

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника»
Кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»

Р.Ш. Загидуллин

Лабораторный практикум по курсу Электроника. Полупроводниковые диоды

Электронное учебное издание

Полупроводниковые диоды

*Методические указания к выполнению лабораторного практикума по
дисциплине «Электроника»*

Часть 1 Исследование в Microcap, лабораторные работы 1 и 2

Москва

(С) 2014 МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

УДК 517.31

Рецензент:

Загидуллин Р.Ш.

Лабораторный практикум по курсу Электроника. Полупроводниковые диоды - М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2016.

© 2016 МГТУ имени Н.Э. Баумана

СОКРАЩЕНИЯ ТЕРМИНОВ, АББРЕВИАТУРЫ

ВАХ — вольтамперная характеристика;

ВФХ — вольтфарадная характеристика;

ЕСКД — единая система конструкторской документации;

MSxx — программная среда NI Multisim 10 или 12 версии;

МСxx — программная среда Multisim версии 7, 9 или 10;

Оглавление

СОКРАЩЕНИЯ ТЕРМИНОВ, АББРЕВИАТУРЫ	3
ЦЕЛЬ РАБОТЫ:	7
ЭКСПЕРИМЕНТ 1	8
ИССЛЕДОВАНИЕ ВАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ НА МОДЕЛИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА В ПРОГРАММЕ MICROCAP	8
ЭКСПЕРИМЕНТ 2	10
ИССЛЕДОВАНИЕ ВФХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ НА МОДЕЛИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА.....	10
ЭКСПЕРИМЕНТ 3	11
ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА	11
СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	13
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ РЕШЕНИЙ В MICROCAP	14
ВЫВОД ДАННЫХ РЕШЕНИЯ MICROCAP ВО ВНЕШНИЙ ТЕКСТОВЫЙ ФАЙЛ.....	15
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА	18
ЧТЕНИЕ ДАННЫХ ИЗ ТЕКСТОВОГО ФАЙЛА В ПРОГРАММУ MSCAD.....	21
ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА ВАХ В MSCAD ЗАДАННОГО ТАБЛИЦЕЙ.....	22
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА МЕТОДОМ GIVEN MINERR.....	23
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА МЕТОДОМ ТРЕХ ОРДИНАТ.....	25
ПОСТРОЕНИЕ ВАХ ЗАДАННОГО ТАБЛИЦЕЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ НА ОДНОМ ГРАФИКЕ	29
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БАРЬЕРНОЙ ЕМКОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИ ДИОДА.....	32
ВКЛЮЧЕНИЕ МОДЕЛИ В БАЗУ ДАННЫХ	37
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	41
ЛИТЕРАТУРА. ОСНОВНАЯ.....	42

ЛИТЕРАТУРА. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ	42
----------------------------------	----

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания содержит описания лабораторных практикумов по курсу Электроника. Лабораторный практикум может выполняться как на лабораторном стенде с использованием традиционных измерительных приборов, на персональном компьютере пользователя с использованием технологий компьютерных измерительных приборов. Предполагается, что пользователи знакомы с теоретическими положениями, относящимися к материалу лабораторных работ.

Контрольные мероприятия – предварительный контроль и контроль при защите после проведения лабораторных работ, осуществляется на интернет ресурсе http://e-learning.bmstu.ru/portal_rl1/ - среда MOODLE. Там же находятся и тестовые задания и хранятся результаты контрольных мероприятий.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Получение и исследование статических и динамических характеристик германиевого и кремниевого полупроводниковых диодов с целью определение по ним параметров модели полупроводниковых диодов, размещения моделей в базе данных программ схемотехнического анализа. Приобретение навыков в использовании базовых возможностей программ схемотехнического анализа для исследования статических и динамических характеристик полупроводниковых диодов с последующим расчётом параметров модели полупроводникового диода. Приобретение навыков в экспериментальном исследовании полупроводниковых приборов. Освоение математических программ для расчёта параметров модели полупроводниковых приборов на основе данных экспериментальных исследований.

ЭКСПЕРИМЕНТ 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ НА МОДЕЛИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА В ПРОГРАММЕ MICROCAP

Для заданного варианта типа диода провести моделирование лабораторного стенда получения ВАХ диода в программе Microcap 9 demo как на прямой ветви, так и на обратной ветви по показанным ниже схемам рис.1.

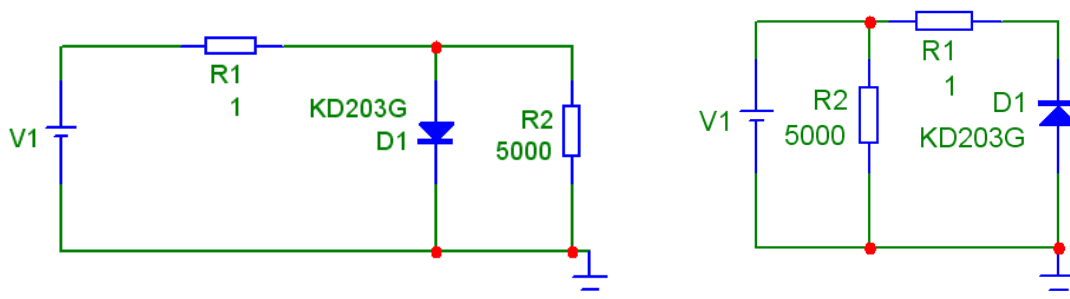


Рисунок 1

Примечание: Номер варианта определяется номером в списке группы,

- *Тип диода определяется номером диода по списку в файле библиотеки Rusd.Lib, причём, для группы 1 номера вариантов и номера диодов совпадают, для группы 2 номер диода и номер варианта соотносятся как (номер диода по списку) = (номер варианта) + 25, для группы 3 тип диода определяется номером диода по списку в файле библиотеки SovDiod.lib, для группы 4 (номер диода по списку) = (номер варианта) + 25, для группы 5 - (номер диода по списку) = (номер варианта) + 15.*

1. Провести эксперименты по получению ВАХ полупроводникового прибора, со значениями $R1 = 1 \text{ Ом}$, $R2 = 5000$ в режиме анализа по постоянному току.

Дать пояснения полученным результатам и рекомендации по использованию схем получения ВАХ.

2. Полученные данные ВАХ сохранить в виде текстового файла на жёстком диске в формате, пригодном для передачи данных в программу MCAD. Передать данные в MCAD, построить ВАХ.

3. В программе MCAD по полученным данным ВАХ определить параметры модели диода для постоянного тока: параметры модели диода RS, IS, Ft, N,

используя метод, заданный преподавателем. Сравнить полученные данные с параметрами модели в библиотеки.

4. [Проверить совпадение ВАХ](#) рассчитанной модели и модели исходной из библиотеки, добиться совпадения ВАХ с точностью до 10% по току для значения напряжения на прямой ветви 1А Вольт за счёт изменения параметров вновь полученной модели.

ЭКСПЕРИМЕНТ 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВФХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ НА МОДЕЛИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Для заданного варианта типа диода провести экспериментальное исследование поведения диода как управляемой электрической ёмкости и по результатам исследования получить параметры барьерной ёмкости диода. В анализе использовать приведённую на рис. 2 схему с параллельным колебательным контуром.

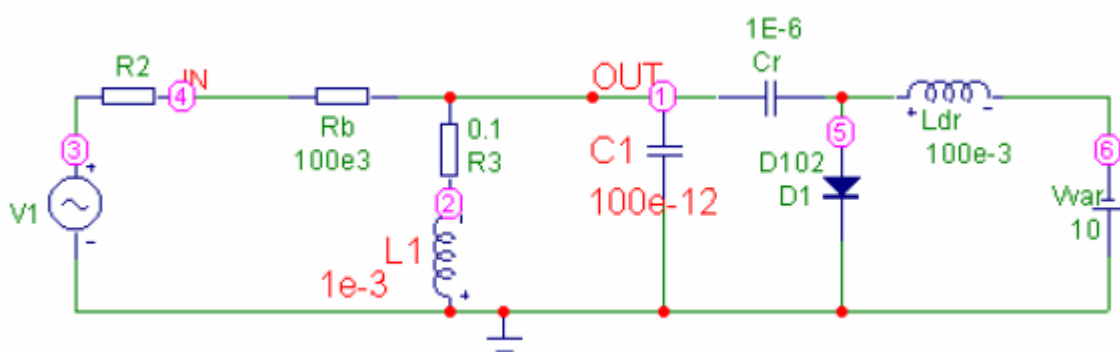


Рисунок 2

1. В программе Microcap 9 (режим анализа частотных характеристик, AC) получить резонансные характеристики колебательного контура для не менее четырёх значений напряжения смещения (источник напряжения Vvar). Определить по графикам резонансные частоты.
2. Передать данные о резонансных частотах параллельного колебательного контура при разных значениях напряжения смещения в программу MCAD. Построить там график зависимости резонансной частоты от напряжения Vvar.
3. По полученным данным построить вольтфарадную характеристики полупроводникового диода.
4. В программе MCAD, используя полученную вольтфарадную характеристику, рассчитать параметры барьерной ёмкости диода (параметры модели диода CJO, M, VJ).

ЭКСПЕРИМЕНТ 3

ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

1. Формирование модели полупроводникового диода средствами Microcap.

Создать модель прибора через пункт меню File->New и, взяв за образец ранее описание модели диода, заменив в ней параметры, на параметры модели, вычисленные по экспериментальным данным в программе MCAD

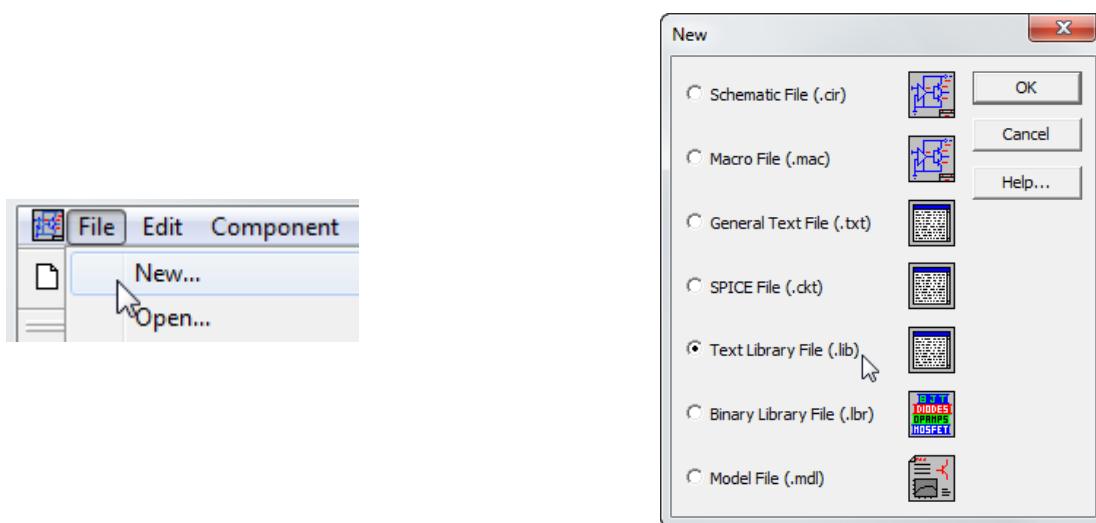


Рисунок 3

Примечание: на рисунке замещаемые параметры обозначены красным пунктиром.

2. Сохранить полученный файл модели в каталоге «с:\MC9\LIBRARY\». Имя файла оформить по правилу "ИМЯ_ФАЙЛА МОДЕЛИ_ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ.LIB"
3. [Внести в базу данных Microcap разработанную модель](#) за счёт корректировки файла NOM.LIB добавив путь до файла в конец списка:

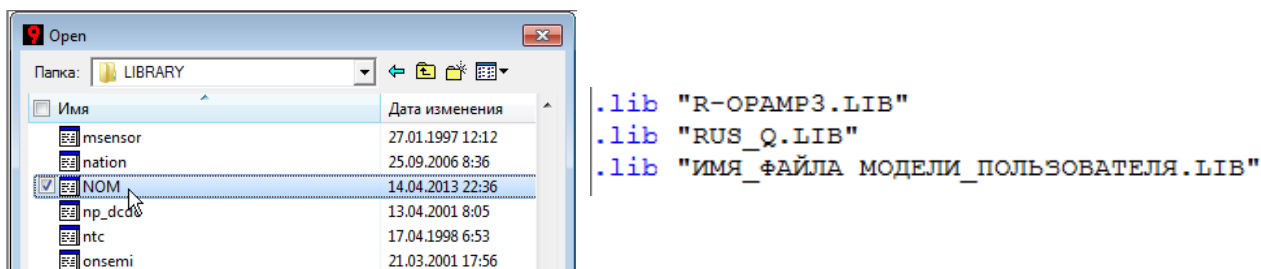


Рисунок 4

«. lib "ИМЯ_ФАЙЛА МОДЕЛИ_ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ.LIB"».

Примечание: если файл модели будет сохранен в произвольном месте диска, то к имени модели необходимо добавить путь до этого файла.

4. Построить ВАХ исходной модели (DoldModel) и модели, полученной в результате расчёта (DnewModel). Сравнить эти ВАХ (схема на рис. 5) и проверить совпадение тока диодов при напряжении на них равном 1 Вольт.

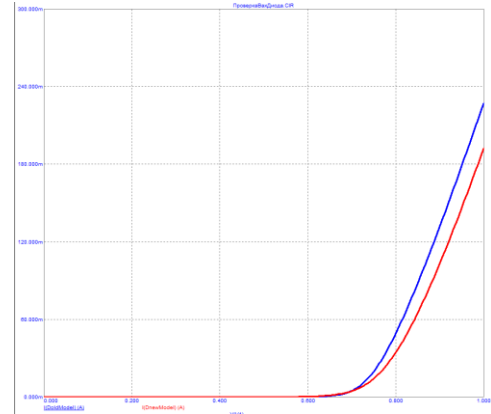
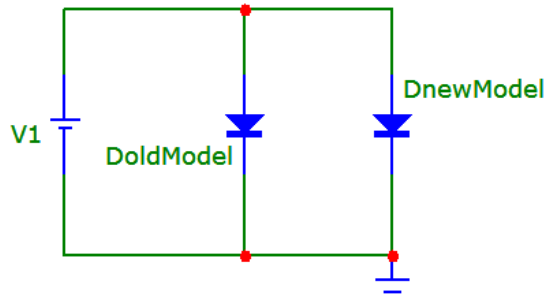


Рисунок 5

5. Адекватность модели проверить по степени совпадения расчётных данных и данных модели в библиотеке. При необходимости настроить новую модель за счёт изменения параметров I_s , R_s и N . Для оперативного изменения параметров модели можно использовать слайдер для заданного параметра, рис. 6

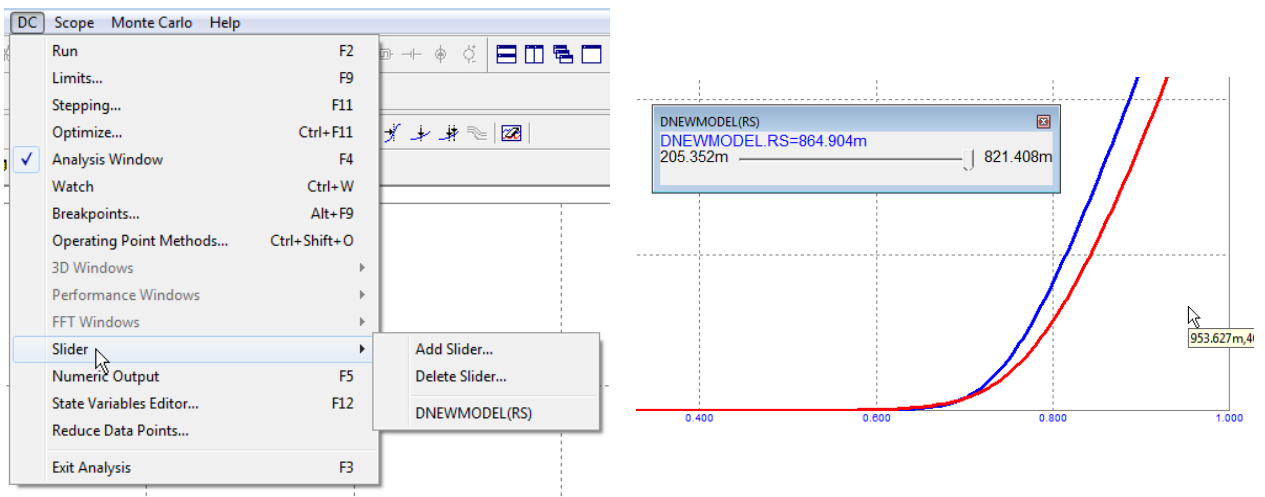


Рисунок 6

6. Оценить и объяснить полученные данные.

СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ РЕШЕНИЙ В MICROCAP

Місгосар позволяет строить графики с использованием формульных выражений в полях осей графика, рис 7.

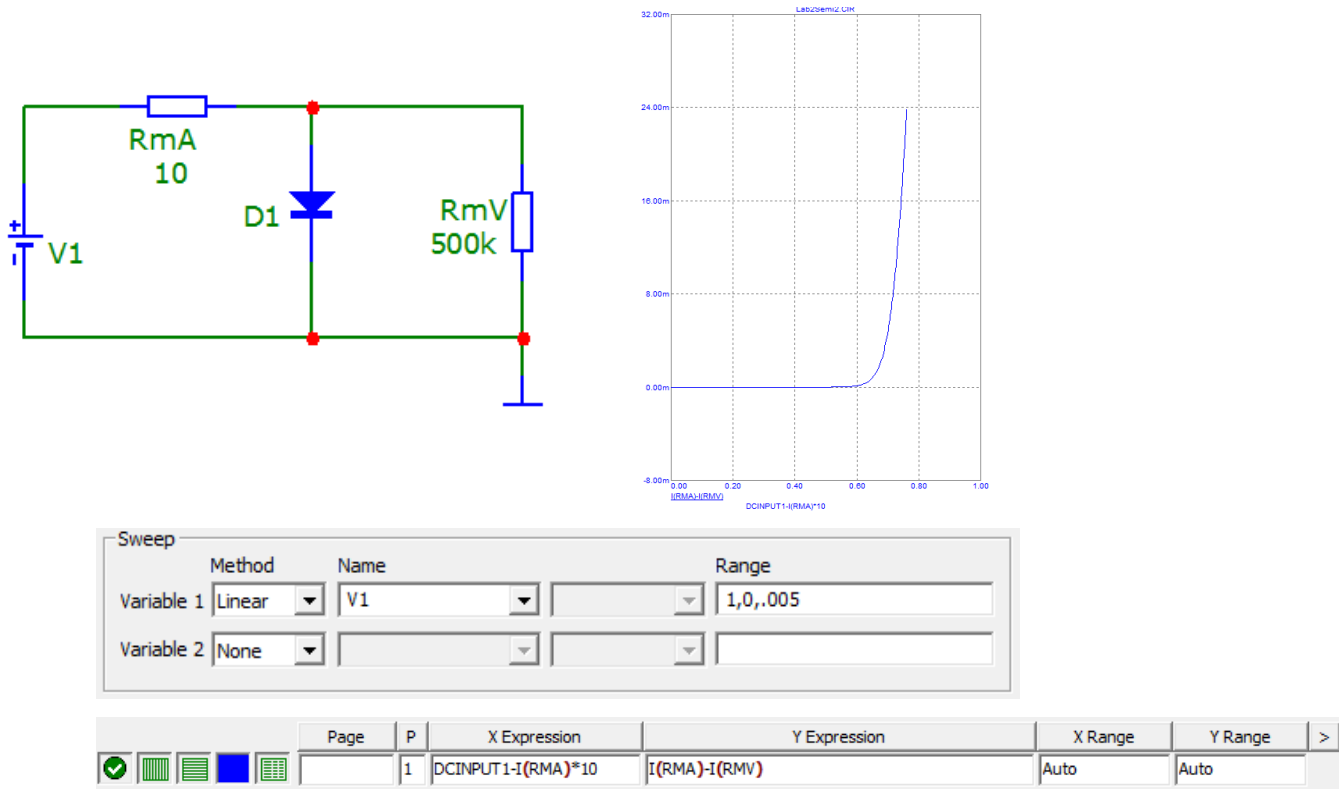


Рисунок 7

Формула для определения значений по оси X учитывает, что для построения графика, зависящего от напряжения на диоде необходимо учесть падение напряжения на милливольтметре. В конкретном случае сопротивление милливольтметра определено как 10 Ом, поэтому истинное напряжение на диоде и будет определяться выражением:

$$DCINPUT1-I(RMA)*10.$$

Ток через миллиамперметр определяется суммой двух токов – тока через диод и тока через милливольтметр. Поэтому для построения графика, связывающего ток диода (по оси Y) с напряжением на диоде (по оси X) используется выражение

$$I(RMA)-I(RMV).$$

ВЫВОД ДАННЫХ РЕШЕНИЯ MICROCAP ВО ВНЕШНИЙ ТЕКСТОВЫЙ ФАЙЛ

Вывод данных в тестовый файл из программы Мисгосар возможен только при нажатой экранной кнопкой, определяющей вывод в текстовый файл расчёта, рис. 8:

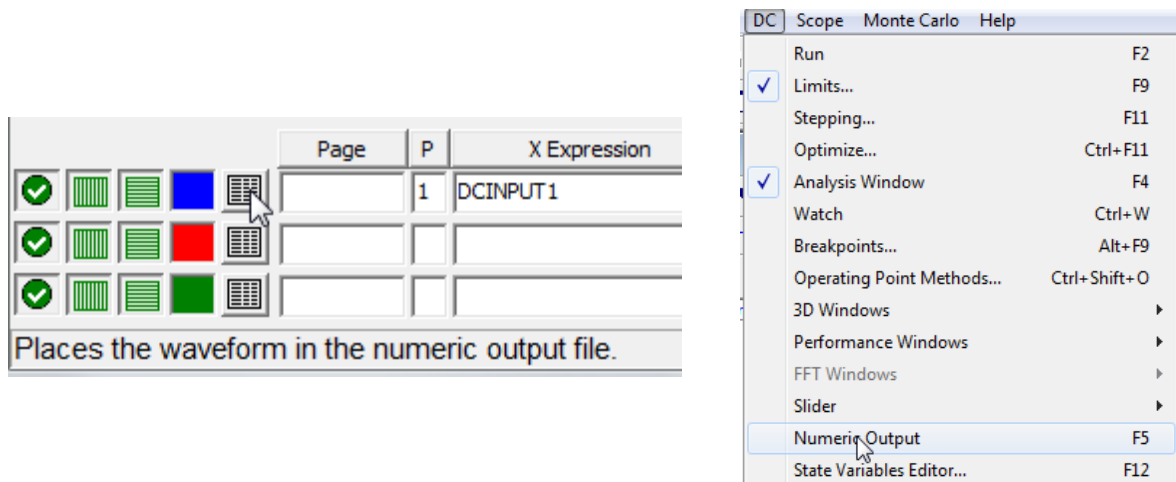


Рисунок 8

По умолчанию сформированный файл имеет имя, определённое именем схемы, но расширение этого файла будет, при использовании анализа по постоянному току “DNO”.

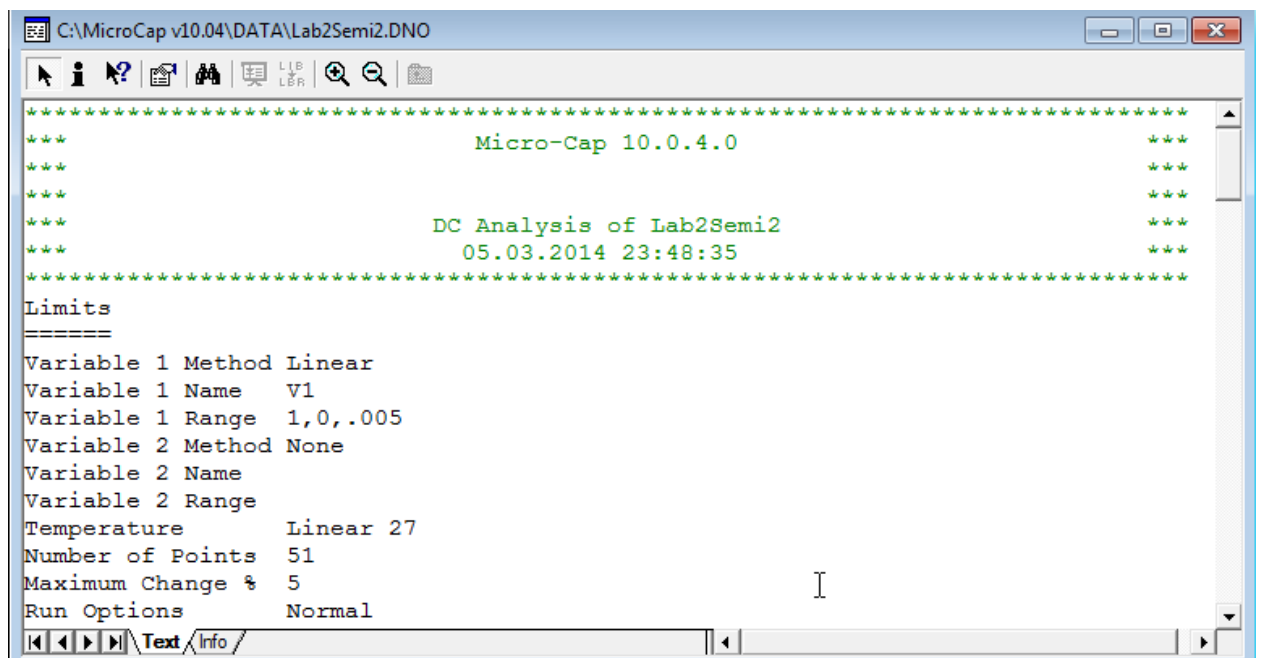
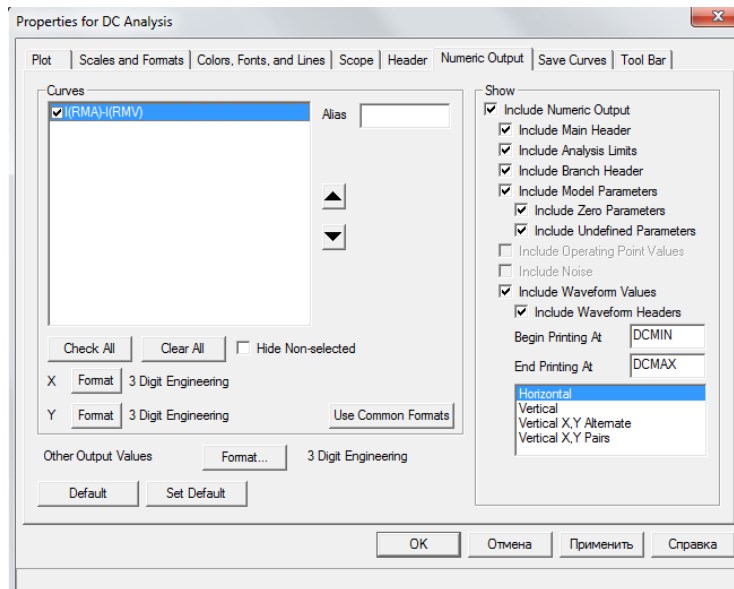


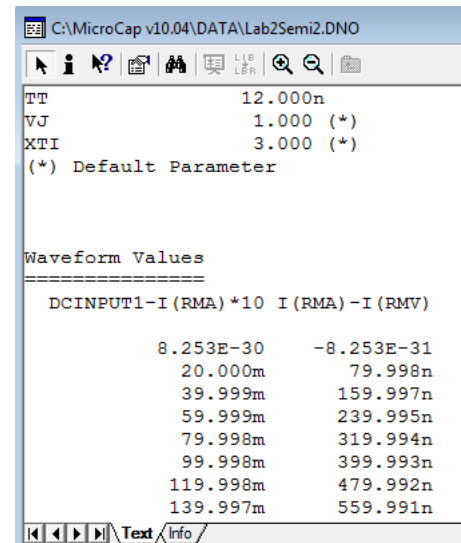
Рисунок 9

В этот файл будет выведена полная информация о задаче, версии программы и многое другое, информация о таблице значений будет размещена в самом конце этого файла. При взаимодействии с программой MCAD необходимо обеспечить только

численную информацию в выведенном файле. Это возможно при простом редактировании этого файла, но это будет требоваться каждый раз, когда будет получено решение (новые данные запишутся поверх отредактированной). Для удобства использования численного вывода можно рекомендовать установить опцию только численного расчёта. Для этого в диалоговом окне свойств графика (вызывается двойным щелчком в поле графика) в закладке Numeric Output отмечаются только флажки для появления данных без заголовков, рис. 10.



до редактирования



после редактирования

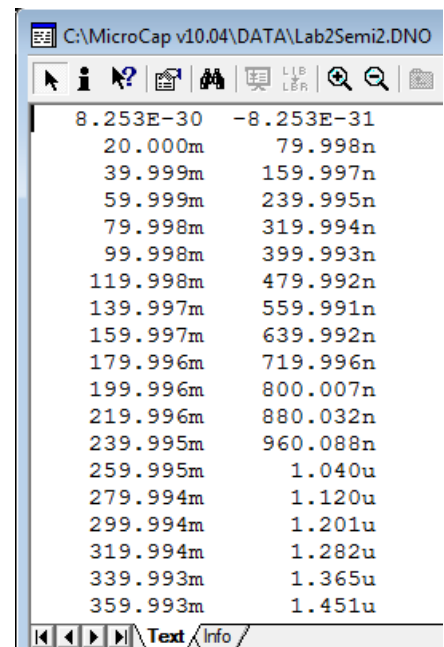
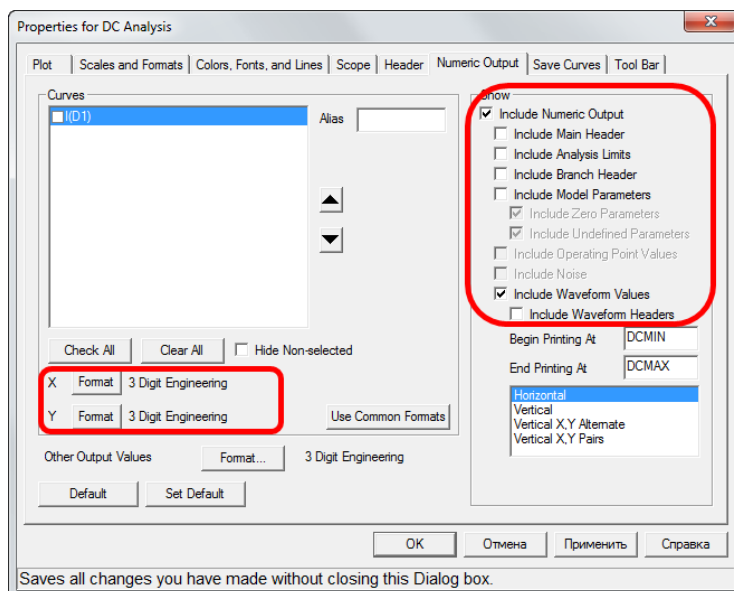


Рисунок 10

Но при этом остаются проблемы восприятия, чтения данных из файла, сформированного в Numeric Output программы математической обработки данных. Мисросар использует формат вывода численных данных с буквенными множителями (m – Полупроводниковые диоды. Мисросар [Оглавление](#) Загидуллин Р.Ш.

мили, множитель 10-3). На закладке Scales and Formats диалогового окна свойств графика можно исправить этот формат на читаемый MCAD-ом десятичный. Вызывается это окно свойств двойным щелчком в поле графика. Здесь изменяется формат Scale и Cursor как для оси X так и для оси Y, рис. 11

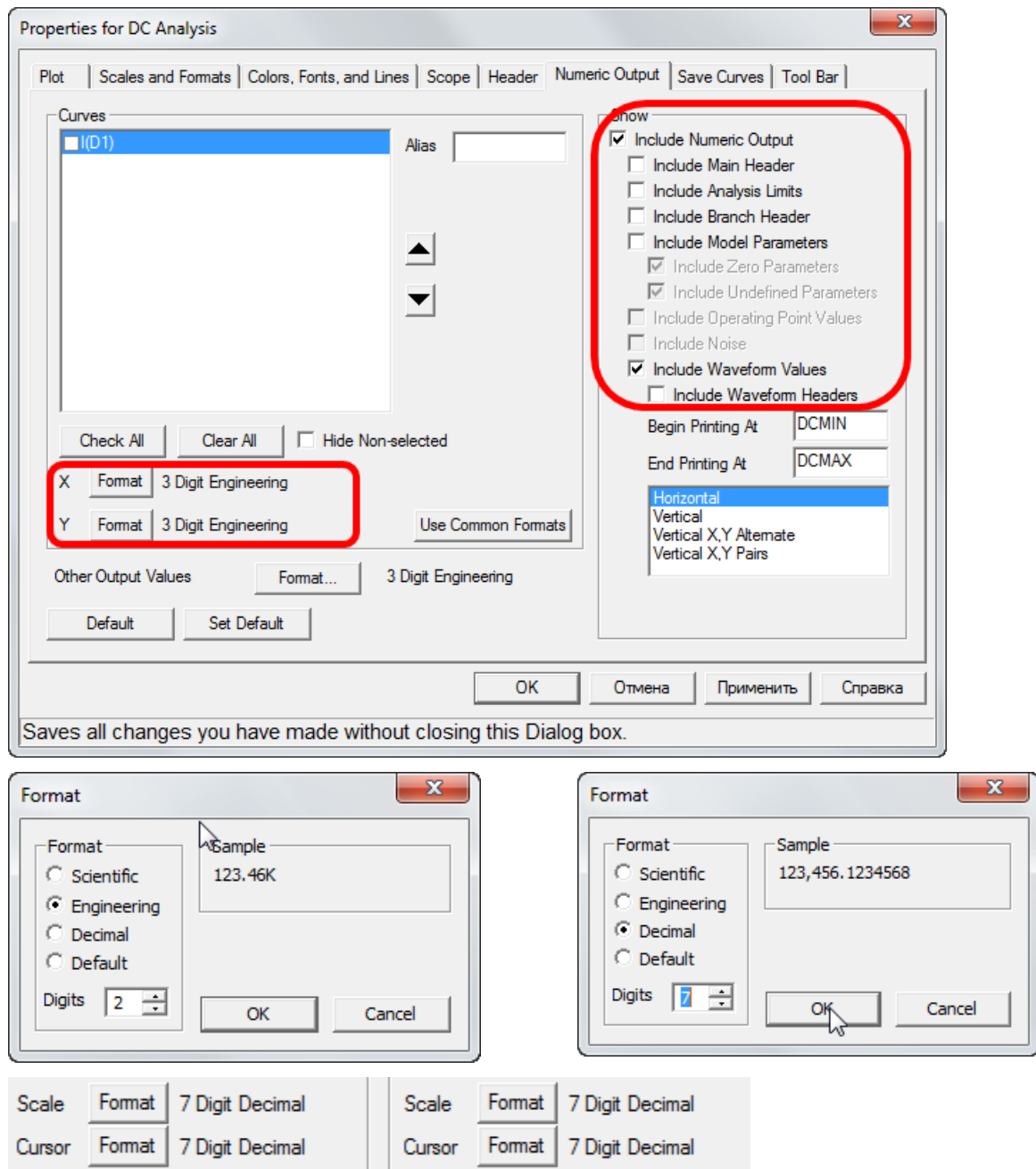


Рисунок 11

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Математическую модель элемента можно рассматривать как некоторый оператор F ; ставящий в соответствие системе внутренних параметров компонента или схемы $X=x_1, x_2, \dots, x_n$ совокупность связанных с ними внешних параметров $Y=y_1, y_2, \dots, y_n$.

Содержание внутренних и внешних параметров, их физический смысл меняется в зависимости от назначения модели. Математические модели технических устройств быть классифицированы по ряду признаков:

По характеру отображаемых процессов выделяют статические и динамические модели. По способу представления модели различают аналитические, графические и табличные. Аналитические модели определяют прибор или компонент в виде уравнений, описывающих его ВАХ или в форме дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в моделируемой схеме и характеризующие инерционность элемента.

Графические модели позволяют представить компоненты в виде графиков ВАХ или в виде эквивалентных схем замещения. Простая модель для ВАХ диода была рассмотрена выше.

Табличные модели позволяют представить схему или элемент в виде цифровых таблиц, полученных в ходе экспериментального исследования объекта моделирования и соответствующих графикам экспериментальных ВАХ. Табличные модели используют обычно в том случае; если аналитическую модель построить трудно вследствие сложной зависимости.

Модель полупроводникового диода в программе Мисросар имеет следующий вид, рис. 12 :

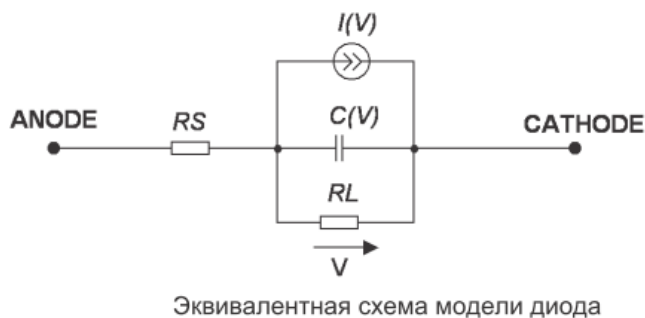


Рисунок 12

Математическая модель (вариант модели PSPICE) диода задаётся параметрами, перечисленными в таблице 1.

Таблица 1

Обозначение	Параметр модели
IS	Ток насыщения при температуре 27°C
RS	Объемное сопротивление
N	Коэффициент эмиссии (не идеальности)
ISR	Параметр тока рекомбинации
NR	Коэффициент эмиссии (не идеальности) для тока ISR
IKF	Предельный ток при высоком уровне инжекции
TT	Время переноса заряда
CJO	Барьерная емкость при нулевом смещении
VJ	Контактная разность потенциалов
M	Коэффициент плавности p-n перехода (1/2 — для резкого, 1/3 — плавного)
EG	Ширина запрещенной зоны
FC	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямо смещённого перехода
BV	Обратное напряжение пробоя (положительная величина)
IBV	Начальный ток пробоя, соответствующий напряжению BV (положительная величина)
NBV	Коэффициент не идеальности на участке пробоя
IBVL	Начальный ток пробоя низкого уровня
NBVL	Коэффициент не идеальности на участке пробоя низкого уровня
XTI	Температурный коэффициент тока насыщения IS
TIKF	Линейный температурный коэффициент IKF
TBV1	Линейный температурный коэффициент BV
TBV2	Квадратичный температурный коэффициент BV
TRS1	Линейный температурный коэффициент RS
TRS2	Квадратичный температурный коэффициент RS
KF	Коэффициент фликкер-шума
AF	Показатель степени в формуле фликкер-шума
RL	Сопротивление утечки перехода

Параметры модели диода, отвечающие за его частотные свойства, определены как:

ОБОЗНАЧЕНИЕ	Параметр модели
TT	Время переноса заряда
CJO	Барьерная ёмкость при нулевом смещении
VJ	Контактная разность потенциалов
M	Коэффициент плавности р-п перехода (1/2 — для резкого, 1/3 — плавного)
EG	Ширина запрещённой зоны
FC	Коэффициент нелинейности барьерной ёмкости прямо смещённого перехода

ЧТЕНИЕ ДАННЫХ ИЗ ТЕКСТОВОГО ФАЙЛА В ПРОГРАММУ MCAD

Пусть в результате моделирования был сформирован файл Diod_mA.DAT. Он был сохранен по адресу в каталоге C:\MC9\DATA. В MCAD может быть задана переменная VAX, которой и должен быть назначен результат чтения из файла данных, рис. 13.

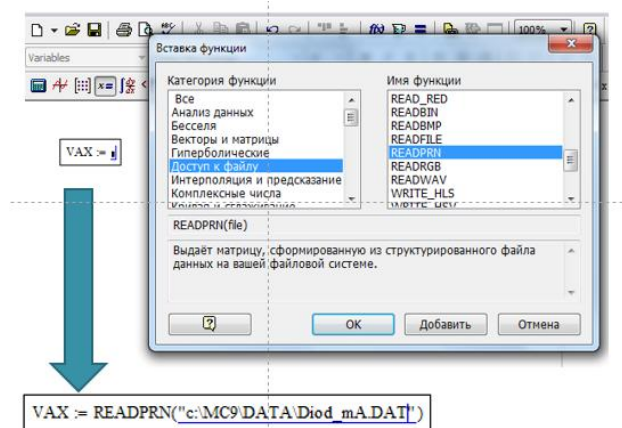


Рисунок 13

Формально данные представляют собой матрицу из двух столбцов. Такое формирование исходных данных позволяет обратиться к любой элементу вектора и использовать его численные значения. Для этого можно использовать встроенную возможность набора Матрица, или же «горячие» клавиши <Ctrl+6>

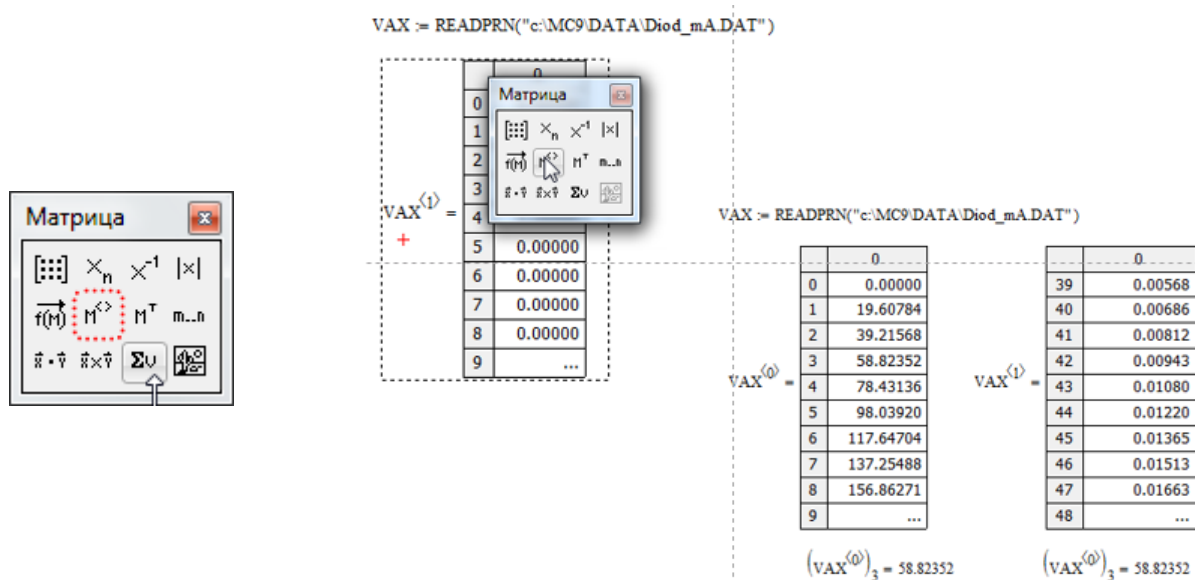


Рисунок 14

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА VAX В MCAD ЗАДАННОГО ТАБЛИЦЕЙ

Экспериментальные данные, которые были занесены вручную или же считаны из текстовых файлов, могут быть использованы для построения графиков в MCAD. Каждый из столбцов матрицы может быть определён как переменная по осям графика, рис 15.

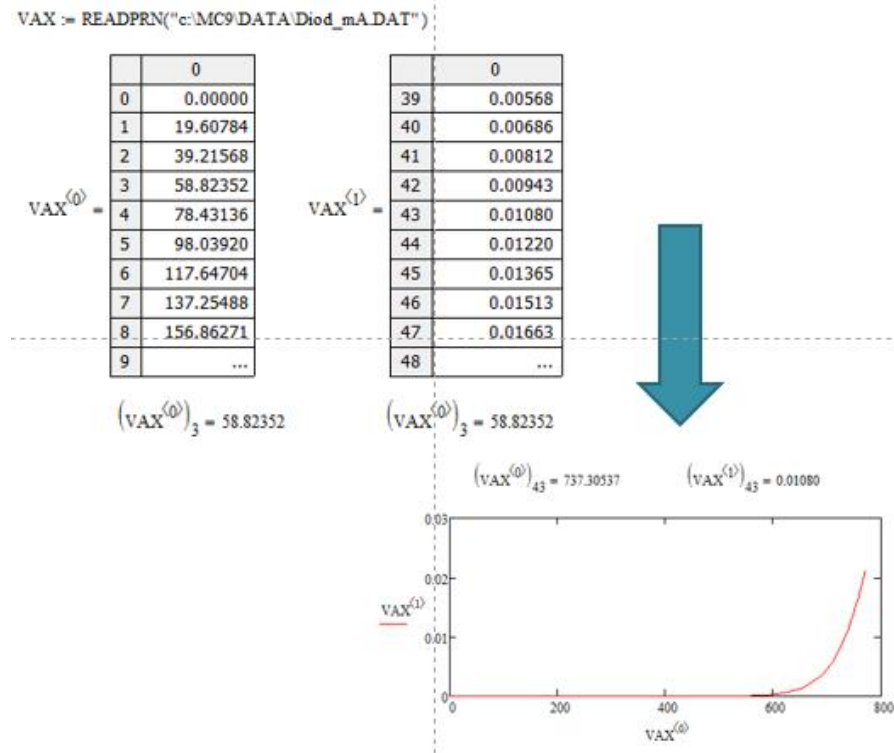


Рисунок 15

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА МЕТОДОМ GIVEN MINERR

Решение систем линейных и нелинейных уравнений и неравенств возможно с помощью вычислительного блока Given, который ограничивается функциями Find, Minerr, Maximize, Minimize. Решение задачи для определения параметров модели полупроводникового диода GIVEN MINERR показано ниже на листингах.

Вычисление ВАХ при заданных параметрах

$$x := 10^{-0} \quad F(x) := x \cdot R_b + \ln \left[\frac{(IS + x)}{IS} \right] \cdot m \cdot F_t$$

$$F(x) = 2.174$$

Заданные параметры модели

$$R_b = 1 \quad IS = 1 \times 10^{-10} \quad m = 2$$

$$F_t = 0.026$$

Given открывает блок решения системы

$$0.823 = 10^{-3} \cdot R_b + \ln \left[\frac{(IS + 10^{-3})}{IS} \right] \cdot m \cdot F_t$$

первая точка ВАХ, заданная током и напряжением

$$0.949 = 10^{-2} \cdot R_b + \ln \left[\frac{(IS + 10^{-2})}{IS} \right] \cdot m \cdot F_t$$

вторая точка ВАХ, заданная током и напряжением

$$1.157 = 10^{-1} \cdot R_b + \ln \left[\frac{(IS + 10^{-1})}{IS} \right] \cdot m \cdot F_t$$

третья точка ВАХ, заданная током и напряжением

$$2.174 = 10^{-0} \cdot R_b + \ln \left[\frac{(IS + 10^{-0})}{IS} \right] \cdot m \cdot F_t$$

четвертая точка ВАХ, заданная током и напряжением

Diod_P := Minerr(IS, R_b, m, F_t)

$$Diod_P = \begin{pmatrix} 1.013 \times 10^{-10} \\ 1 \\ 1.972 \\ 0.026 \end{pmatrix}$$

$$Diod_P_0 = 1.013 \times 10^{-10} \quad Diod_P_1 = 1 \quad Diod_P_2 = 1.972 \quad Diod_P_3 = 0.026$$

Проверка решения:

$$Id := 10^{-3}$$

$$F(Id) := Id \cdot Diod_P_1 + \ln \left[\frac{(Diod_P_0 + Id)}{Diod_P_0} \right] \cdot Diod_P_2 \cdot Diod_P_3$$

$$F(Id) = 0.823$$

Рисунок 16

Для того, чтобы ввести жирный знак равно, внутри блока, требуется нажать клавиши <CTRL> + <=>. Ограничительные условия здесь обычно задаются в виде неравенств или равенств, которые должны удовлетворяться физическим условиям.

Признаком окончания системы служит кодовое слово Find, если необходимо найти точное решение системы, или же слово Minerr для получения решения с заданной точностью.

Примечание Minerr рекомендуется использовать, если система не может быть решена точно и следует найти наилучшее приближение, которое обеспечивает минимальную погрешность. Функции Find, Minerr должны иметь столько же или меньше аргументов, сколько уравнений и неравенств содержит блок Given (максимальное число уравнений доведено до 200 в последних версиях MCAD). Если окажется, что блок содержит слишком мало уравнений или неравенств, то блок может быть дополнен тождествами или повторяющимися выражениями. Следует помнить, что система уравнений или неравенств должна быть записана после или правее ключевого слова Given. Кроме этого, Блок Given не рекомендуется использовать для поиска индексированных переменных.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА МЕТОДОМ ТРЕХ ОРДИНАТ

Уравнение для модели диода с учётом объёмного сопротивления области базы

$$Id = Io * (\exp(\frac{Ud - Id * Rb}{N * Ft}) - 1)$$

Решая это уравнение относительно напряжения (например, используя символьное решение в MCAD) можно получить выражение относительно напряжения:

$$Ud = Id * Rb + N * Ft * \ln(\frac{Id + Io}{Io})$$

Для определения трёх неизвестных Rb , $N * Ft$ и Io следует составить по трём отсчётам статической характеристики и решить систему из трёх нелинейных уравнений. Для упрощения решения при выборе отсчётов $Id(Ud)$ целесообразно обеспечить неравенство $Id' \gg Io$. Это позволит заменить уравнение для напряжения упрощёнными

$$\begin{cases} Rb = \frac{(Ud1' - 2 * Ud2' + Ud3')}{Id'} \\ N * Ft = \frac{(3 * Ud2' - 2 * Ud1' - Ud3')}{\ln(2)} \\ Io = Id1' * \exp(\frac{-(2 * Ud2' - Ud3')}{N * Ft}) \end{cases}$$

В рассмотренном примере требуется достаточно точное определение значений Udi' , которое не всегда удаётся обеспечить. Это требование можно ослабить при выборе для параметра ($N * Ft$) его теоретического значения, зависящего от материала и свойств полупроводника.

$$N * Ft = \frac{kT}{q} = \frac{273 + T^0C}{11608}$$

В этом случае остальные параметры Rb и Io определяются по двум точкам характеристики $Id1'$ и $2 * Id1'$, что соответствует системе уравнений:

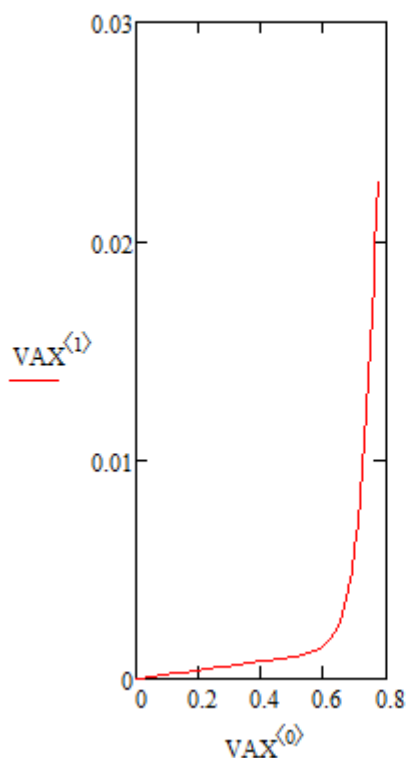
$$\begin{cases} Ud1' = Rb * Id1' + N * Ft * \ln(\frac{Id1'}{Io}) \\ Ud2' = 2 * Rb * Id1' + N * Ft * \ln(\frac{2 * Id1'}{Io}) \end{cases}$$

С решением:

$$\begin{cases} Rb = \frac{(Ud1' - 2 * Ud2' + Ud3')}{Id'} \\ Io = Id1' * \exp\left(\frac{(Ud2' - 2 * Ud1')}{N * Ft}\right) \end{cases}$$

При использовании программы MCAD расчёт параметров модели по трем отсчетам в экспериментальной ВАХ может быть выполнен в соответствии с текстом программы MCAD листинг которой показанной ниже. В программе производится считывание таблицы значений ВАХ из текстового файла за счёт использования функции READPRN, строится график ВАХ и рассматривается введённая таблица данных:

VAX := READPRN("d:\Diod_mA.dat")



VAX =

	0	1
0	0	0
1	0.02	3.9·10 ⁻⁵
2	0.039	7.8·10 ⁻⁵
3	0.059	1.18·10 ⁻⁴
4	0.078	1.57·10 ⁻⁴
5	0.098	1.96·10 ⁻⁴
6	0.118	2.35·10 ⁻⁴
7	0.137	2.75·10 ⁻⁴
8	0.157	3.14·10 ⁻⁴
9	0.176	...

length(VAX⁽¹⁾) = 51

+

Рисунок 17

Здесь определяется длина введённой таблицы и показывается возможность обращения к любому элементу таблицы, как к значениям тока, так и значениям напряжения. После чего рассчитываются по упрощённым формулам параметры модели. Но плотность данных (число точек) полученных в процессе эксперимента может не удовлетворить расчёт - значения тока и напряжения, которое соответствует условиям половинного тока и одной четвертой тока, не будут найдены. Например, не найдены токи в исходной таблице,

которые соответствуют значениям тока одна четвертая максимального и одна вторая максимального, даются лишь ближайшие точки (индексы) искомым значениям:

$$\begin{aligned} Id3 &:= \max(VAX^{(1)}) & Id3 &= 0.023 \\ \text{Значение индекса максимального тока} & & nMax &:= \text{match}(Id3, VAX^{(1)}) \\ & & nMax &= (50) \\ \text{Значение максимального напряжения для максимального тока} & & & \\ Ud3 &:= (VAX^{(0)})_{50} & Ud3 &= 0.772 \\ nId1 &:= \text{match}\left(\frac{Id3}{4}, VAX^{(1)}\right) & nId2 &:= \text{match}\left(\frac{Id3}{2}, VAX^{(1)}\right) \\ nId1 &= \begin{pmatrix} 37 \\ 38 \end{pmatrix} & nId2 &= \begin{pmatrix} 42 \\ 43 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Рисунок 18

Поэтому может потребоваться интерполяция между узловыми точками графика для определения значений пары ток и напряжение для заданного тока в расчёте.

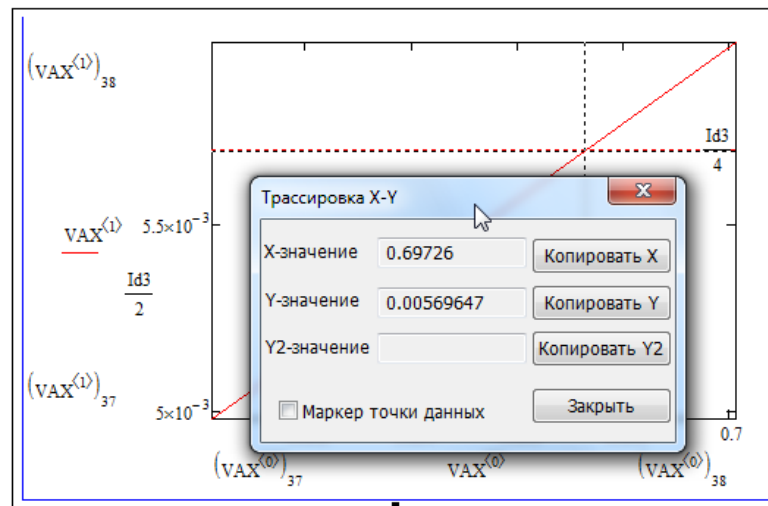
$$\begin{aligned} Ud1 &:= \text{linterp}\left(VAX^{(1)}, VAX^{(0)}, \frac{Id3}{4}\right) & Ud1 &= 0.697 & Id1 &:= \frac{Id3}{4} \\ Ud2 &:= \text{linterp}\left(VAX^{(1)}, VAX^{(0)}, \frac{Id3}{2}\right) & Ud2 &= 0.733 & Id2 &:= \frac{Id3}{2} \\ Rb &:= \frac{(Ud1 - 2 \cdot Ud2 + Ud3)}{Id1} & Rb &= 0.414 \\ NFt &:= \frac{[(3 \cdot Ud2 - 2 \cdot Ud1) - Ud3]}{\ln(2)} & NFt &= 0.049 \\ Is0 &:= Id1 \cdot \exp\left[\frac{-1}{NFt} \cdot (2 \cdot Ud1 - Ud3)\right] & Is0 &= 1.572E-008 \end{aligned}$$

Рисунок 19

Но можно, отказавшись при трассировки от следования узловым точка, приближенно определить значения из графика ВАХ (обратите внимание на то, что маркер точки данных отключен):

$$\frac{Id3}{4} = 5.704 \times 10^{-3}$$

вычисленное значение тока Id1



$Id1 := 0.00570438$

определенное значение тока Id1 и напряжения Ud1

$Ud1 := 0.69735$

Рисунок 20

ПОСТРОЕНИЕ ВАХ ЗАДАННОГО ТАБЛИЦЕЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ НА ОДНОМ ГРАФИКЕ

Адекватность модели, то проверку на «одинаковость» графиков модели и эксперимента, можно провести, построив на одном графике ВАХ экспериментальную и ВАХ модельную. Так построение графика, заданного функциональной зависимостью, показано на листинге:

$$I_d = I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{U_d - I_d \cdot R_b}{N F_t}\right) - 1 \right)$$

Запись уравнения
для модели
диода U_d

имеет решение(я)

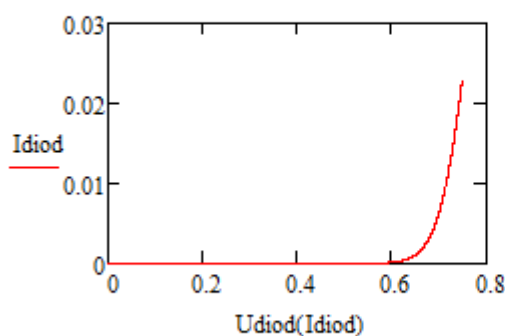
$$N F_t \cdot \ln\left(\frac{I_d + I_o}{I_o}\right) + I_d \cdot R_b$$

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА ВАХ ДИОДА ПО ФОРМУЛЕ:

$$R_b := 1 \quad N F_t := 0.0255 \quad I_{s0} := 10^{-14}$$

$$I_{diod} := 0, 10^{-5} \dots 0.023 \quad \text{ранжированная переменная тока диода}$$

$$U_{diod}(I_{diod}) := I_{diod} \cdot R_b + N F_t \cdot \ln\left(\frac{I_{diod} + I_{s0}}{I_{s0}}\right)$$



$I_{diod} =$

0.00000
0.00001
0.00002
0.00003
0.00004
0.00005
0.00006
0.00007
0.00008
0.00009
...

+

Рисунок 21

Но, для реализации проверки правильности расчета модели диода, должен быть построен график, на котором будут присутствовать две кривые – исходная и модельная ВАХ. На графике должны совместиться исходная кривая, представленная входными табличными данными и график модели определенной формулой. Для этого в формулу следует подставлять табличные значения тока, а по формуле будет вычислено значения

напряжения. Совместив два этих графика можно получить сравнение эксперимента и данных расчета по модели. Ниже показано как в MCAD получено выражение для напряжения на диоде из формулы, в которой переменные ток и напряжение не разделены

левая часть уравнение вида $F(x)=0$ для модели полупроводникового диода запишется как:

$$IS \cdot \left[\exp \left[\frac{(U_d - Id \cdot R_b)}{m \cdot Ft} \right] - 1 \right] - Id$$

Решение $F(x)=0$ для переменной U_d .

$$Id \cdot R_b + \ln \left[\frac{(IS + Id)}{IS} \right] \cdot m \cdot Ft = U_d,$$

которое получено **Символика- Переменная- Решение:**

$$Id \cdot R_b + \ln \left[\frac{(IS + Id)}{IS} \right] \cdot m \cdot Ft$$

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА ВАХ МОДЕЛИ И ИСХОДНЫХ ТАБЛИЧНЫХ ДАННЫХ:

$R_{b1} := 1.2$ $N_{ft1} := 0.0255$ $Is_{01} := 22.7 \cdot 10^6$ данные расчета

Ранжированная переменная Id_{iod}

$$Id_{iod} := 0, 10^{-5} \dots 0.023 \quad U_{formula}(Id_{iod}) := Id_{iod} \cdot R_{b1} + N_{ft1} \cdot \ln \left(\frac{Id_{iod} + Is_{01}}{Is_{01}} \right)$$

Чтение данных из файла эксперимента и переопределение значений тока:

$$VAX := READPRN("ВАХ ДИОДА ПРЯМАЯ ВЕТВЬ.DNO") \quad Id_{iod} := VAX^{(1)}$$

$$VAX^{(0)} =$$

	0
0	0.40000
1	0.40700
2	0.41400
3	0.42100
4	0.42800
5	...

$$VAX^{(1)} =$$

	0
0	0.00000
1	0.00000
2	0.00000
3	0.00000
4	0.00000
5	...

$$Id_{iod} =$$

	0
0	0.00000
1	0.00000
2	0.00000
3	0.00000
4	0.00000
5	...

Проверка по напряжению модели и эксперимента $(VAX^{(0)})_{45} = 0.71500$

$$I_{proverka} := (VAX^{(1)})_{45} \quad (VAX^{(1)})_{45} = 0.04704 \quad U_{formula}(I_{proverka}) = 0.05645$$

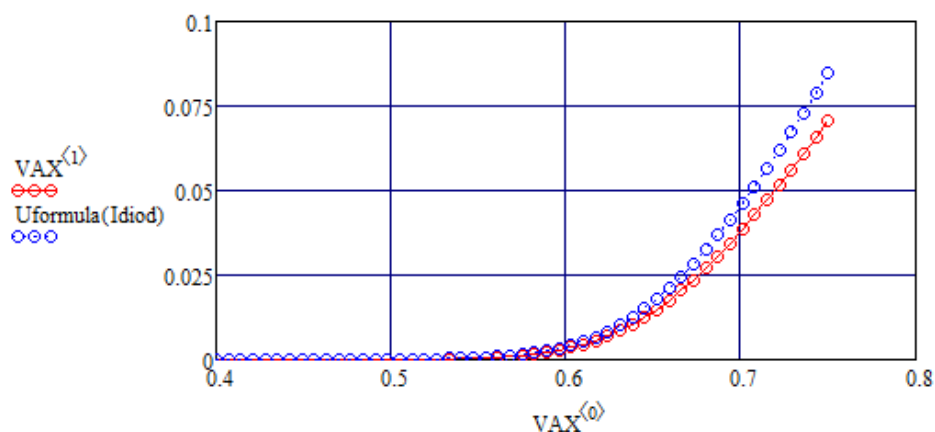


Рисунок 22

Проверить совпадение можно с использованием приема трассировки графика средствами MCAD. Для этого необходимо, после выбора графика, перейти в меню Формат->Графики->Трассировка

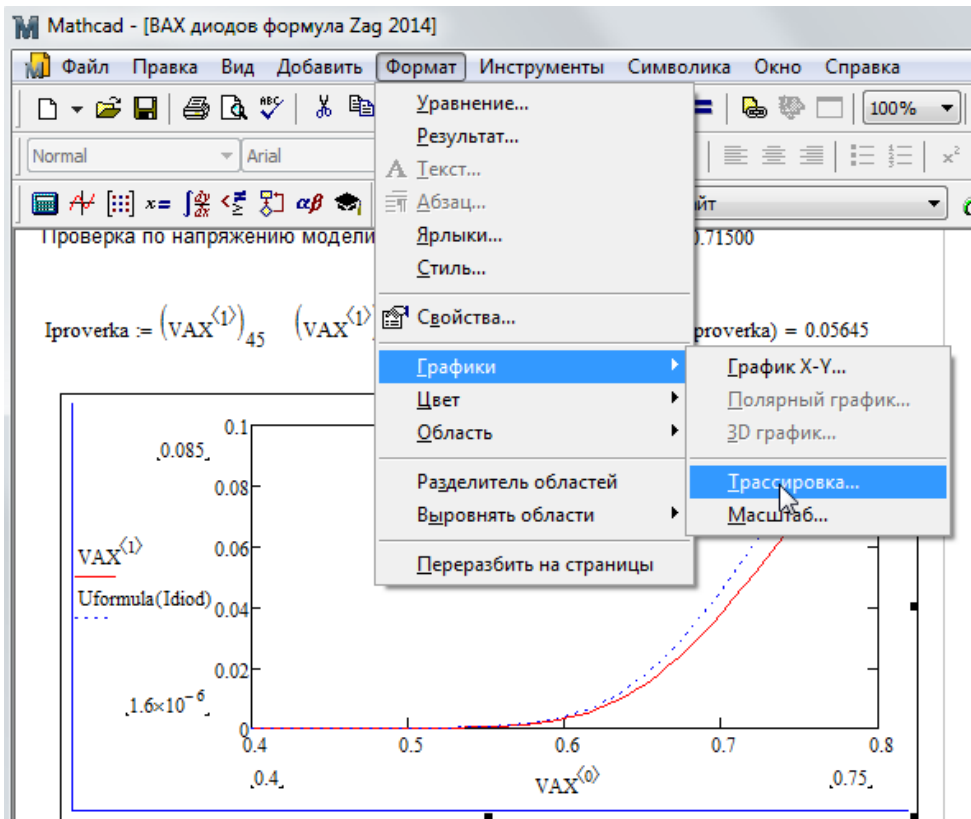


Рисунок 23

Перемещая курсор внутри графика можно определить значения тока и напряжения как для первого, так и второго графика:

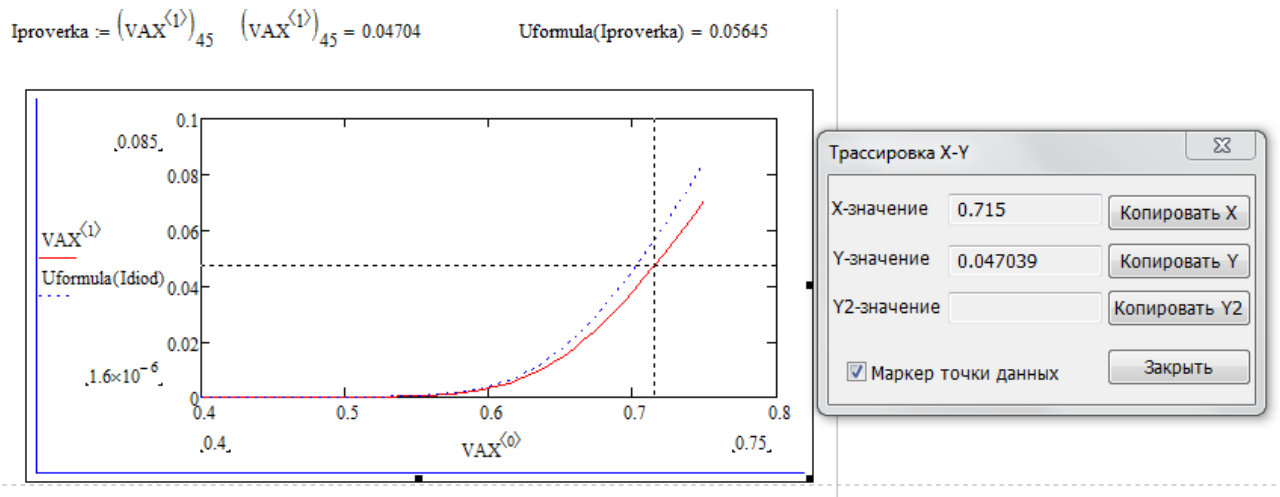


Рисунок 24

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БАРЬЕРНОЙ ЕМКОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИ ДИОДА

Резонансная частота параллельного колебательного контура (рис. 25) может быть подсчитана внутри программы Microcap – встроенным калькулятором,

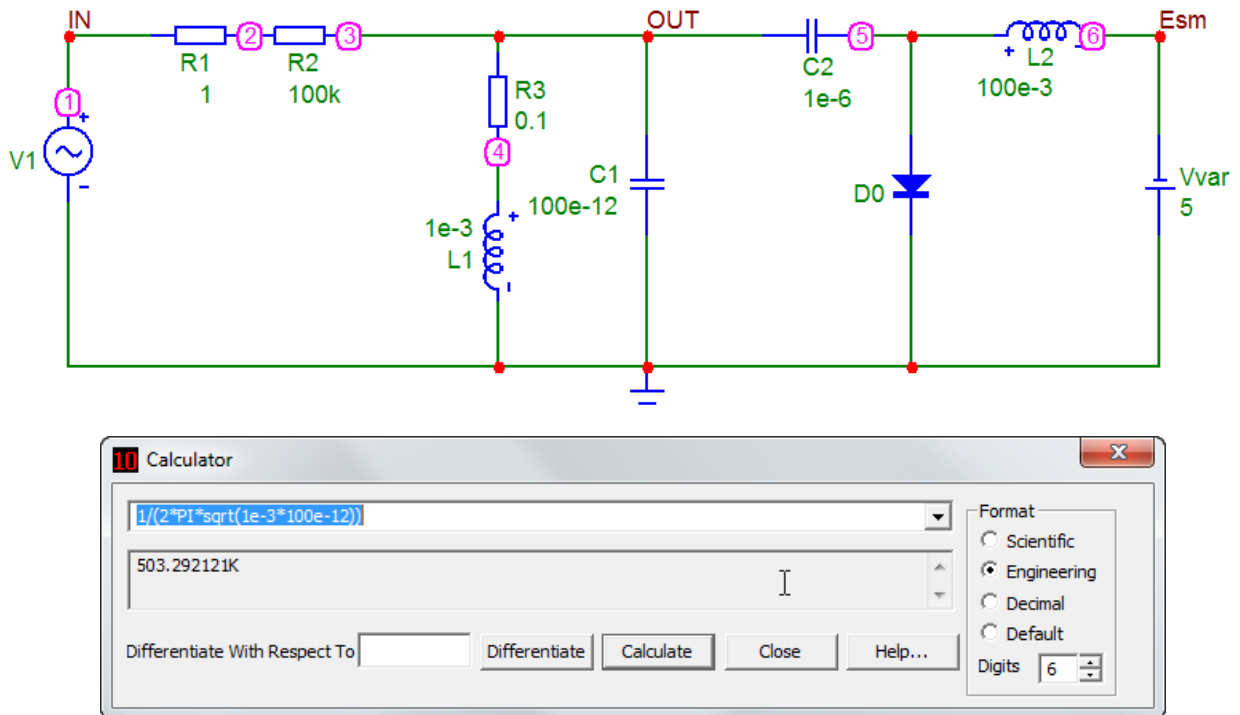


Рисунок 25

Проведение анализа по переменному току начинается с заполнения полей диалоговое окно пределов частотного анализа, где определяют его параметры, рис. 26

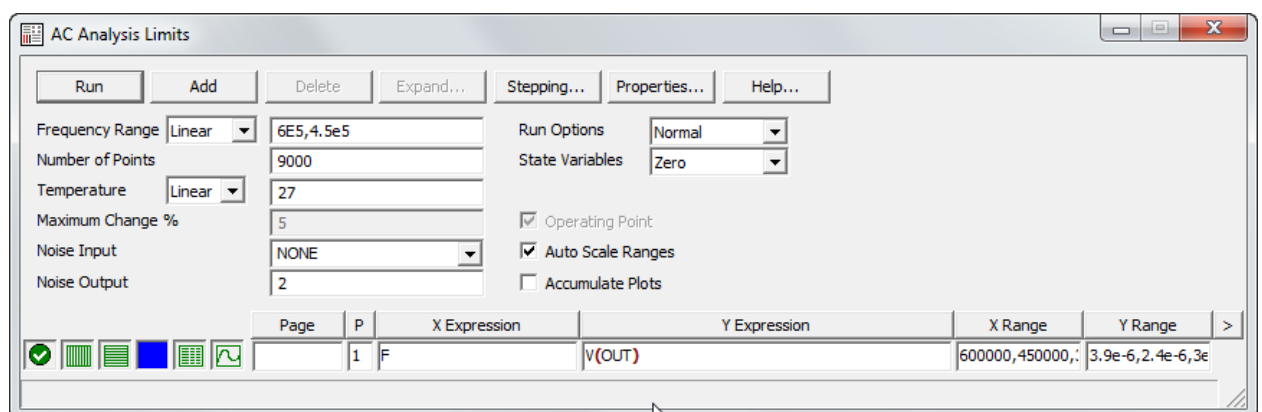


Рисунок 26

Frequency Range – задает пределы анализа по форме Fmax, Fmin, и, в зависимости от метода изменения частоты (Auto, Linear) задаются пределы изменения выходной функции (Maximum Change %) от точки к точке, или же число точек в сеансе расчета (Number of Points). Пределы анализа должны быть выбраны так, чтобы резонансная

частота контура лежала бы в пределах от F_{\max} до F_{\min} . Вид полученного решения показан ниже на рис.27:

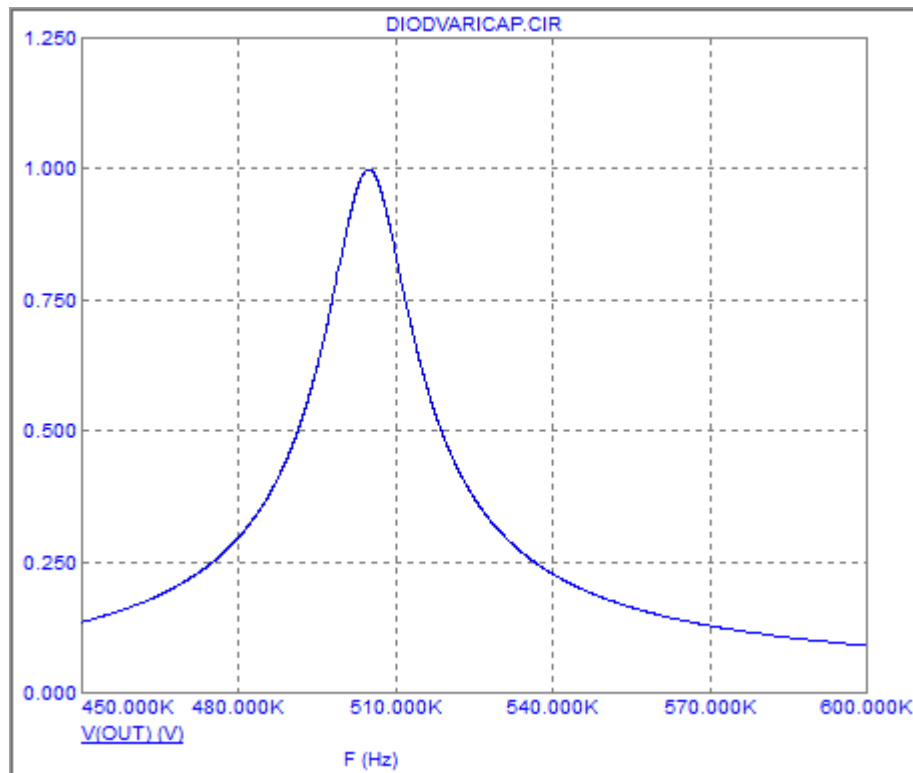


Рисунок 27

Задавая значение напряжения источника управления V_{var} можно получить зависимость резонансной частоты от значения напряжения. Иногда выгодно включить многовариантный режим анализа, используя возможности режима Stepping...(доступ к режиму возможен либо через меню АС анализа, или за счёт нажатия экранной кнопки Stepping, или горячей клавиши F11), рис.28.

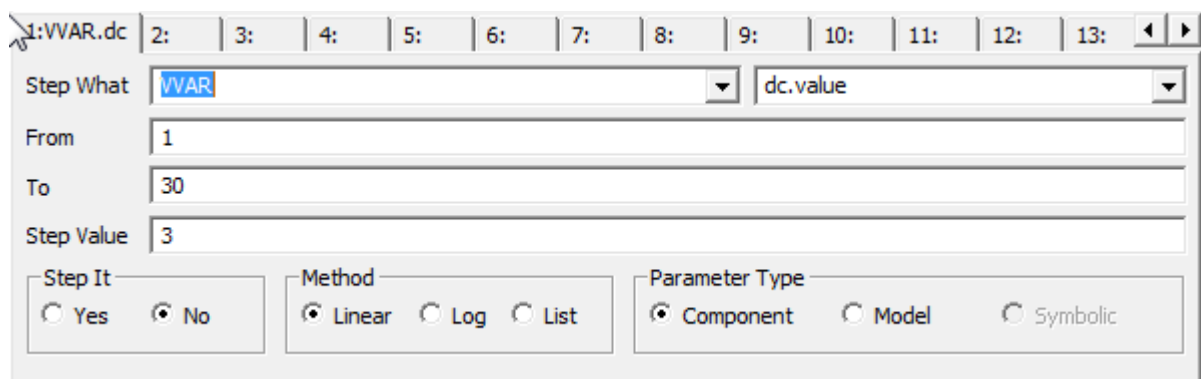


Рисунок 28

В диалоге задаётся параметр изменяемого компонента (Step What), границы изменения параметра (From, To, Step Value). В результате решения будут получены несколько резонансных кривых, соответствующих указанным значениям напряжения управления.

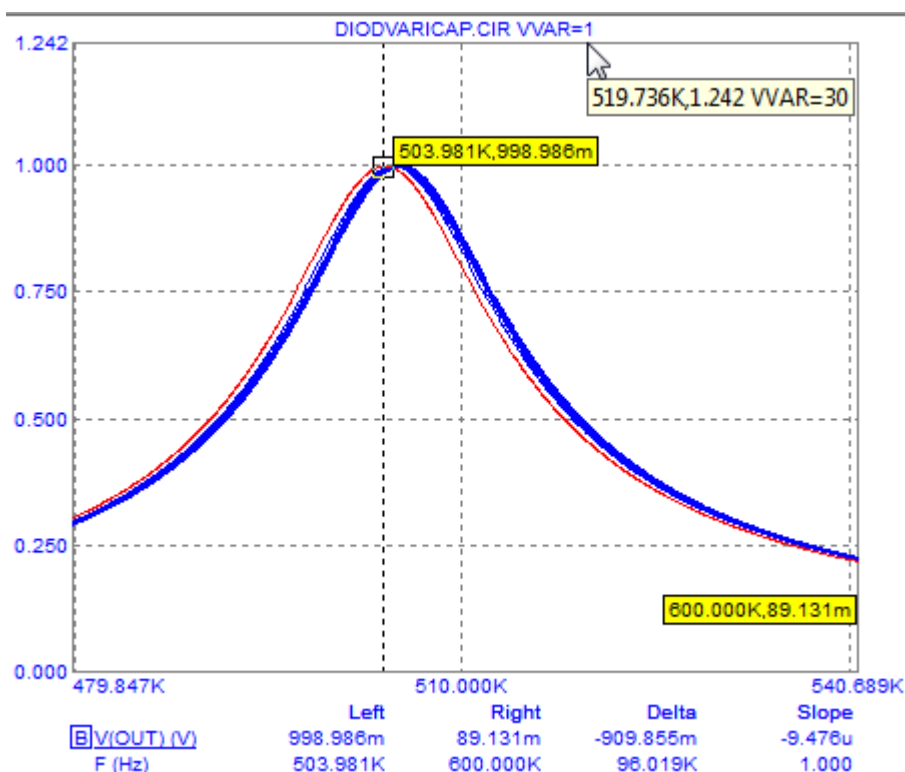


Рисунок 29

В режиме работы с курсорами в заголовке окна результата можно будет увидеть значение напряжения V_{var} , и, установив курсор в максимум кривой, получить значение резонансной частоты. Имя значения резонансной частоты и значения напряжения смещения можно рассчитать вольтфарадную характеристику.

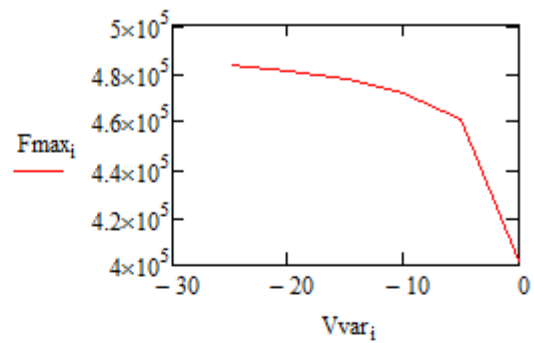
Поскольку резонансная частота определяется по формуле Томпсона, из этой формулы можно вычислить значение ёмкости диода для напряжения управления и построить вольтфарадную характеристику. Вид фрагмента программы *MCAD* показан ниже на рисунке:

$i := 0..5$
 $F_{\max_i} :=$

401560
460612
471594
477175
480596
482937

 $V_{\text{var}_i} :=$

0
-5
-10
-15
-20
-25



$$Fr = \frac{1}{[2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(Ck + Cd) \cdot Lk}]}$$

Решение относительно Cd

$$Ck \cdot Lk - \frac{1}{4 \cdot Fr^2 \cdot \pi^2}$$

$$Lk := 10^{-3}$$

$$Ck := 10^{-10}$$

$$\pi := 3.14$$

$$Fr_i := F_{\max_i}$$

$$Cd := \frac{Ck \cdot Lk - \frac{1}{4 \cdot Fr^2 \cdot \pi^2}}{Lk}$$

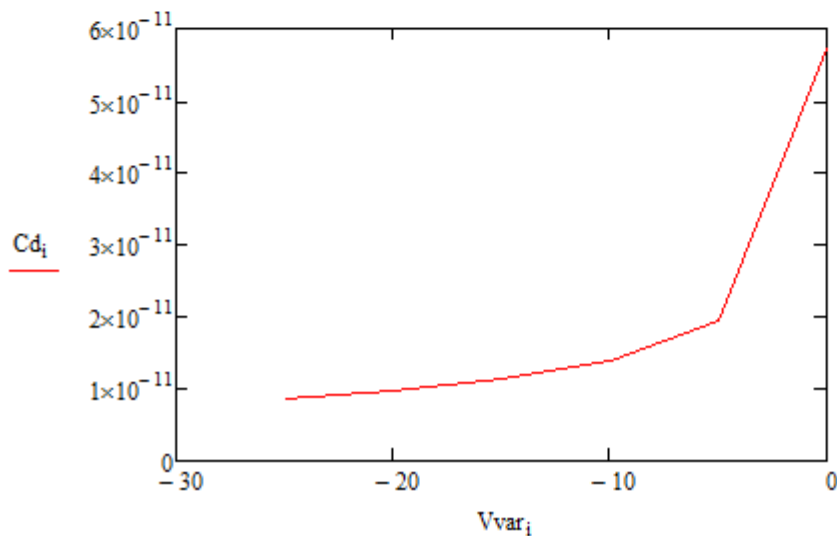


Рисунок 30

Расчёт параметров барьерной ёмкости можно провести с использованием возможностей MCAD – решение системы нелинейных уравнений с использованием вычислительного блока Given-Find или Given-Minerr.

В качестве примера можно предложить решение системы, для которой предварительно была построена вольтфарадная характеристика

$$M := 0.5 \quad VJ0 := 0.6 \quad CJO := 10^{-12}$$

$$U := -10, -8..0$$

$$Cd(U) := CJO \cdot \left(1 - \frac{U}{VJ0}\right)^{-M}$$

$Cd(U) =$	$U =$
$2.379 \cdot 10^{-13}$	-10
$2.641 \cdot 10^{-13}$	-8
$3.015 \cdot 10^{-13}$	-6
$3.612 \cdot 10^{-13}$	-4
$4.804 \cdot 10^{-13}$	-2
$1 \cdot 10^{-12}$	0

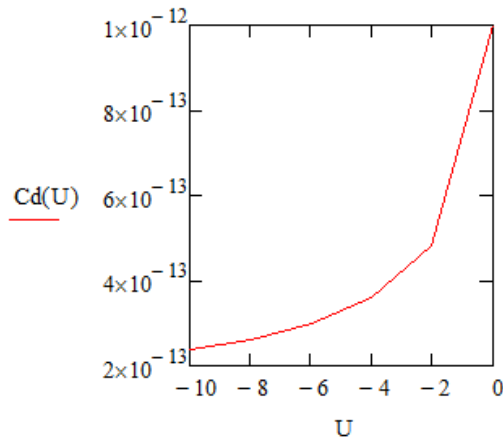


Рисунок 31

Собственно, решение системы будет выглядеть так:

Given	Given
$\left(2.379 \times 10^{-13}\right) = CJO \cdot \left(1 - \frac{-10}{VJ0}\right)^{-M}$	$\left(2.379 \times 10^{-13}\right) = CJO \cdot \left(1 - \frac{-10}{VJ0}\right)^{-M}$
$\left(4.804 \times 10^{-13}\right) = CJO \cdot \left(1 - \frac{-2}{VJ0}\right)^{-M}$	$\left(4.804 \times 10^{-13}\right) = CJO \cdot \left(1 - \frac{-2}{VJ0}\right)^{-M}$
$\left(3.612 \times 10^{-13}\right) = CJO \cdot \left(1 - \frac{-4}{VJ0}\right)^{-M}$	$\left(3.612 \times 10^{-13}\right) = CJO \cdot \left(1 - \frac{-4}{VJ0}\right)^{-M}$
$\left(3.015 \times 10^{-13}\right) = CJO \cdot \left(1 - \frac{-6}{VJ0}\right)^{-M}$	$\left(3.015 \times 10^{-13}\right) = CJO \cdot \left(1 - \frac{-6}{VJ0}\right)^{-M}$
$\text{find}(CJO, VJ0, M) = \begin{pmatrix} 9.982 \times 10^{-13} \\ 0.604 \\ 0.501 \end{pmatrix}$	$\text{minerr}(CJO, VJ0, M) = \begin{pmatrix} 9.982 \times 10^{-13} \\ 0.604 \\ 0.501 \end{pmatrix}$

Рисунок 32

Параметр модели EG - ширина запрещённой зоны зависит от материала диода: для кремния EG= 1.1 эВ; для германия EG = 0.67 эВ.

ВКЛЮЧЕНИЕ МОДЕЛИ В БАЗУ ДАННЫХ

Для включения модель в базу данных программы Microcap САПР используются файлы специальных форматов. Один из самых распространённых форматов - формат PSPICE. Расширение файла с описанием модели в этом формате - «LIB». Текстовый файл может быть прочитан и отредактирован любым текстовым редактором и средствами Microcap. Для открытия файла в среде Microcap используется меню Open

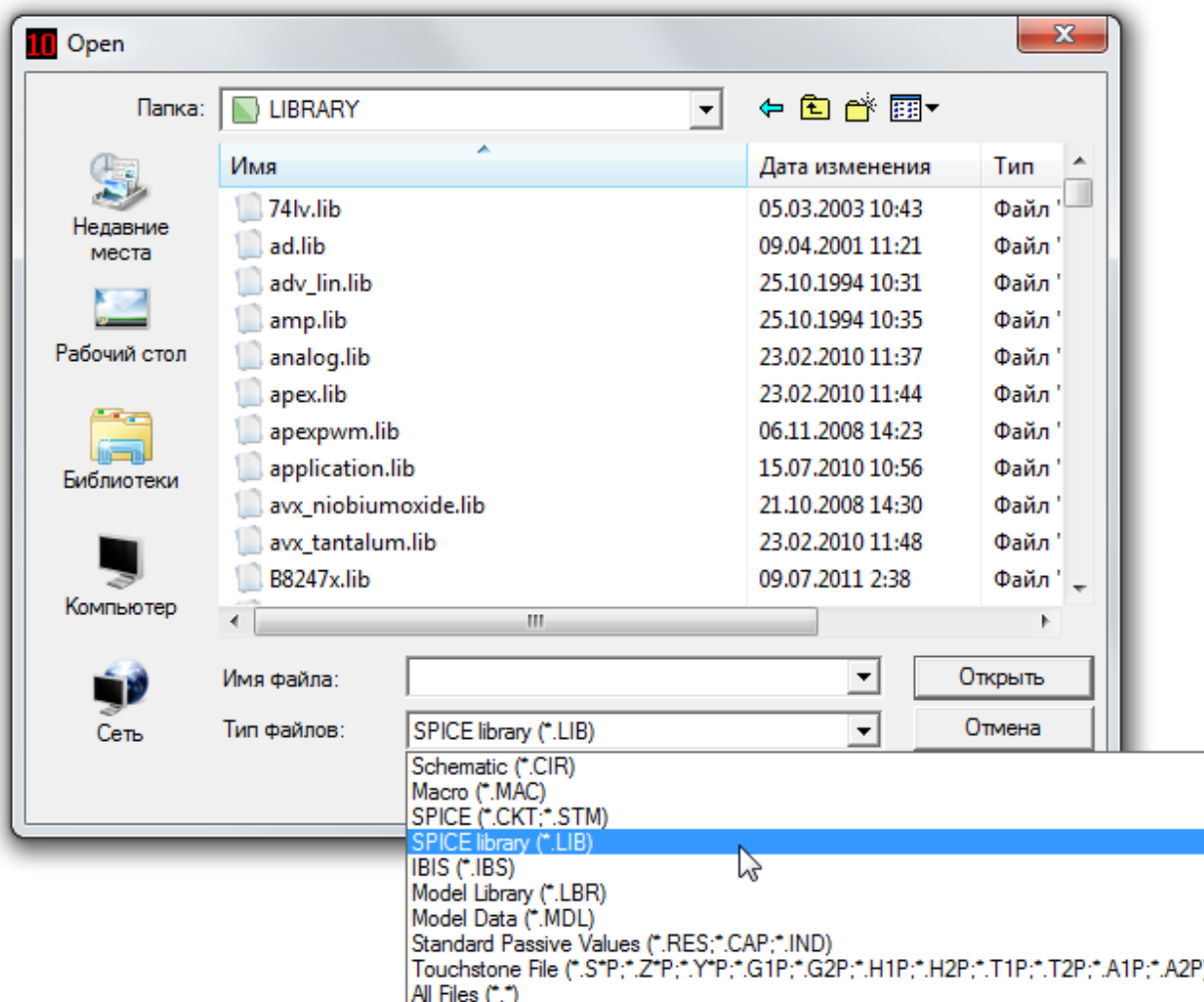


Рисунок 33

Строка в файле, где в первой позиция расположен символ звездочка «*» означает, что это строка комментариев и не принимается в расчёт для описания модели. Первая позиция строки со символом точка «.» означает начало описания модели. Первой в этой строке идёт служебная директива «.model» и указание на имя модели. После имени модели идёт символ «D», указывающий на то, что это модель диода. В скобках идёт

описание параметров: параметр и его значение. Символ «+» в первой позиции следующей строки означает продолжение предыдущей.

Вид фрагмента текстового файла с описанием модели диода в простом текстовом редакторе и текстовом редакторе Мисросар показан на рисунке

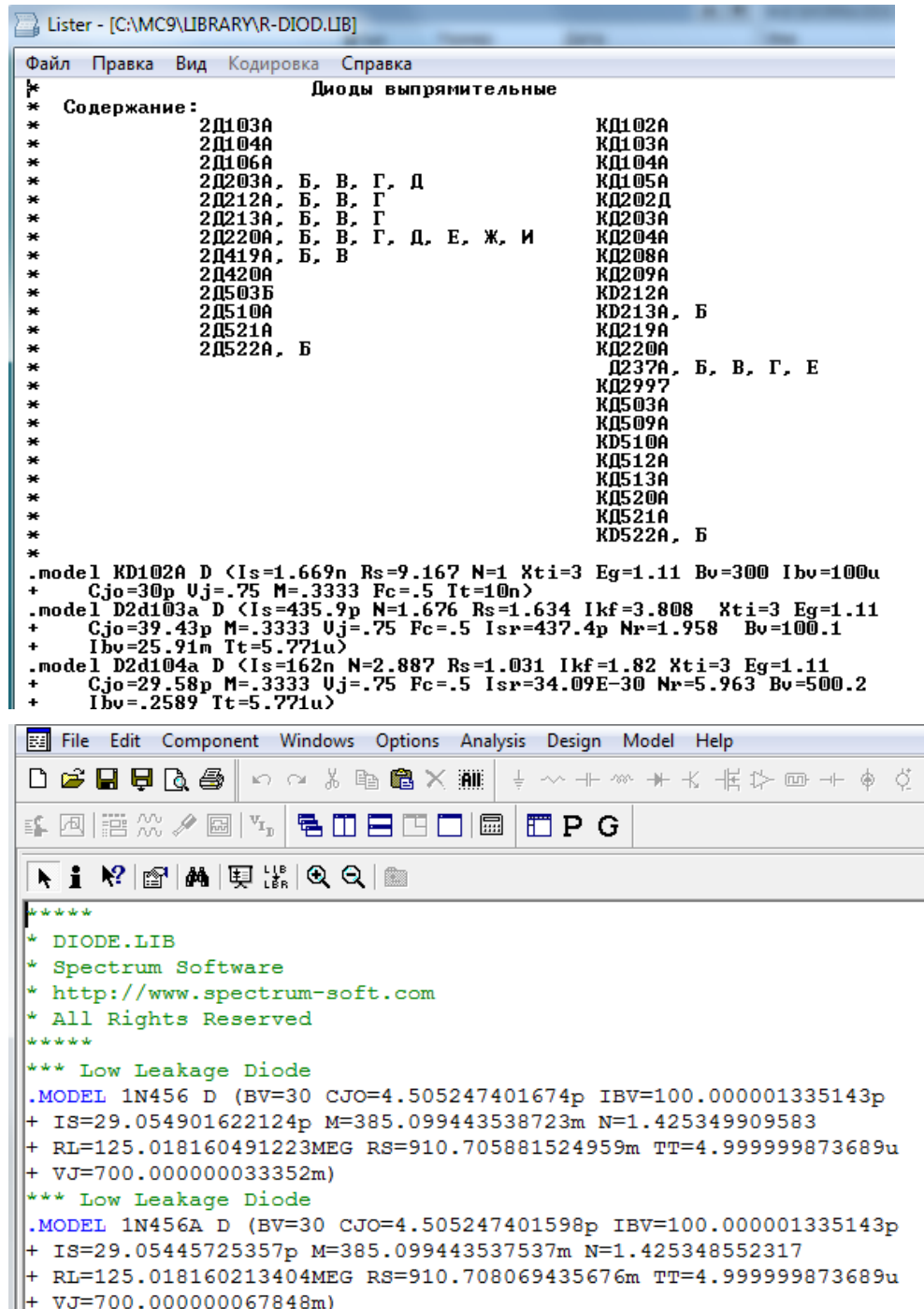


Рисунок 34

Если в описание модели будут отсутствовать какие-либо параметры, то программа Мисросар сама дополнит модель значением этого параметра по «умолчанию». Поэтому даже если описание будет содержать только статические параметры, то модель считается рабочей и будет воспринята программой.

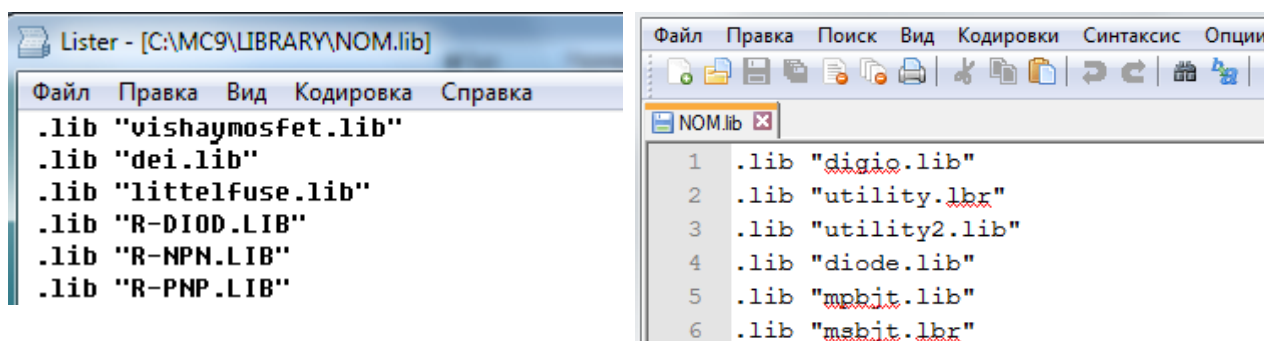


Рисунок 35

Далее модель должна быть подсоединена к базе данных программ. Для программы Microcap это осуществляется указанием имени файла и пути до него в файле «NOM.lib». Другими словами, в файл NOM.LIB дописывается информация о файле, причем, если этот файл расположен в папке LIBRARY, то указывается только имя файла, если же файл расположен в другом месте, то прописывается полный путь до файла. Этого достаточно для начала работы с моделью.

Существует возможность указать Microcap на модель не включая ее через «NOM.lib», а используя следующий приём. Описание модели диода из файла копируется в буфер обмена, а затем вставляется на закладку Text главного окна Microcap, после чего модель диода становится доступной для использования в программе Microcap (но только при использовании этого файла описания схемы).

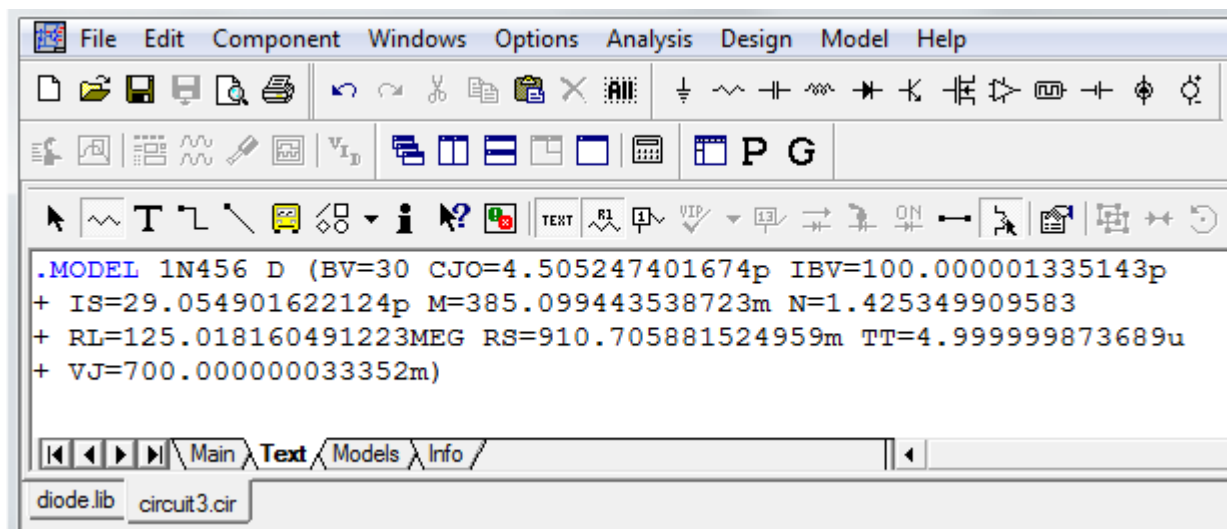


Рисунок 36

На закладке Text можно указать ссылку на файл библиотеку.

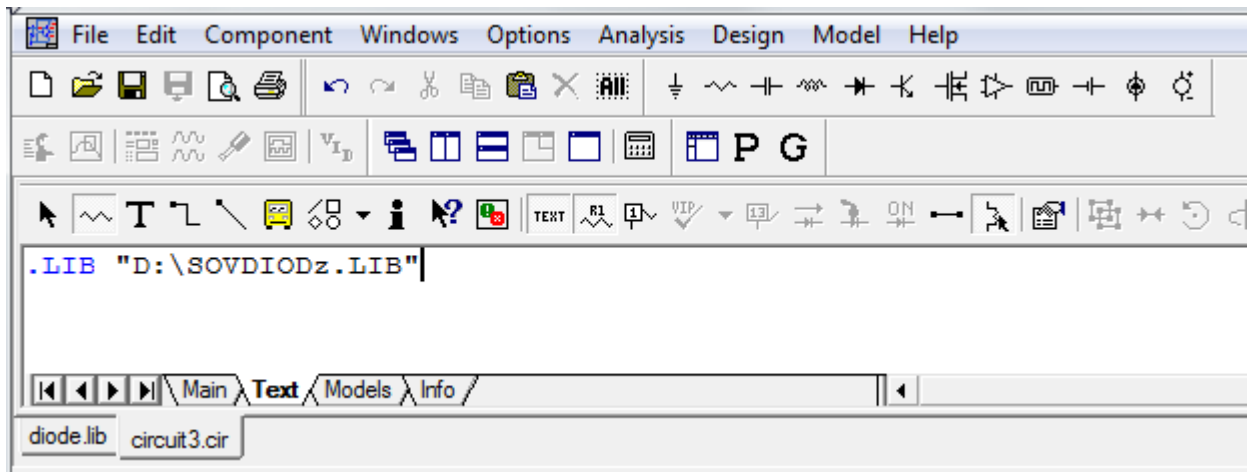


Рисунок 37

Такой приём позволит иметь доступ ко всем элементам библиотеки, но, опять же только при использовании этого файла описания схемы.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

В отчете следует привести цель и задачи работы, краткую методику проведения экспериментов, как при моделировании, так и при работе на физическом стенде.

Экспериментальные прямые ветви ВАХ для двух диодов (кремниевый и германиевый диоды) приводятся как с линейным масштабом для напряжения и тока, так и с полулогарифмическим (линейный для напряжения и логарифмический для тока). Построение экспериментальных ВАХ и определение по ним параметров диода, с помощью которых строятся его эквивалентные схемы, рекомендуется проводить с использованием математического пакета MCAD. Получение ВФХ желательно снабдить пояснением работы MCAD в режиме аналитических вычислений. Выбор методов численного решения остается за студентом, желательно этот выбор пояснить.

Проверка адекватности результатов построения модели осуществляется по сравнению ВАХ модельной и экспериментальной. К параметрам модели диода динамическим (барьерная и диффузионная компоненты) особых требований по точности не предъявляется.

В отчёте должно присутствовать содержимое файлов библиотеки созданных моделей диода в формате *.LIB.

В общем случае последовательность действий, при формировании отчёта по практикуму должно соответствовать диаграмме:



Рисунок 38

ЛИТЕРАТУРА. ОСНОВНАЯ.

1. Загидуллин Р.Ш. Лабораторный практикум по курсам «Дополнительные главы Информатики», «Основы Электроники». Часть 1. 1 Введение в работу с программой MCAD. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. – 73 с. ил
2. Марченко А. Л. Основы электроники. Учебное пособие для вузов/А. Л. Марченко. — М.: ДМК Пресс. 2008. — 296 с. ил. Табл. 25. Ил. 252. Библиогр. 26 назв. ISBN 978-5-94074-432-0
1. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. - Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. -617 с, ил.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 2-х томах. Пер. с англ.-М.: Мир, 1983. - т. 1. 598 с: ил.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 2-х томах. Пер. с англ.-М.: Мир, 1983. -т.2. 590 с: ил.
4. Гурский Д. А. Турбина Е. С. Вычисления в MCAD 12. — СПб.: Питер. 2006. — 544 с.: ил. ISBN 5-469-00639-6
5. Хернитер Марк К. Multisim 7: Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств. (Пер. с англ.) / Пер. с англ. Осипов А.И. - М.; Издательский дом ДМК-пресс, 2006. 488 с: ил..

ЛИТЕРАТУРА. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

6. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и PSpICE для схемотехнического моделирования на ПЭВМ, В 4 выпусках. - М.: Радио и связь, 1992год.
7. MCAD 6.0 PLUS Финансовые, инженерные и научные расчеты в среде Windows-95. Перевод с англ. - М.: Информационно-издательский дом «Фи-линь», 1996. - 712 с.