делает процесс испытания электронных цепей более наглядным, чем в реальной лаборатории. Дословно «*Workbench*» переводится как «Рабочий стол». Рабочее окно программы *Electronics Workbench* содержит поле меню, панель контрольно-измерительных приборов и панель библиотеки электрических элементов и радиоэлектронных компонентов редактора. На рабочем поле программы, подобном полю редактора *Winword*, располагается моделируемая радиоэлектронная схема с подключенными к ней приборами.

В качестве компонентов, из которых собирается исследуемая цепь, используются резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, транзисторы, операционные усилители, а также источники постоянного напряжения, клеммы подключения к приборам и клеммы заземления. Все эти компоненты вы найдете в выпадающих подменю панели элементов *Passive* и *Active*. При нажатии клавиши «*Пуск*» программа решает матричные уравнения цепи, находит временные зависимости напряжений и токов во многих точках исследуемой схемы. Результаты этих вычислений можно наблюдать с помощью контрольно-измерительных приборов.

Описание работы с редактором в объеме, необходимом для выполнения лабораторной работы, приводится ниже. Подробное описание *Electronics Workbench* можно получить при нажатии клавиши F1 (*Help*) или в книге В.Н. Карлашука «Электронная лаборатория на IBM PC. Программа *Electronics Workbench* и ее применение». М, 2001. – 726 с.

2.2. Общие правила работы с редактором

Процесс макетирования и испытания исследуемой схемы включает в себя

следующие этапы:

- 1) составление схемы и определение параметров её элементов;
- 2) выбор компонентов из панели элементов;
- 3) размещение их на рабочем столе;
- 4) соединение компонентов проводниками;
- 5) подключение измерительных приборов;
- 6) запуск схемы нажатием клавиши «I-0» (Пуск).

Первый этап работы выполняется на бумаге без использования редактора *Electronics Workbench (EWB)*. Выбор элементов и их размещение на рабочем столе *EWB* осуществляется следующим образом. Установите курсор мышки на необходимый компонент (резистор, диод и т.д.) в панели элементов так, чтобы курсор принял форму ладони. Нажав левую кнопку мышки и удерживая ее, переместите выбранную деталь на требуемое место рабочего стола, после чего отпустите кнопку. Так на рабочем столе собирается вся необходимая комплектация схемы: детали, источники питания и контрольно-измерительные приборы. Все они имеют клеммы (постоянные или активируемые редактором при приближении к элементу курсора мышки) для подключения к внешним цепям.

Для составления схемы – соединения проводниками собранных на рабочем столе элементов установите курсор на клемму одного элемента схемы и тяните соединительный провод мышкой при нажатой левой кнопке до клеммы другого элемента, после чего отпустите кнопку. Проводник соединит указанные клеммы, изгибаясь под прямыми углами. Если к какой-либо точке схемы необходимо подключить несколько элементов или приборов, из ящика деталей панели элементов берут соединительные клеммы с четырьмя контактами для проводов.

Не забывайте заземлять источники питания и измерительные приборы. В противном случае схема будет работать неправильно.

Над элементами схемы, отмеченными красным цветом, щелчком левой кнопки мышки можно производить следующие операции: удалить элемент (*Ctrl+X* или *Del*), повернуть на 90 градусов (*Ctrl+R*) и т.д. Эта действия могут выполняться и над группой выделенных объектов.

Для задания требуемых значений параметров установленного в схему элемента (например, сопротивления резистора или обратного тока *p-n* перехода, его емкости) надо отметить этот элемент и, дважды щелкнув левой кнопкой мыши, вызвать соответствующее меню. В появившемся окне ввести с клавиатуры число с точкой в качестве разделителя целой и дробной части. В поле размерности исправляемого параметра левой кнопкой мышки на прокрутке выбрать требуемую размерность физических величин.

Перед подключением прибора к схеме его необходимо увеличить или, как говорят, «развернуть». Для развертывания лицевой панели прибора установите курсор на выбранном приборе, и дважды щелкните по нему левой кнопкой мышки. После этого с её же помощью можно активизировать требуемые элементы управления прибора, установить значения и размерности генерируемых или контролируемых параметров. Эти операции подробно описаны ниже.

После сборки цепи, задания всех параметров элементов схемы и состояния измерительных приборов, попытайтесь протестировать ее работу нажатием клавиши «Пуск», находящейся в верхнем правом углу рабочего стола. Если схема собрана неверно, появляется соответствующий комментарий, который поможет найти и устранить ошибку.

3. КОНТРОЛЬНО - ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Панель контрольно-измерительных приборов редактора *EWB* находится в верхней части рабочего стола ниже строки иконок меню редактора. Эта панель содержит следующий

набор приборов: цифровой мультиметр, функциональный генератор, двухканальный осциллограф, измеритель амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик, генератор двоичного слова, 8-ми канальный логический анализатор и логический преобразователь. Немаловажным преимуществом интерактивных программ, которыми обладает *Electronics Workbench*, является возможность перемещения и изменения размеров передних панелей приборов, что делает возможным внесение изменений во время работы схемы без дополнительных операций с окнами. Таким образом, с возможностью управлять приборами создается полная аналогия с работой с реальными генераторами, осциллографами и т.д., а также имеется возможность наблюдения нескольких приборов, одновременно развернутыми и удобно размещенными на рабочем поле программы.

Рассмотрим только те из приборов, которые могут быть использованы для выполнения задания данной лабораторной работы.

3.1. Мультиметр (Multimeter)

Для измерения тока, напряжения, сопротивления и отношения амплитуд сигналов (в дБ) в данном редакторе используется мультиметр – дословно «измеритель многих параметров». Измеряемые им токи и напряжения могут быть как постоянными, так и переменными. На лицевой панели мультиметра расположен дисплей для отображения результатов измерений, клеммы для подключения и кнопки управления: выбор измеряемой величины, выбор измерения постоянной или переменной величины (напряжения, тока), установка параметров мультиметра. В режиме (~) измеряется действующее значение переменной составляющей напряжения или тока, а в режиме (-) – его среднее значение (постоянная составляющая). Отметим, что **прибор измеряет эффективное значение переменной величины.**

3.2. Функциональный генератор (Function Generator)

Этот прибор является источником переменного напряжения различной формы: синусоидальной, треугольной или прямоугольной. На лицевой панели генератора расположены кнопки и прокрутки для выбора формы генерируемого сигнала, его частоты (*FREQUENCY*), амплитуды (*AMPLITUDE*), длительности цикла или скважности (*DUTY CYCLE*) и значения постоянной составляющей в генерируемом переменном сигнале (*OFFSET*). Значение частоты может быть выбрано любым в пределах от 1 Гц до 999 МГц. Относительная длительность импульсов треугольной и прямоугольной формы (*DUTY CYCLE*) может составлять от 1 до 99 процентов периода. Имеются также клеммы для подключения прибора к измеряемой цепи и клемма для его заземления (*COM*).

3.3. Осциллограф (Oscilloscope)

Данный прибор позволяет визуально наблюдать одновременно два исследуемых сигнала (*Channel A* и *Channel B*). При этом можно анализировать временные зависимости подаваемых сигналов (режим «*Y/T*»), а также зависимость сигнала, подключенного к каналу **A**, от сигнала канала **B** (режим «*A/B*»; при этом развертка сигнала **A** по оси абсцисс осуществляется по закону сигнала канала **B**) и зависимость сигнала, подключенного к каналу **B**, от сигнала канала **A** (режим «*B/A*»; при этом развертка сигнала **B** по оси абсцисс осуществляется по закону сигнала канала **A**). При использовании временной развертки возможна развертка как от внутреннего генератора осциллографа (режим «*AUTO*» на блоке «*TRIGGER*»), так и от внешнего, подключаемого к правой клемме блока «*TRIGGER*» - режим «*EXT*». Над этой клеммой находится клемма заземления осциллографа - «*GROUND*».

Если при подключении входов к цепи выбрать цветные проводники (дважды щелкнув мышкой, установленной на проводник, можно вызвать меню для изменения его цвета), то и

осциллограммы каналов **A** и **B** будут окрашены в выбранные цвета.

Шкала временной развертки по оси X регулируется от 0.1 нс/дел до 1 с/дел. Например, для того, чтобы просмотреть на экране осциллографа один период частоты 1 кГц, нужно установить переключатель «*TIME BASE*» в положение «0.1 мс/дел». Масштаб по оси Y задается независимо для каждого канала.

Имеется три режима работы Y -усилителей каналов. Возможно наблюдение только переменной составляющей сигналов (режим *AC*) или совместно с постоянным уровнем (режим *DC*). Имеется возможность смещения каждого из сигналов по вертикали, чтобы исключить их наложение на экране. Режим усилителей по вертикали «0» необходим для заземления их входов при выборе начального положения лучей каналов в режиме «*Y POS*».

Щелчок по клавише «*ZOOM*» (лупа) приводит к появлению на экране увеличенных осциллограмм и двух визиров (1 - красный и 2 - желтый), с помощью которых производится цифровой отсчет амплитудных и временных параметров сигналов в двух точках, а также их разности. Выход из режима «*ZOOM*» осуществляется нажатием клавиши «*REDUCE*». Изображение можно инвертировать нажатием кнопки «*REVERSE*» и записать в файл нажатием кнопки «*SAVE*».

3.4. Плоттер (Bode Plotter)

Плоттер используется для снятия амплитудно-частотных (при нажатой кнопке «*MAGNITUDE*» - включена по умолчанию) и фазо-частотных характеристик (при нажатой кнопке «*PHASE*») электрических цепей. Плоттер подключается ко входу и выходу исследуемой цепи. В дополнение к плоттеру в схеме должен быть источник переменного сигнала. Возможно отображение полученной характеристики в логарифмическом (при нажатой кнопке «*LOG*» - включена по умолчанию) или линейном масштабах (при нажатой кнопке «*LIN*») по вертикали (кнопка «*VERTICAL*») и горизонтали (кнопка «*HORIZONTAL*»). Двойные клеммы входа «*IN*» и выхода прибора «*OUT*» служат для подключения прибора к схеме, причем правая клемма в паре является заземлением, а левая - сигнальной. Все указанные кнопки находятся на лицевой панели прибора.

На лицевой панели прибора предусмотрена возможность регулировки нижней и верхней частот сканирования, диапазона изменения амплитуд и фаз как в линейном, так и в логарифмическом масштабах. Возможно считывание частоты и амплитуды в любой точке характеристики, если с помощью мышки установить в нужную точку экрана плоттера специальный визир, совпадающий с осью ординат.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

4.1. Вольт-амперная характеристика p - n перехода

Основной характеристикой p - n перехода, определяющей качество его изготовления и возможность использования в электронных приборах, является вольт-амперная характеристика. Она представляет собой зависимость омического тока j , протекающего через p - n переход, от величины постоянного напряжения на нем V . Учитывая наличие потенциального барьера на границе раздела p - и n -областей перехода, данная характеристика оказывается несимметричной относительно знака прикладываемого напряжения. Так, если к n -области приложить положительный потенциал относительно потенциала p -области (случай обратных или запиорных напряжений), то высота барьера, разделяющего эти области, увеличится и, следовательно, протекание тока основных носителей через переход будет исключено. В этом случае через p - n переход протекает ток насыщения I_0 , образованный неосновными носителями заряда n - и p -областей. Д них контактное электрическое поле способствует переносу: за счет кулоновской силы оно

переносит электроны из p -области в n -область и дырки из n -области в p -область. Этот ток не зависит от величины внешнего поля и определяется только концентрациями неосновных носителей заряда в областях.

Если же к n -области приложить отрицательный потенциал относительно потенциала p -области (случай прямых или отпирающих напряжений), то высота барьера, разделяющего эти области, уменьшится и, следовательно, через переход появится надбарьерный ток уже основных носителей. Учитывая больцмановский закон распределения частиц по энергиям: количество частиц, имеющих энергию выше высоты потенциального барьера, растет по экспоненте с уменьшением высоты этого барьера, можно получить выражение для ВАХ p - n перехода в следующем виде:

$$j(V) = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right). \quad (1)$$

4.2. Дифференциальное сопротивление p - n перехода

Кроме описания перехода как плоского конденсатора емкостью C одним из важных параметров, характеризующих качество изготовленного перехода, является его дифференциальное сопротивление, обозначаемое как R_d . Физически оно представляет собой сопротивление элемента, оказываемое им протеканию слабого переменного тока. Учитывая то, что слабое переменное напряжение часто используется в радиоэлектронных цепях так тестовое, введение дифференциального сопротивления оказывается во многих случаях доминирующим для оценки возможностей использования данного элемента в той или иной электрической цепи. Математическое определение дифференциального сопротивления элемента, находящегося при постоянном напряжении $V = V_0$, таково

$$R_d = \left(\frac{\partial U}{\partial I} \right)_{V=V_0}.$$

Физически его можно измерить, если наряду с постоянным напряжением к исследуемому элементу приложить малое переменное напряжение амплитудой ΔU , частотой f и регистрировать величину протекающего через элемент тока ΔI на этой же частоте. Тогда согласно определению сопротивления из закона Ома найдем:

$$R_d(f, V_0) = \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (2)$$

Ясно, что величина дифференциального сопротивления зависит как от частоты, на которой оно измеряется, так и от величины постоянного напряжения, приложенного к элементу. Из выражения (2) следует и различие между дифференциальным сопротивлением и сопротивлением, измеряемым на постоянном токе: они разнятся так же, как производная от функции, вычисленная в точке, отличается от среднего значения этой функции при одном значении аргумента - в нашем случае при заданном постоянном напряжении на переходе.

Пользуясь выражением для ВАХ перехода (1), подвергнутого одновременному действию произвольного постоянного и малого переменного напряжения, нетрудно определить его дифференциальное сопротивление:

$$R_d = \frac{1}{\left(\frac{\partial I}{\partial U}\right)_{V=V_0}} = \left(\frac{\partial}{\partial U} \left(I_0 \left(\exp\left(\frac{q(V_0 + U)}{kT}\right) - 1 \right) \right)\right)^{-1} =$$

$$= \left(I_0 \left(\exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) \frac{\partial}{\partial U} \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) \right) \right) \right)^{-1} = \left(\frac{q}{kT} I_0 \left(\exp\left(\frac{q(V_0 + U)}{kT}\right) \right) \right)^{-1} \approx$$

$$\approx \frac{kT}{qI_0} \cdot \exp\left(-\frac{qV_0}{kT}\right)$$

поскольку обычно $|V_0| \gg U$, т.е. прикладываемое постоянное напряжение по своей величине обычно во много раз больше амплитуды переменного тестового сигнала. Окончательно имеем:

$$R_d(V_0) \approx \frac{kT}{qI_0} \cdot \exp\left(-\frac{qV_0}{kT}\right). \quad (3)$$

Из данного выражения следует, что величина дифференциального сопротивления резко уменьшается в области прямых смещений (положительных напряжений, открывающих переход). Оно максимально в точке $V = 0$ В. В области же обратных смещений данное выражение недействительно ввиду того, что исходное выражение для ВАХ $p-n$ перехода не дает экспоненциальной зависимости тока в этой области напряжений. Поэтому для запирающих напряжений дифференциальное сопротивление вычисляется по выражению (3), когда $V_0 = 0$:

$$R_d = \frac{kT}{qI_0}. \quad (4)$$

4.3. Частотные свойства $p-n$ перехода

Как и всякий электронный прибор, в котором имеется перенос носителей заряда через область их регистрации, $p-n$ переход должен обладать некоторой инерционностью протекания процесса переноса. Обнаружить инерционные свойства перехода можно при подаче на него переменного напряжения различной частоты: $p-n$ переход будет не успевать реагировать на него, если частота напряжения превысит некоторый характеристический параметр, определяемый параметрами $p-n$ перехода. Этим характеристическим параметром является **время перезарядки его емкости C** . Ёмкость перехода образована p - и n - областями, разделенными областью обедненного заряда и имеет собственную проводимость. Для исследования частотных свойств $p-n$ перехода необходимо включить его в запертом направлении и приложить синусоидальный сигнал с амплитудой $U_{мест}$, не превышающей напряжение постоянного смещения на переходе. Как и в предыдущей части лабораторной работы, амплитуду тестового напряжения $U_{мест}$ рекомендуется брать меньше величины kT/q . Тогда получим (рис. 1)

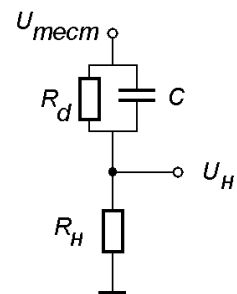


Рис. 1

$$U_H = jR_H = \frac{U_{мест}}{Z + R_H} R_H,$$

где Z - импеданс $p-n$ перехода, который складывается из активного дифференциального

сопротивления R_d и емкостного сопротивления $1/\omega C$. Следовательно

$$U_H = U_{тест} \frac{R_H}{(R_H + R_d) + \frac{1}{i\omega C}},$$

где i - мнимая единица. Если сопротивление нагрузки значительно меньше дифференциального сопротивления $R_d \gg R_H$, то снимаемое с нагрузки переменное напряжение будет комплексной величиной

$$U_H \approx U_{тест} \frac{R_H}{R_d + \frac{1}{i\omega C}}.$$

Использование в качестве измерителя амплитуды квадратичного детектора дает на его выходе постоянное напряжение величиной

$$\overline{U_H} = \sqrt{Re^2(U_H) + Im^2(U_H)} \approx U_{тест} \frac{R_H / R_d}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}. \quad (5)$$

Здесь $\tau = C \cdot R_d$ - время перезарядки емкости перехода через его дифференциальное сопротивление. Согласно данному выражению (5), изменяя частоту тестового сигнала от меньшего значения к большему, получим изменение величины постоянного напряжения $\overline{U_H}$, снимаемого с сопротивления нагрузки R_H , от постоянного на низкой частоте к уменьшающемуся по закону $1/\omega$ на высоких частотах. Из полученной частотной зависимости может быть найдена частота ω_0 , на которой $\omega_0 \tau = 1$ и падение напряжения на сопротивлении нагрузки уменьшается в $\sqrt{2} = 1.41$ - раза по сравнению с его значением на низких частотах, например, на частоте 10 Гц. Частота, на которой величина постоянного напряжения $\overline{U_H}$ уменьшается в указанное число раз, называется частотой среза - $f_{cp} = \omega_0 / 2\pi$. Из ее значения определяют время релаксации заряда в $p-n$ переходе:

$$\tau = \frac{1}{f_{cp}}. \quad (6)$$

С другой стороны, время перезарядки емкости C $p-n$ перехода через его дифференциальное сопротивление R_d может быть найдено из выражения:

$$\tau = C \times R_d. \quad (6.1)$$

Следовательно, если известны значения емкости и дифференциального сопротивления $p-n$ перехода, то имеется возможность вычисления времени перезарядки и сравнения теоретического и экспериментального значений этого параметра $p-n$ перехода.

Физически время релаксации перехода равно времени жизни неравновесных носителей заряда в $p-n$ переходе. По его величине можно определить, например, инерционность фотоприемного устройства на основе барьерной фотоэдс $p-n$ перехода.

5. Часть 1: ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ - АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ $p-n$ ПЕРЕХОДА

Целью данной части лабораторной работы является приобретение навыков работы с редактором *Electronics Workbench* по составлению схем измерения характеристик оптоэлектронных приборов, содержащих $p-n$ переходы, а также исследование ВАХ $p-n$ перехода при различных значениях его основных параметров.

5.1. Составление измерительной схемы

Здесь на примере измерения ВАХ показана последовательность действий по составлению схем и их сборке в редакторе *EWB*.

По определению вольт-амперная характеристика какого-либо прибора представляет зависимость величины тока через прибор от значения приложенного к нему постоянного напряжения: $j = j(V)$. Для получения визуального изображения ВАХ целесообразно использовать осциллограф, в котором по оси ординат откладывается ток через переход, а по оси абсцисс – приложенное к нему медленно меняющееся напряжение. Входные усилители осциллографа имеют высокое входное сопротивление (обычно до 10 МОм) и потому являются измерителями напряжения. Значит, на Y-вход осциллографа надо подать

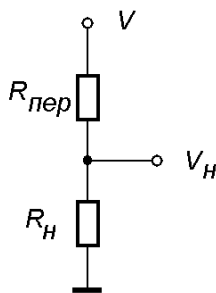


Рис.2

напряжение, пропорциональное величине тока через *p-n* переход. Следовательно, схема для измерения ВАХ должна кроме перехода содержать нагрузочное сопротивление, падение напряжения на котором содержит информацию о токе перехода и в примитивном виде должна выглядеть так, как показано на рис. 2. Для определения параметров схемы и условий измерения с ее помощью ВАХ найдем падение напряжения V_n на сопротивлении нагрузки R_n . Если к последовательно соединенным *p-n* переходу и сопротивлению R_n приложено медленно меняющееся во времени (например, по пилообразному закону) напряжение V , то (рис.2)

$$V_n = jR_n = V \frac{R_n}{R_{пер} + R_n}, \quad (7)$$

где $R_{пер} = R_{пер}(V)$ - сопротивление перехода по постоянному току, которое определяет его ВАХ. Из выражения (7) следует, что в общем случае напряжение на сопротивлении нагрузки сложным образом зависит от параметров *p-n* перехода. Проанализируем выражение (7) для выяснения условий получения по рассматриваемой схеме ВАХ перехода.

1. Рассмотрим случай, когда $R_n \gg R_{пер}$. Тогда согласно выражению (1) получим $V_n \approx V$. Следовательно, при выборе большого сопротивления нагрузки падение напряжения на нем не несет информацию о ВАХ *p-n* перехода.

2. Пусть теперь сопротивление нагрузки имеет малую величину по сравнению с сопротивлением перехода во всем диапазоне прикладываемого к цепи напряжения: $R_n \ll R_{пер}$. В этом случае выражение (1) дает

$$V_n \approx \left(\frac{V}{R_{пер}} \right) R_n. \quad (8)$$

Стоящее в круглых скобках выражение есть отыскиваемая ВАХ.

Таким образом, если выбрать нагрузочное сопротивление малым по сравнению с сопротивлением *p-n* перехода на постоянном токе, то снимаемое с сопротивления нагрузки постоянное напряжение будет пропорционально ВАХ исследуемого перехода. Именно этот вариант схемы измерения реализуется в данной лабораторной работе.

Исходя из описанного выше, для составления схемы измерения потребуется источник регулируемого постоянного напряжения, нагрузочное сопротивление и измеритель падения напряжения на нём – в виде осциллографа. Поскольку в области отрицательного напряжения сопротивление перехода велико и резко уменьшается в области положительных напряжений, то диапазоны изменения постоянного напряжения в положительную и отрицательную стороны должны быть различными: в области положительных напряжений достаточно,

например, $+(0.0 \div 0.2)$ В, а в области отрицательных $-(0.0 \div 0.8)$ В. В качестве источника регулируемого постоянного напряжения V , прикладываемого к исследуемому переходу, целесообразно использовать генератор двухполярного пилообразного напряжения с низкой частотой повторения и амплитудой, достаточной для охвата как прямой, так и обратной ветви ВАХ. Однако диссимметрия диапазонов положительного и отрицательного напряжения при использовании двухполярного пилообразного напряжения амплитудой U может быть реализована добавлением к пилообразному напряжению напряжения V_0 . Его величина может быть рассчитана, исходя из известных значений максимального положительного напряжения $V_{max} = 0.2$ В и минимального напряжения $V_{мин} = -0.8$ В (см. рис. 3)

$$V_{max} + V_{мин} = 2U, \quad V_0 = V_{max} - U. \quad (9)$$

Регистрировать ВАХ можно на экране осциллографа по одному из его каналов: каналу **A** или каналу **B**. Далее, величина сопротивления нагрузки R_n должна быть выбрана исходя из двух противоположных требований: с одной стороны ее величина должна быть много меньше сопротивления $p-n$ перехода во всём диапазоне используемых напряжений смещения V , а с другой - падение напряжения на нём должно быть достаточным для его надёжного измерения осциллографом. Максимальная чувствительность вертикальных усилителей осциллографа составляет 5 мВ/см. Значит, при измерении в области отрицательных напряжений минимального тока: тока насыщения I_0 , имеющего малое значение (типичное значение $10^{-6} \div 10^{-8}$ А), необходимо сопротивление нагрузки, падение напряжения на котором составит $V_n^{мин} = 5$ мВ:

$$R_n = \frac{V_n^{мин}}{I_0}. \quad (10)$$

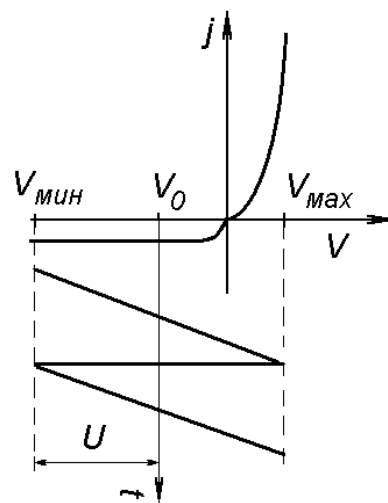


Рис. 3

5.2. Сборка схемы на рабочем столе EWB

Сборка схемы производится следующим образом. Над рабочим окном расположены пользовательское меню, содержащее группы элементов для сборки схем эксперимента, а также набор приборов, наиболее часто используемых в лабораторных работах. Откройте окно, обозначенное как «Резистор» и выберите сопротивление, установив его номинал. Для лабораторной работы в данном окне необходимо выбрать постоянное сопротивление, символ "Земля", а также источник постоянного напряжения. Для выбора элемента подведите курсор мыши к соответствующему элементу и, удерживая левую клавишу мыши в нажатом состоянии, перенесите значок выбранного элемента в удобное для расположения место рабочего окна. Следующий элемент схемы расположите так, как он должен быть расположен на рабочем столе в соответствии с вашей схемой. В группе, обозначенной как «Диод», необходимо выбрать выпрямляющий диод, который аналогичным способом переносится на рабочий стол. Таким образом, сначала на рабочем столе располагаются элементы схемы, а затем производится их соединение проводниками.

Приборы переносятся на рабочий стол аналогично описанному выше, причем, если переносимые элементы на самом деле копируются из библиотеки элементов (поэтому их

можно брать сколько угодно), то приборы из панели инструментов программы на рабочий стол пользователя переносятся только один раз. Таким образом, в распоряжении пользователя находится только один комплект перечисленных приборов.

Расположив элементы и приборы на вашем рабочем столе удобным образом, необходимо приступить к соединению элементов и подключению приборов. Для этого подведите курсор к выбранному для соединения элементу. Если это резистор, то он имеет два контакта для подсоединения к схеме, если транзистор, то три и т.д. Когда курсор мыши находится в непосредственной близости от контакта элемента, это соединение редактором автоматически активизируется и пользователь имеет возможность видеть это в появлении черного кружка. В этот момент необходимо нажать левую клавишу мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, подвести курсор мыши к контакту другого элемента, который вы также должны увидеть активизированным. В этот момент вы должны отпустить нажатую клавишу мыши – соединение проводником двух элементов схемы завершено. В течение этой процедуры от одного контакта к другому протягивается соединение, которое приобретает прямолинейную форму. В процессе соединения элементов схемы отдельные линии могут пересекаться, но это не приводит к появлению между ними электрического контакта. Если же вам необходимо электрическое соединение проводников, то вы должны, войдя в окно "Узел", перенести значок узла в необходимое место схемы. Узел схемы можно получить и присоединением контакта элемента к проводнику.

Подключение приборов производится аналогичным образом с тем лишь отличием, что при приближении курсора мыши активизируется ближайшая клемма прибора. Генератор электрических сигналов имеет три вывода: «Земля», "+" и "-"; осциллограф - два Y - входа, синхро-вход и "Землю".

После сборки схемы измерения ВАХ необходимо включить процесс имитации ее работы. Результат её функционирования будет отображен на выбранных индикаторах и приборах. Следует обратить внимание на то, что **требуемый вид ВАХ должен быть получен при отсутствии постоянного смещения каналов по Y - оси!**

5.3. Выбор параметров измерительной цепи

Все компоненты лабораторной работы: элементы, приборы имеют начальные установки, которые необходимо изменить в соответствие со схемой. Поясним эту процедуру на примере изменения величины резистора. Подведите курсор мыши к элементу так, чтобы появился значок-указатель в виде ладони, затем дважды нажмите левую клавишу мыши. В результате этого действия появится окно установки, в котором можно выбрать и установить номинал и единицы измерения элемента. Каждое такое окно снабжено прокруткой, типичной для технологии *Visual Basic*, а также и приставки перед единицами измерения, определяющие их масштаб: Ом, кОм. Мом и т.д. Прокрутка реализована с помощью двух клавиш: "Вверх" и "Вниз", которыми можно увеличивать или уменьшать значение данной величины, соответственно.

Такие элементы как диод могут иметь различные параметры, которые можно подобрать путем выбора типа диода либо установкой его параметров. Для выбора типа необходимо раскрыть окно установки, курсором выбрать наименование группы диодов и сам диод. Параметры выбранного диода могут быть изменены в опции «*EDIT*». Обратите внимание на величину обратного тока выбираемого диода: его величина должна быть не меньше той, умножение которой на величину R_n даст падение напряжения величиной выше минимально регистрируемой осциллографом. Например, при $I_0 = 10^{-6}$ А и $R_n = 10^2$ Ом падение напряжения на обратной ветви ВАХ составит 10^{-4} В, что больше минимального уровня сигналов на одно деление экрана (один сантиметр) для **A** - и **B** – каналов осциллографа.

Если же выбрать $I_0 = 10^{-12}$ А, то минимальное напряжение в ВАХ составит 10^{-10} В, что не может быть обнаружено с помощью имеющегося в *EWB* – редакторе осциллографа.

Генератор сигналов также требует изменения установок. Для увеличения его лицевой панели необходимо подвести курсор мыши к обозначению прибора на схеме и дважды нажать левую клавишу мышки. В результате этого действия на экране монитора развернется передняя панель прибора, в котором можно выбрать форму генерируемых сигналов: синусоидальные, пилообразные или прямоугольные. Здесь же можно установить амплитуду, частоту, постоянную составляющую и начальную фазу сигнала. Лицевая панель осциллографа разворачивается аналогично, аттенюатор моделируется прокрутками на лицевой панели осциллографа. При выборе параметров генератора пилообразного напряжения следует помнить выводы, полученные при выводе выражения (9). Добавление постоянного напряжения V_0 можно достичь включением последовательно с генератором пилы постоянного источника или включением на нем клавиши «*OFFSET*» с последующей установкой выбранного значения V_0 .

Итак, измерительная схема для снятия ВАХ диода содержит следующие компоненты (предлагаемые параметры):

1. Диод - идеальный.
2. Резистор постоянный величиной 0.1 кОм.
3. Источник постоянного напряжения - 0.2 В.
4. Земля.
5. Узлы схемы.
6. Генератор пилообразного напряжения - 0.1 Гц, (0.5÷0.7) В.
7. Осциллограф.

ВАХ диода регистрируется на экране осциллографе, на *X*-вход которого подано непрерывно изменяющееся пилообразное напряжение (в диапазоне напряжения V , например, от -0.5 до +0.5, канал **B**), а на *Y*-вход - напряжение с сопротивления нагрузки (канал **A**). Таким образом, на экране осциллографа получается зависимость тока от напряжения, то есть ВАХ диода. Для выбора установленной конфигурации осциллографа необходимо на нем нажать кнопку, переводящую прибор в режим отображения обоих каналов по разным осям – «*A/B*». Положение аттенюатора для канала **A** рекомендуется выбрать порядка 10 мВ/дел, а для канала **B** – порядка 0.1 В/дел.

После того, как будет собрана схема, а приборы настроены, необходимо запустить процесс имитации работы схемы. Для этого нажмите клавишу «*I-0*» в верхнем правом углу экрана. Если схема собрана неправильно или программа не может выполнить некоторые операции в силу каких-либо причин, то на экране рядом с переключателем появится слово "*ERROR*" и подробное сообщение об ошибке в окне. Если же схема работоспособна, то результат её работы либо сразу же, либо постепенно отобразится на экранах соответствующих приборов.

5.4. Задание к части 1 лабораторной работы

1. Получить на экране осциллографа изображение ВАХ выбранного из библиотеки редактора *EWB* диода.
2. Исследуйте влияние параметров диода: обратного тока, емкости, времени переключения на вид ВАХ.

5.5. Порядок выполнения часть 1 лабораторной работы

1. Ознакомьтесь с описанием редактора *Electronic Workbench*.
2. Научитесь работать с контрольно-измерительной аппаратурой, представленной в редакторе. Для этого соберите простейшие схемы с подключением источника постоянного

напряжения, генератора переменного напряжения, осциллографа (схемы «генератор – осциллограф», «источник постоянного напряжения – мультиметр») и научитесь управлять приборами, изменяя параметры подаваемого сигнала, добиваясь при этом качественного изображения регистрируемого сигнала на экране осциллографа или максимальной точности его измерения мультиметром.

3. Составьте схему измерения ВАХ $p-n$ перехода.

4. Соберите её и получите на экране осциллографа изображение ВАХ. Обратите внимание на вид характеристики: она должна быть гладкой и монотонной, иметь экспоненциальный подъем в области прямых напряжений и вид прямой линии, несовпадающей с осью X , в области обратных напряжений. В обязательном порядке должны также отсутствовать ограничения сигнала по величине в области прямых напряжений, а в области обратных не должно быть изломов зависимости.

5. Последовательно увеличивайте (уменьшайте) значения обратного тока, сопротивления базы, емкости перехода C в десять раз и отметьте по осциллограмме вызванные этими действиями изменения в ВАХ. Результаты наблюдений занесите в рабочую тетрадь для отчета.

6. Часть 2: ИЗМЕРЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ $p-n$ ПЕРЕХОДА

Как следует из теоретической части данной лабораторной работы, для измерения дифференциального сопротивления $p-n$ перехода при выбранном значении постоянного напряжения на нем V_0 необходим источник постоянного напряжения и последовательно соединенный с ним генератор синусоидального сигнала малой амплитуды (рекомендуется амплитуду брать меньше величины $kT/q=25$ мВ при комнатной температуре). Осциллографом или мультиметром регистрируется амплитуда переменного тока в измерительной цепи после чего по выражению (2) вычисляется величина дифференциального сопротивления перехода при заданном постоянном напряжении.

Целью данной части лабораторной работы является определение дифференциального сопротивления $p-n$ перехода с помощью редактора *Electronics Workbench*, расчета дифференциального сопротивления для нескольких точек ВАХ, а также сравнение расчетных и измеренных значений дифференциального сопротивления $p-n$ перехода при различных значениях его основных параметров.

6.1. Задание к части 2 лабораторной работы

1. Составьте и соберите схему для измерения частотных свойств $p-n$ перехода.

2. Экспериментальным путем определите величину дифференциального сопротивления перехода R_d в точке $V_0=+0.2$ В, $V_0=0$ В и $V_0=-0.5$ В: R_d^1 , R_d^2 , R_d^3 , соответственно. Полученные значения сравните с расчетными значениями.

3. Результаты наблюдений занесите в рабочую тетрадь для составления отчета по лабораторной работе.

6.2. Порядок выполнения части 2 лабораторной работы

1. В измерительную схему части 1 данной лабораторной работы последовательно с сопротивлением нагрузки включите мультиметр, переведя его в режим измерения переменного тока.

2. На функциональном генераторе смените форму генерируемого напряжения с пилообразной на синусоидальную, нажав соответствующую кнопку на его передней панели

генератора.

3. Уменьшите амплитуду генерируемого напряжения с долей Вольта до десятков милливольт.

4. На источнике постоянного напряжения установите величину постоянного напряжения V_0 , равную одному из указанных в задании значений.

5. Нажмите клавишу «Пуск» и измерьте величину тока в цепи. Далее, используя выражение (2), вычислите дифференциальное сопротивление перехода для каждого значения V_0 : R_d^1 , R_d^2 , R_d^3 .

6. Используя выражения (3) или (4) по известному обратному току p - n перехода и использованной в п. 4 величине приложенного напряжения V_0 , рассчитайте теоретические значения дифференциального сопротивления и сравните их с экспериментально найденными значениями R_d^1 , R_d^2 , R_d^3 .

7. Часть 3: ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ РЕЛАКСАЦИИ p - n ПЕРЕХОДА

Целью данной части лабораторной работы является определение времени релаксации p - n перехода с помощью редактора *Electronics Workbench*, расчета этого времени для нескольких точек ВАХ, а также сравнение расчетных и измеренных значений времени релаксации p - n перехода при различных значениях его основных параметров.

7.1. Задание к части 3 лабораторной работы

1. Составьте, а затем соберите схему для исследования частотных свойств p - n перехода.
2. Определите по частотной характеристике время переключения перехода.
3. Полученное значение времени переключения сравните с расчетным значением, полученным по известным значениям емкости перехода C и его дифференциального сопротивления R_d .
4. Результаты занесите в рабочую тетрадь для составления отчета по работе.

7.2. Порядок выполнения части 3 лабораторной работы

1. В схеме части 2 к выходу функционального генератора, не отключая его от схемы, подключите вход амплитудно-частотного анализатора, а его выход - к сопротивлению нагрузки.
2. Установите амплитуду переменного напряжения на функциональном генераторе равную нескольким десяткам милливольт.
3. Последовательно установите величину постоянного напряжения V_0 на p - n переходе, соответствующую обратной ветви ВАХ, а затем точке $V_0 = 0$ В.
4. Запустите схему и по анализатору амплитудной характеристики вычислите время релаксации для выбранных значений V_0 .
5. Измените величину емкости p - n перехода и повторите измерения.

8. Часть 4: ИЗЛУЧАЮЩИЕ СВОЙСТВА p - n ПЕРЕХОДА

Цель данной части лабораторной работы состоит в приобретении опыта работы с редактором *EWB* по моделированию работы оптоэлектронных элементов, содержащих светодиоды (оптроны и т.д.), пронаблюдать работу светодиода в импульсном режиме при различных состояниях p - n перехода.

Теоретический материал по этой части работы подробно излагается в учебном пособии по данному курсу (см. Давыдов В.Н. Физические основы оптоэлектроники. Учебное пособие. Томск, ТМЦ ДО, 2013. – 135 с).

8.1. Задание к части 4 лабораторной работы

1. Составьте и соберите схему для исследования работы $p-n$ перехода в режиме излучения света.
2. Получите свечение светодиода в импульсном режиме.
3. Изменяя амплитуду подаваемых импульсов, определите значение порогового тока свечения светодиода.
4. Измените значение обратного тока, сопротивления базы, емкости $p-n$ перехода и проверьте работоспособность светодиода при других значениях его параметров.
5. Результаты наблюдений занесите в рабочую тетрадь для составления отчета по лабораторной работе.

8.2. Порядок выполнения части 4 лабораторной работы

Главное свойство светодиода заключается в том, при достижении пороговой разности потенциалов на $p-n$ переходе происходит генерация оптического излучения, длина волны которого определяется шириной запрещенной зоны полупроводникового материала, значениями его параметров, примесным составом. Именно это свойство и его связь с обратным током, емкостью, сопротивлением базы необходимо исследовать в данной части лабораторной работы.

Для выполнения данной части лабораторной работы потребуются следующие элементы и приборы: зеленый и красный светодиоды, которые можно найти в опции, обозначенной как «Диод», по стандарт-ному обозначению светодиода. Потребуется также источник постоянного напряжения, ограничительный резистор номиналом 100 Ом и генератор прямоугольных импульсов, параметры которых приведены выше.

Для визуального отображения подаваемого напряжения понадобится осциллограф, на вход А - канала которого будут подаваться импульсы с генератора. Для временной развертки этого сигнала необходимо нажать клавишу "Y/T" на осциллографе. Рекомендуем поставить attenuаторы в положения «2 В/дел» и «1 с/дел» для Y- и X- входов, соответственно. При правильно собранной схеме при достижении напряжения своей верхней границы (пороговое значение напряжения) и отсутствие излучения при нижнем значении напряжения должно наблюдаться свечение светодиода, что отображается в виде заполнения фигуры диода выбранным цветом и (или) появление цветных стрелок около светодиода. Визуальная картина процесса свечения и показание осциллографа должны быть обязательно синхронными.

1. Установите на функциональном генераторе режим генерации прямоугольных импульсов амплитудой 1 В, с постоянной составляющей, необходимой для прямого смещения $p-n$ перехода, частотой 0.1 Гц, скважностью, равной двум.
2. Получите генерацию светодиода в момент действия импульса напряжения и проследите, чтобы свечение совпадало с действием импульса. Сравнение временного соотношения импульса напряжения и свечения светодиода можно сделать, сопоставляя импульсы свечения с осциллограммами прикладываемого к переходу импульсного напряжения.
3. Определите пороговые токи светодиодов зеленого и красного цветов.
4. Изменяя величину обратного тока и сопротивление базы, проверьте влияние этих параметров на режим генерации оптического излучения (величину порогового тока).

9. ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет по лабораторной работе «Исследование свойств *p-n* переходов в приборах оптоэлектроники» должен быть оформлен в соответствии с принятыми в ТУСУРе правилами оформления лабораторных работ. Он выполняется в редакторе WinWord 6.0 шрифтом Arial размером 12 пикселей с полями 2 см со всех сторон. Изложение результатов выполнения работы должно быть по каждой из её частей:

1. По части 1 должна быть представлена измерительная схема и результаты её работы: распечатан на принтере вид осциллографа с изображением ВАХ на его экране. В отчете должны быть также описаны результаты наблюдения ВАХ после изменения параметров *p-n* перехода и дано их объяснение.

2. По части 2 должна быть представлена измерительная схема, результаты её работы, а также приведены измеренные значения дифференциального сопротивления при заданных напряжениях на переходе, а также расчетные значения с обсуждением результатов сравнения расчетных и экспериментальных значений.

3. По части 3 должна быть представлена схема измерения частотных свойств *p-n* переход, экспериментальные результаты её работы, а также приведены измеренные значения времени релаксации емкости перехода при заданных напряжениях на переходе, а также расчетные значения с обсуждением результатов сравнения расчетных и экспериментальных значений.

4. По части 4 должна быть представлена измерительная схема, результаты её работы, приведены измеренные значения порогового тока двух типов светодиода, а также результаты наблюдения влияния различных параметров перехода на величину этого тока.

10. ЛИТЕРАТУРА

1. Карлащук В.Н. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. М, 2001. – 726 с.
2. Давыдов В.Н. Физические основы оптоэлектроники. Учебное пособие. Томск, ТМЦ ДО, 2013. – 135 с.
3. Епифанов Ю.И. Физические основы микроэлектроники. – М.: Высшая школа, 1971. – 388 с.