

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 Семинары**

Электронное учебное издание

**Полупроводниковые диоды**

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

Часть 1 Исследование в Мисгосар и лабораторные исследования

Москва

(С) 2014 МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

УДК 517.31

*Рецензент:*

**Загидуллин Р.Ш.**

Лабораторный практикум по курсу Электроника. Семинары Полупроводниковые диоды - М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, Часть 1 Исследование в Microcap и лабораторные исследования 2015. 74 с.

*Электронное учебное издание*

**Загидуллин Равиль Шамильевич**

**Лабораторный практикум по курсу Электроника. Семинары  
Полупроводниковые диоды**

© 2015 МГТУ имени Н.Э. Баумана

## **СОКРАЩЕНИЯ ТЕРМИНОВ, АББРЕВИАТУРЫ**

ВАХ — вольтамперная 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

<b>СОКРАЩЕНИЯ ТЕРМИНОВ, АББРЕВИАТУРЫ .....</b>	<b>3</b>
<b>ЭКСПЕРИМЕНТ 1 .....</b>	<b>7</b>
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ В СРЕДЕ MICROCAP .....	7
ИССЛЕДОВАНИЕ ВФХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ В СРЕДЕ MICROCAP .....	8
<b>ЭКСПЕРИМЕНТ 2 .....</b>	<b>8</b>
Включение модели в базу данных .....	9
ИЗМЕРЬТЕ ПРЯМЫЕ ВЕТВИ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ. ....	15
ИЗМЕРЬТЕ ОБРАТНЫЕ ВЕТВИ ВАХ ДИОДОВ. ....	17
АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕШЕНИЯ ТРАДИЦИОННОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА.....	19
Особенности построения графиков решений в Microcap .....	21
Вывод данных моделирования измерительного стенда Microcap в текстовый файл .....	22
РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДИОДА .....	25
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА .....	32
РЕШЕНИЕ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ .....	35
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА МЕТОДОМ ТРЕХ ОРДИНАТ.....	40
Работа с программой MODEL для создания модели диода .....	47
Построение вольтфарадной характеристики в программе MathCAD .....	56
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ИХ СВОЙСТВА .....	61
ДИОД ВАРИКАП.....	64
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТИ ДИОДА .....	67
ЛИТЕРАТУРА. ОСНОВНАЯ.....	73

Литература. Дополнительная .....	74
----------------------------------	----

**ТЕМА СЕМИНАРОВ:**

моделирование лабораторных исследований в программах схемотехнического моделирования, расчёт параметров модели по результатам моделирования, внесение параметров модели диода в базу данных программ схемотехнического моделирования. Приобретение навыков в использовании базовых возможностей программ схемотехнического анализа для исследования статических и динамических характеристик полупроводниковых диодов с последующим расчетом параметров модели полупроводникового диода. Приобретение навыков в исследовании полупроводниковых приборов и освоение математических программ расчета параметров модели полупроводниковых приборов на основе проведенных экспериментальных исследований и включении его модели в базу компонентов

## ЭКСПЕРИМЕНТ 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ В СРЕДЕ MICROPSAR

- 1) Для заданного варианта типа диода провести моделирование лабораторного стенда получения ВАХ диода в программе Microcar как на прямой ветви, так и на обратной ветви по показанным ниже схемам.

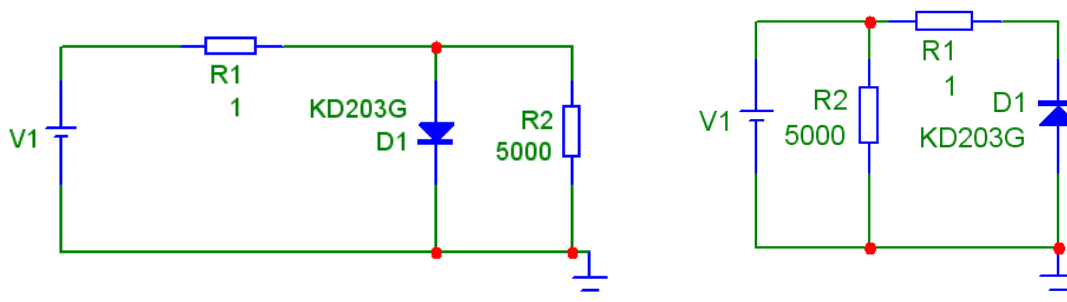


Рисунок 1

*Примечание:*

- Номер варианта определяется номером в списке группы,
  - Тип диода определяется номером диода по списку в файле библиотеки *Rusd.Lib*, причём, для группы 31 номера вариантов и номера диодов совпадают, для группы 32 номер диода и номер варианта соотносятся как (номер диода по списку) = (номер варианта)+25, для группы 33 тип диода определяется номером диода по списку в файле библиотеки *SovDiod.lib*
- 2) Экспериментально определить влияние сопротивлений измерительных приборов (милливольтметра и миллиамперметра, сопротивление которых может быть в пределах от 1000 Ом до 100000 Ом и от 0.1 до 10 Ом соответственно). Дать пояснения полученным результатам и рекомендации по использованию схем получения ВАХ.
  - 3) Полученные данные ВАХ сохранить в виде текстового файла на жёстком диске.
  - 4) Данные ВАХ передать в программу MathCAD и определить параметры модели диода для постоянного тока: определить параметры модели диода RS, IS, Ft, N. Сравнить полученные данные с параметрами модели в библиотеки.

- 5) Проверить адекватность модели проверить по графику прямой ветви ВАХ, добившись совпадения ВАХ модели и ВАХ данных MC9demo с точностью до 10% по току для напряжения 1А Вольта на прямой ветви.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВФХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ В СРЕДЕ MICROPSAP

- 1) Для заданного варианта типа диода (аналогично выбору в первой части работы) провести моделирование лабораторного стенда получения ВАХ диода в программе Microcap 9 demo как на прямой ветви, так и на обратной ветви по предложенной ниже схеме эксперимента для измерения амплитудно-частотной характеристики параллельного колебательного контура:

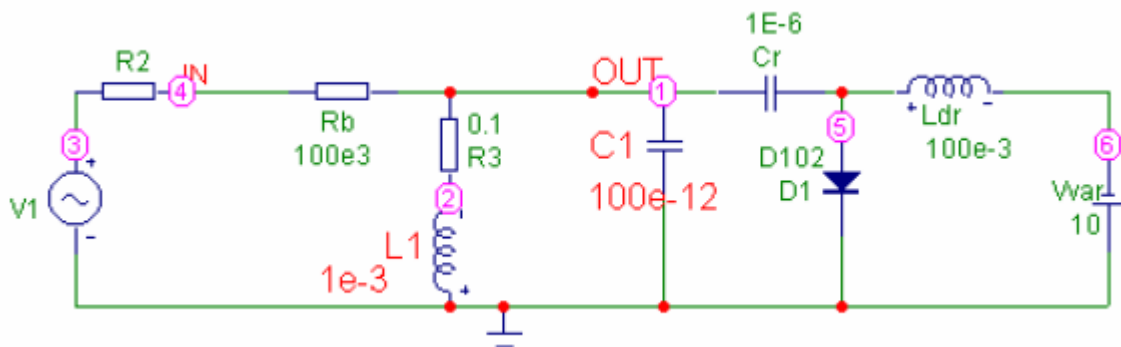


Рисунок 2

- 2) Провести моделирование схемы в программе Microcap 9 demo (анализ частотных характеристик) для не менее четырёх значений напряжения смещения. Полученные амплитудно-частотные характеристики использовать для расчёта барьерной ёмкости диода. Передать данные о резонансных частотах параллельного колебательного контура в программу MathCAD и провести расчёт и построить *вольтфарадную характеристики*. Из неё определить параметры модели диода (CJO, M, VJ) с использованием программного средства MCAD.
- 3) Адекватность модели проверить по степени совпадения расчётных данных и данных модели в библиотеке. Оценить и объяснить полученные данные.

## ЭКСПЕРИМЕНТ 2

- 1) Использовать полученные данные расчёта для формирования файла модели (файл с расширением \*.LIB) и включения полученной модели в состав базы данных



программы Microcap. Для расчетов параметров модели использовать возможности программы MODEL. Дать пояснения предлагаемым вариантам.

## 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

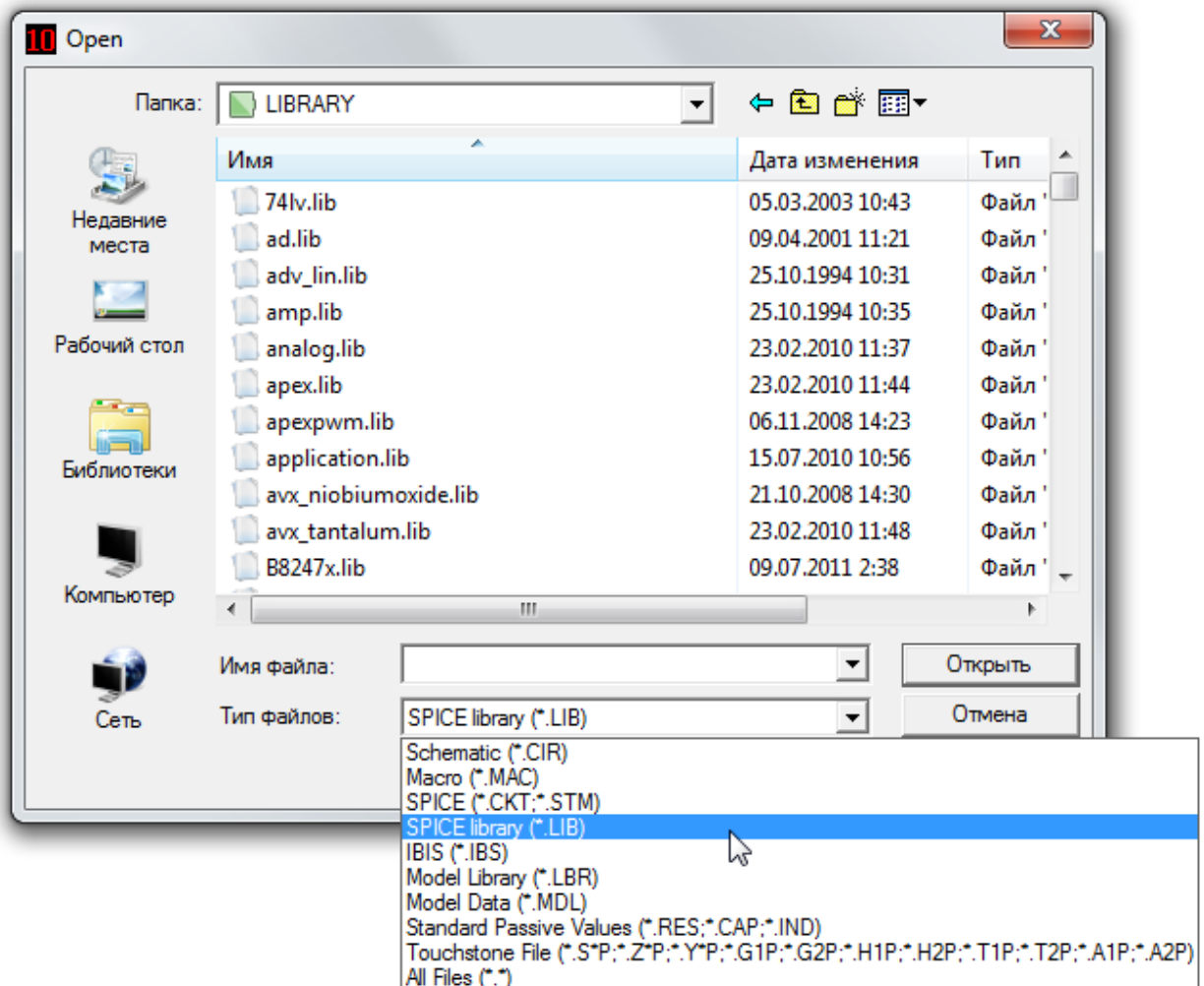


Рисунок 3

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

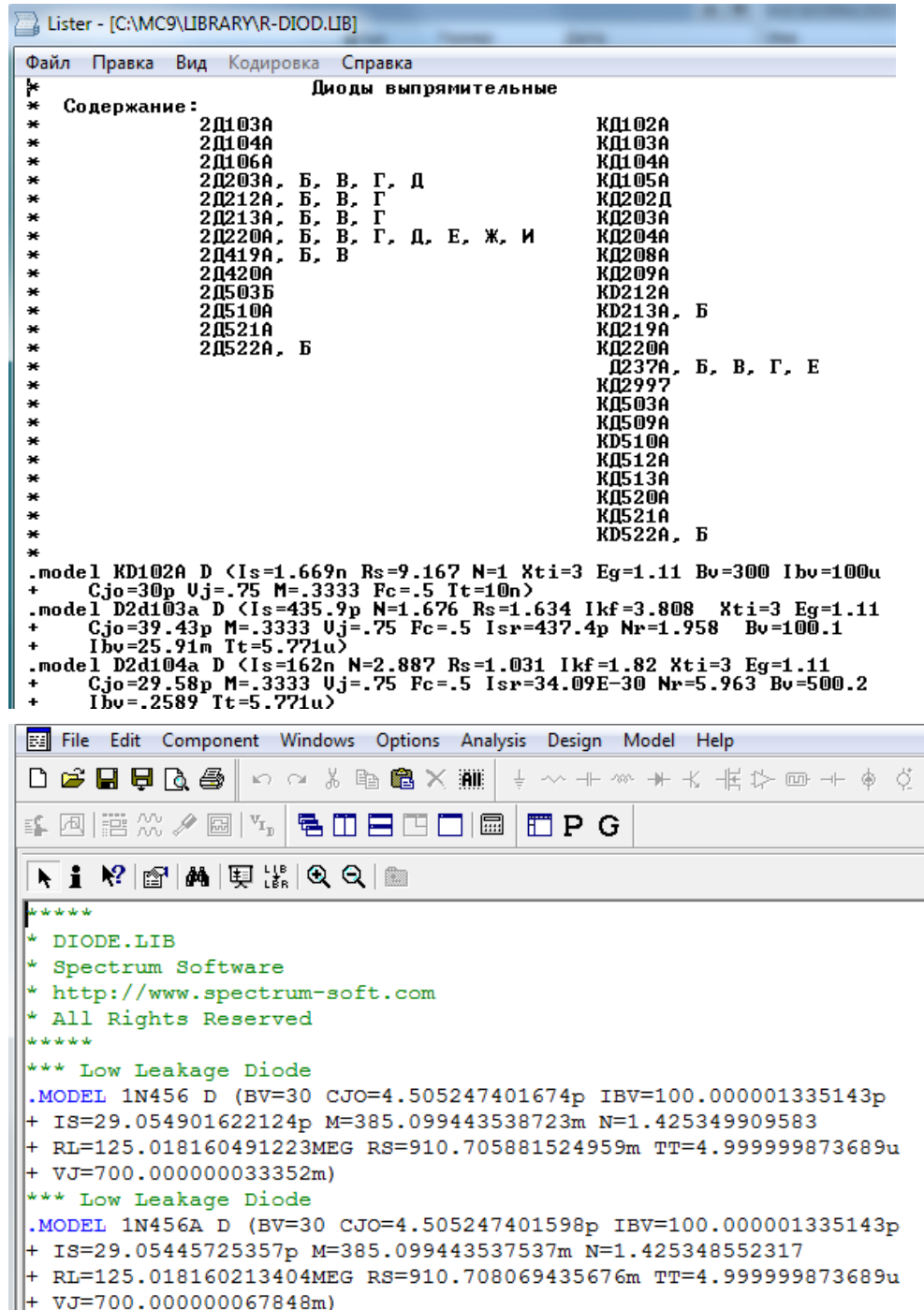


Рисунок 4

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.

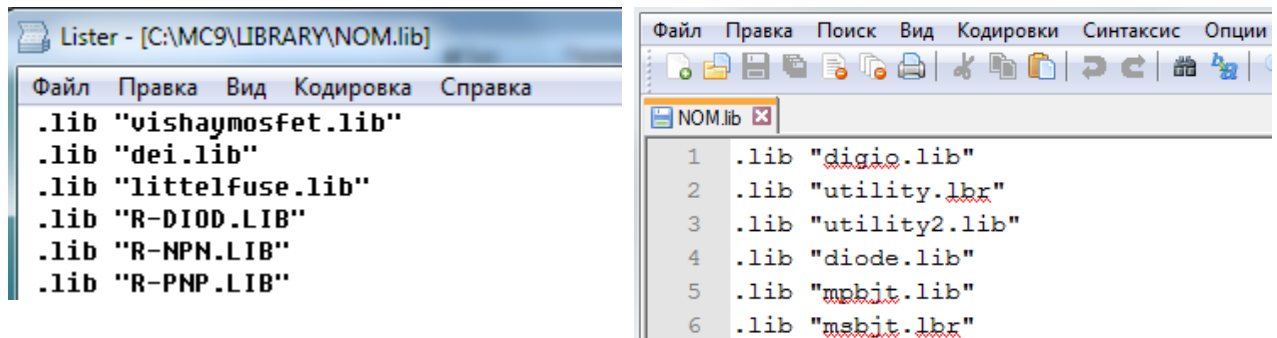


Рисунок 5

Далее модель должна быть подсоединена к базе данных программ. Для программы Microsar 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 Microsar на модель не вписывая ее в «NOM.lib», а используя следующий прием. Описание модели диода из файла копируется в буфер обмена, а затем вставляется на закладку Text главного окна Microsar, после чего модель диода становится доступной для использования в программе Microsar (но только при использовании этого файла описания схемы).

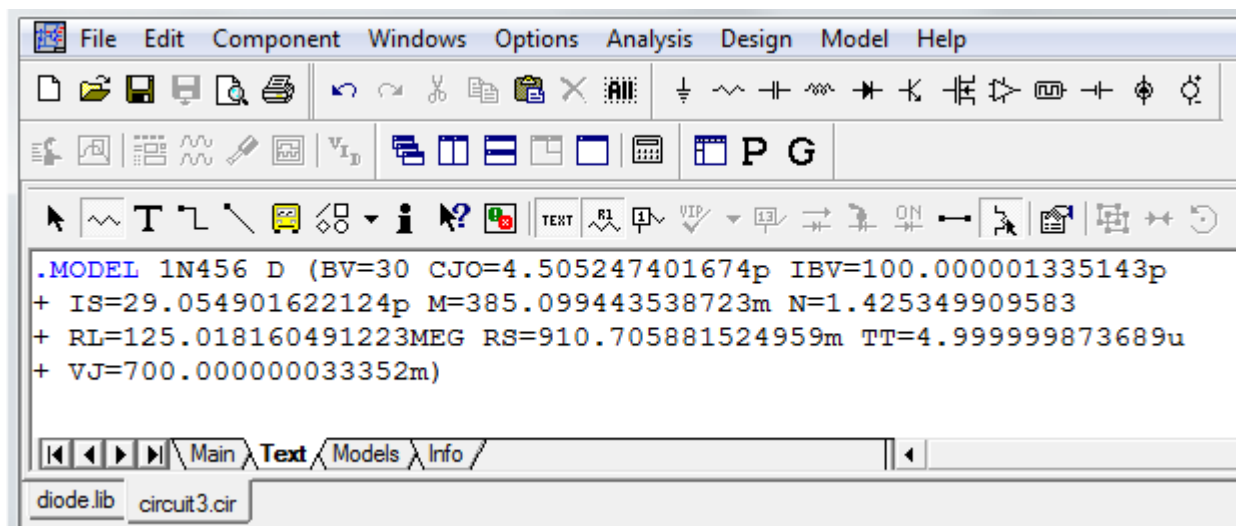


Рисунок 6

На закладке Text можно указать ссылку на файл библиотеку.

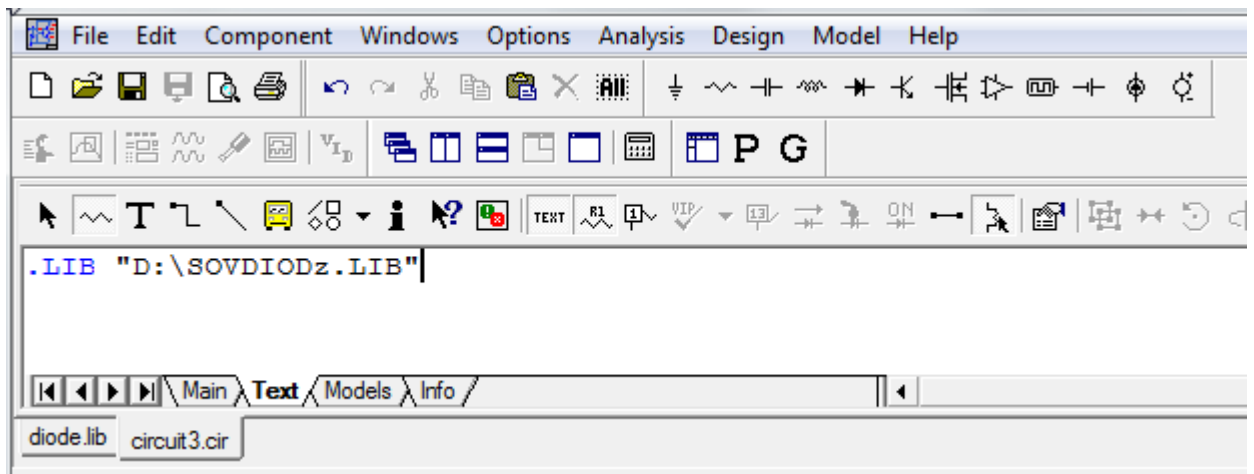


Рисунок 7

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ. РАБОТА №1

### Цель работы:

*Получение и исследование ВАХ германиевого и кремниевого диодов и определение по ним статических параметров модели полупроводниковых диодов, размещения этой модели в базе данных программ схемотехнического анализа*

### Порядок выполнения работы. традиционный стенд

1. Определите диапазон изменений токов и напряжений, допустимый при экспериментальном измерении ВАХ полупроводникового диода.

На каждом лабораторном макете расположено два диода (кремниевый и германиевый) с указанием их марок в верхнем правом угле макета.

*Примечание: В приложении приведены паспортные данные на полупроводниковые приборы, выбранные для исследования в данном цикле лабораторных работ. Паспортные данные своих диодов необходимо привести в отчёте по лабораторной работе.*

В паспорте на каждый диод обязательно указывают максимальный прямой ток, максимальное обратное напряжение. Поэтому при проведении экспериментов следует руководствоваться правилом - токи и напряжения на диоде должны оставаться меньше предельных величин.

2. Определите входные сопротивления измерительных приборов.

Все реальные измерительные приборы имеют конечную величину входного внутреннего сопротивления: входное сопротивление вольтметров не равно бесконечности, входное сопротивление амперметров не равно нулю. Для того, чтобы исключить методические ошибки при измерениях подключение измерительных приборов следует производить с учётом их внутреннего сопротивления.

*Примечание: В технических характеристиках на М3900 указано, что при работе в качестве вольтметра входное сопротивление на всех пределах не менее 10 Мом, а о входном сопротивлении при работе в качестве амперметра данные отсутствуют.*

Для определения входного сопротивления М3900 при использовании его в качестве вольтметра с пределами 2 В и 20 В, и определения его значения на каждом из диапазонов может быть использована схема, приведённая на рисунке 8 а).

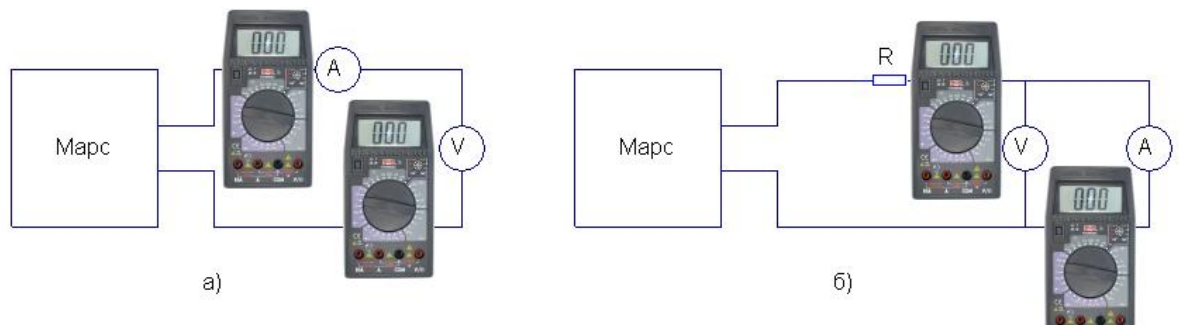


Рисунок 1

В этой схеме один из мультиметров V выполняет роль вольтметра, для которого определяется внутреннее сопротивление, второй A – амперметра, показания которого определяют потребляемый ток вольтметром. Отношение показания вольтметра к показанию амперметра определяет входное сопротивление вольтметра. При проведении эксперимента подавайте напряжение от источника питания «Марс» величиной близкой к установленному пределу измерения вольтметра. Предел измерения тока устанавливайте из условия получения максимальной точности измерения потребляемого тока (20 или 200 мкА). Результаты измерений занесите в рабочую тетрадь.

Для измерения входного сопротивления МЗ900 при использовании в качестве амперметра соберите схему согласно рис.8б. В данной схеме один из мультиметров включён как амперметр A, входное сопротивление которого измеряется, а второй как вольтметр V, показания которого указывают на падение напряжения на входных клеммах амперметра, сопротивление R и величина напряжения, подаваемого от источника «Марс», определяют величину тока, при которой происходит измерение. Измерения проведите для амперметра на пределах 200 мА, 20 мА, 2 мА и 200 мкА, где для каждого предела следует использовать свой номинал резистора. Напряжение, которое подаётся на вход схемы от источника «Марс», необходимо подавать такой величины, чтобы показания амперметра соответствовали половине установленного предела. Результаты измерений занесите в виде таблицы в рабочую тетрадь.

Таблица №1

Предел	R	Показан ия U	Пок азания I	$R_A = U/I$
200 мА	620 Ом			
20 мА	3 кОм			
2 мА	3 кОм или 51 кОм			
200 мкА	100 кОм			

## ИЗМЕРЬТЕ ПРЯМЫЕ ВЕТВИ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ.

Для экспериментального измерения прямой ветви ВАХ диода соберите на лабораторном макете схему для измерения прямой и обратной ветви ВАХ диодов, представленную на рисунке. 2а. с одним из диодов, имеющихся на лабораторном макете. ( $R=620\text{ Ом}$ )

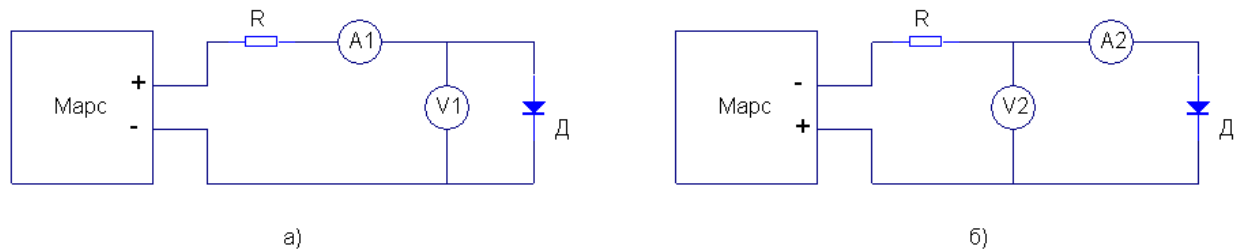


Рисунок 2

При расстановке приборов в данной схеме учтено, что входное сопротивление  $R_V$  вольтметра  $V1$  значительно больше сопротивления диода  $R_D$ , а входное сопротивление  $R_A$  амперметра  $A1$  соизмеримо с ним. Показания вольтметра соответствуют истинному падению напряжения на диоде, а показания амперметра определяют суммарный ток через диод и вольтметр. Так как входное сопротивление  $R_V$  вольтметра значительно больше сопротивления  $R_D$  диода при прямом токе ( $R_V \cong 10\text{ Мом}$ ,  $R_D \sim 1 - 1000\text{ Ом}$ ), то ошибка в измерении тока через диод незначительна (менее  $10^{-3}$ ). При установке приборов, как показано на рис. 1б, амперметр точно показывает ток через диод, а вольтметр – суммарное падение напряжения на диоде и амперметре. При измерении прямой ветви ВАХ диода сопротивление  $R_D$  диода и входное сопротивление  $R_A$  амперметра соизмеримы, поэтому показания вольтметра нельзя считать, что они являются падением напряжения на диоде.

Прямая ветвь ВАХ полупроводникового диода представляет собой быстро восходящую ветвь: начиная с некоторого прямого напряжения, малому его приращению соответствует быстрый рост прямого тока. При экспериментальном измерении подобных характеристик  $Y=f(X)$  используют следующее правило, позволяющее равномерно заполнить поле  $Y - X$  экспериментальными точками. В эксперименте задают ряд значений  $Y_i$  с равными приращениями  $\Delta Y$  и фиксируют соответствующие изменения  $X_i$ .

Фактически использование данного метода для измерения прямой ветви ВАХ диода, необходим регулируемый источник тока с высоким выходным сопротивлением. В

лабораторном оборудовании, как правило, есть регулируемые источники напряжения (в данном случае лабораторный источник «Марс»). Для превращения источника напряжения в источник тока в цепь питания последовательно включается сопротивление  $R$ . Величина этого сопротивления и максимальное выходное напряжение регулируемого источника напряжения определяют возможный максимальный ток в исследуемом приборе, ибо в первом приближении сопротивление диода при прямом смещении можно принять равным нулю. Так, если в схеме поставить резистор с номиналом  $R=620\text{ Ом}$  (минимальная величина сопротивления из магазина сопротивлений на лабораторном макете) и от источника «Марс» подать его максимальное напряжение  $V_{\max}=15\text{ В}$ , то в эксперименте максимальный ток через диод будет ограничен на уровне  $I_{\max}\approx V_{\max}/R\approx 24\text{ мА}$ .

Реально максимальный ток через диод будет несколько меньшей величины, так как при его вычислении не учитывалось падение напряжения на диоде. При постановке такого сопротивления появляется возможность плавно изменять прямой ток диода в пределах 1 – 20 мА, изменяя выходное напряжение источника напряжения «Марс», и гарантировать ограничение прямого тока ниже разрешённой по паспорту величины.

Собрав схему для измерения прямой ветви ВАХ диода на лабораторном макете, установите на М3900 пределы измерения амперметра и вольтметра. Исходя из того, что прямой ток может быть на уровне 24 мА, установите предел измерения постоянного тока 200 мА. Прямое напряжение на диоде при любых прямых токах никогда не превышает 1 – 2 В. Поэтому установите на М3900, выполняющем роль вольтметра, предел измерения постоянного напряжения 2 В. Далее обратитесь к учебно-техническому персоналу для проверки вашей схемы и получения разрешения на проведение эксперимента.

Включив приборы (источник питания, мультиметры), подайте на схему от источника «Марс» максимальное его выходное напряжение (15 В) и зафиксируйте ток через диод и падение напряжения на диоде. Далее с шагом порядка 2 мА изменяйте ток в диоде и фиксируйте соответствующие каждому току напряжения на диоде. Изменение тока через диод производится за счёт изменения выходного напряжения источника «Марс», у которого есть два регулятора «грубо» и «плавно». При измерении следите за установкой предела измерения тока. Так при уменьшении тока, допустим, до 18 мА следует поменять предел измерения амперметра с 200 мА на 20 мА и т.д..

При уменьшении прямого тока диода до 1–2 мА поменяйте в схеме сопротивление с 620 Ом на 3 кОм (на макете они расположены рядом) и дальнейшее изменение тока от 1 мА и ниже проведите с шагом порядка 200 мкА. Все результаты занесите в виде таблицы в рабочую тетрадь.



Все результаты по измерению прямой ветви ВАХ диода необходимо занести в виде таблицы в рабочую тетрадь. По ряду выбранным экспериментальным точкам постройте измеренную прямую ветвь ВАХ диода, убедитесь, что в эксперименте не допущены ошибки (её вид должен соответствовать теории).

Замените в схеме диод на вторую марку, которая есть в макете (на каждом макете один диод кремниевый, другой – германиевый). Повторите измерения прямой ветви ВАХ второго диода по методике, что и для первого диода. Помните, что рекомендуется проводить эксперимент с установки максимального тока и в дальнейшем его уменьшать. Поэтому при смене диода одновременно поменяйте сопротивление с 3 кОм на 620 Ом.

Все результаты по измерению прямой ветви ВАХ второго диода занесите в виде таблицы в рабочую тетрадь. На графическом представлении прямой ветви ВАХ первого диода аналогично постройте прямую ветвь второго диода.

### **ИЗМЕРЬТЕ ОБРАТНЫЕ ВЕТВИ ВАХ ДИОДОВ.**

Для измерения обратной ветви ВАХ диодов следует собрать схему согласно рисунку 2б. Расстановка измерительных приборов при проведении данного эксперимента учитывает, что сопротивление диодов при обратном смещении очень велико. Так если, например, в паспорте на диод указано, что при обратном напряжении  $V=10$  В обратный ток не более 1 мкА (типичные величины для кремниевых диодов), то сопротивление диода при обратном смещении  $\geq 10$  Мом. Реально, как правило, обратные токи у диодов меньше паспортной величины. Этим вызвана перестановка вольтметра в схеме. В схеме по рис. 1б амперметр показывает истинный ток диода, а вольтметр фиксирует суммарное напряжение на диоде и амперметре.

После проведения модернизации схемы (поменять постановку вольтметра и изменить полярность подаваемого напряжения от источника «Марс») замените пределы измерения приборов: для вольтметра выберите предел 20 В, для амперметра – 20 мкА.

Согласно теории, зависимость обратного тока от напряжения следует ожидать при изменении последнего от 0 до 15 -100 мВ. При последующем увеличении обратного напряжения (по модулю) обратный ток изменяется крайне мало. Поэтому рекомендуется проводить измерение обратной ветви ВАХ диода, начиная с подачи на него максимального разрешённого напряжения  $V_{\max}$  и фиксируя при этом ток чрез диод. Затем, выбрав шаг изменения обратного напряжения, последовательно его уменьшать и фиксировать токи. На отрезке изменения обратного напряжения от до 1 В шаг изменения

может составлять несколько вольт, менее 1 В – шаг должен быть менее 10 мВ, чтобы корректно провести измерения.


При работе с источником «Марс» в эксперименте возможно подать на диод обратное напряжение величиной 15 В, что значительно ниже паспортных максимальных обратных напряжений для всех диодов, расположенных на лабораторном макете. Поскольку по паспорту напряжение на выходе источника «Марс» регулируется в пределах 1 – 15 В, то с его помощью получать изменения выходного напряжения от 0 до 1 В с шагом 10 мВ является нештатным режимом работы. Поэтому данный участок обратной характеристики в данной работе не исследуется.

Включите приборы (источник напряжения «Марс» и мультиметры) и подайте на схему напряжение 15 В, зафиксируйте для данного напряжения обратный ток через диод. Если амперметр способен измерить данный ток (для некоторых диодов ток может оказаться меньшей величины, способной быть измеренной прибором М3900), то проведите измерения обратного тока при последовательном уменьшении обратного напряжения до 10, 5 и 1 В. Все результаты занесите в виде таблицы в рабочую тетрадь и постройте обратную ветвь ВАХ диода.

В том случае, когда при обратном напряжении 15 В показания амперметра отсутствуют, сделайте вывод, что обратный ток диода менее 1 мкА и его измерить мультиметром М3900 не представляется возможным.

## АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕШЕНИЯ ТРАДИЦИОННОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В практикуме при измерении ВАХ полупроводниковых приборов традиционными измерительными приборами используется мультиметр Mastech M3900 с цифровой индикацией показаний. Цифровой мультиметр Mastech M3900 производит измерения силы постоянного и переменного тока, величины постоянного и переменного напряжения, сопротивления и коэффициент усиления биполярных транзисторов ( $h_{21}$ ). Выбор режимов и пределов измерений производится 30-позиционным переключателем. Результаты измерений выводятся на цифровой  $3^{1/2}$ -разрядный ЖК-дисплей с высотой символов 18 мм.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИФРОВОГО МУЛЬТИМЕТРА MASTECH M3900		
	Количество измерений в секунду	2
	Постоянное напряжение $U=$	200mV / 2V / 20V / 200V / 1000V ( $\pm 0.5\%$ )
	Переменное напряжение $U\sim$	200mV ( $\pm 1.2\%$ ) 2V / 20V / 200V ( $\pm 0.8\%$ ) 700V ( $\pm 1.2\%$ )
	Постоянный ток $I=$	20мкА ( $\pm 2.0\%$ ) 200мкА / 2мА / 20мА ( $\pm 0.8\%$ , 200m/2A: $\pm 1.2\%$ ) 20A ( $\pm 2.0\%$ )
	Переменный ток $I\sim$	20мкА ( $\pm 3.0\%$ ) 200мкА / 2мА / 20мА ( $\pm 1.0\%$ ) 200m/2A: $\pm 1.8\%$ ) 20A ( $\pm 3.0\%$ )
	Диапазон частот по переменному току	40 - 400Гц
	Сопротивление R	200Ом / 2КОм / 20КОм / 200КОм / 2МОм ( $\pm 0.5\%$ ) 20МОм ( $\pm 1.0\%$ )
	Коэффициент усиления транзисторов $h_{21}$	1 - 1000

В качестве источника питания стенда традиционными в традиционном варианте используется источник питания "Марс". Он может быть использован использования в Полупроводниковые диоды. Місгосар [Оглавление](#) Загидуллин Р.Ш.

практике при настройке и проверке электрических схем, для питания регулируемым от 1,6 до 15 В стабилизированным напряжением устройств, потребляющих ток до 1 А, а также для зарядки аккумуляторов током до 1,1 А.

Выход стабилизированного напряжения постоянного тока находится на лицевой панели (гнезда и "+"). Регулировка выходного напряжения производится ручками ГРУБО, ТОЧНО. Контроль выходного напряжения может осуществляться по встроенному в источник вольтметру.

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ «МАРС»



Выходное напряжение      От 1.6В до 15 Вольт

Выходной Ток      До 1А

При работе с использованием технологий компьютерных измерительных приборов на

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ РЕШЕНИЙ В MICROCAP

Мікросар позволяет строить графики с использованием формульных выражений в полях осей графика.

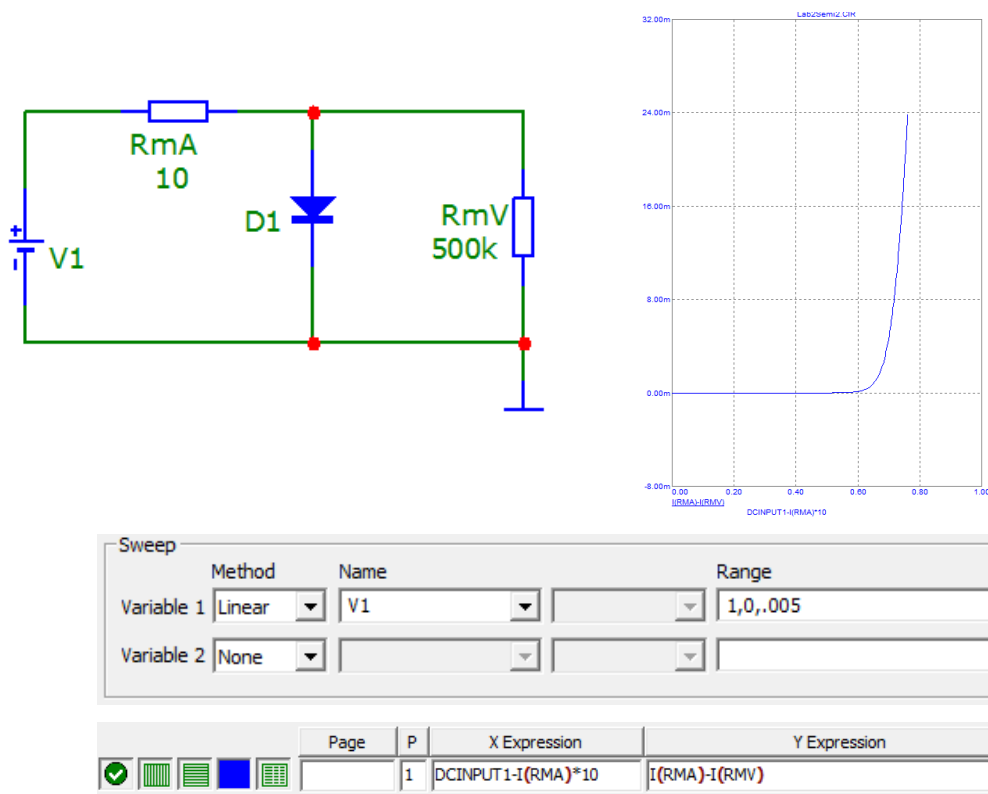


Рисунок 8

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 определяется 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 МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА MICROCAP В ТЕКСТОВЫЙ ФАЙЛ

Вывод данных в тестовый файл из программы Microcap возможен только при нажатой экранной кнопкой, определяющей вывод в текстовый файл расчета:

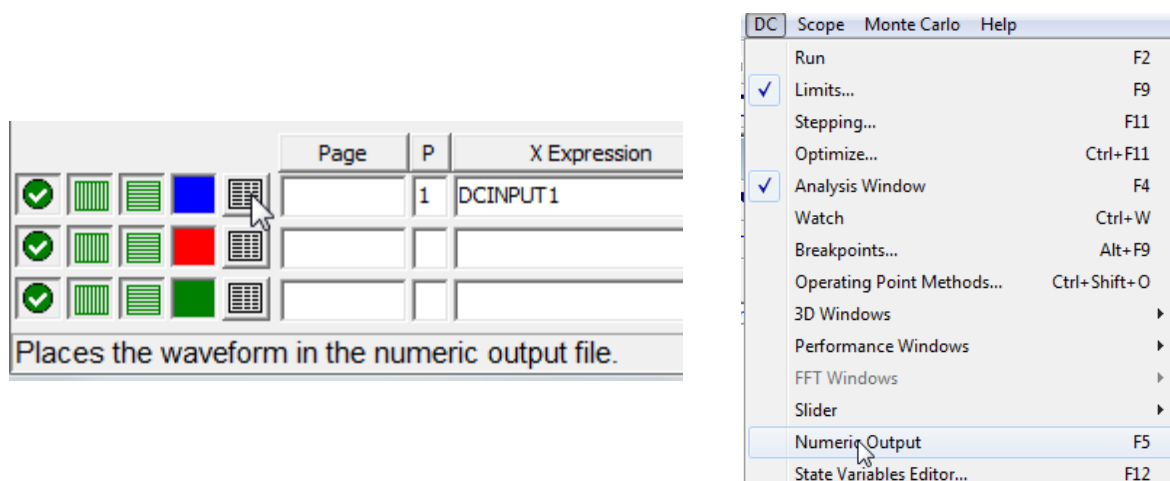


Рисунок 9

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

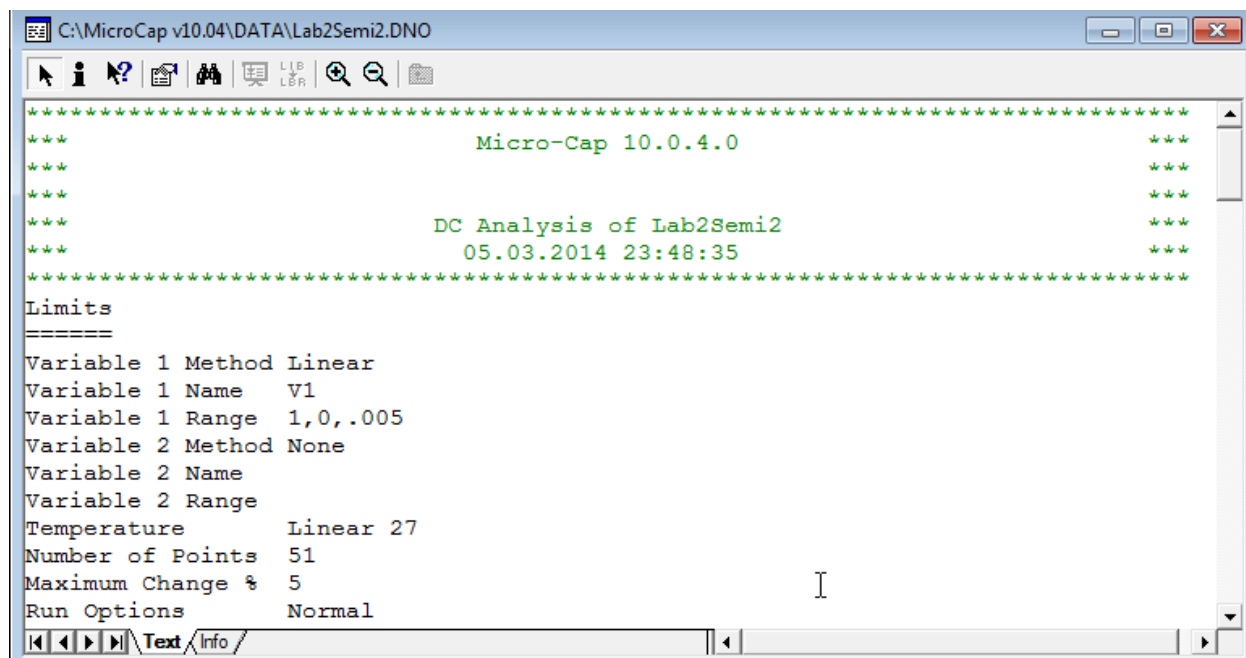


Рисунок 10

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 MathCAD 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 расчета. 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.

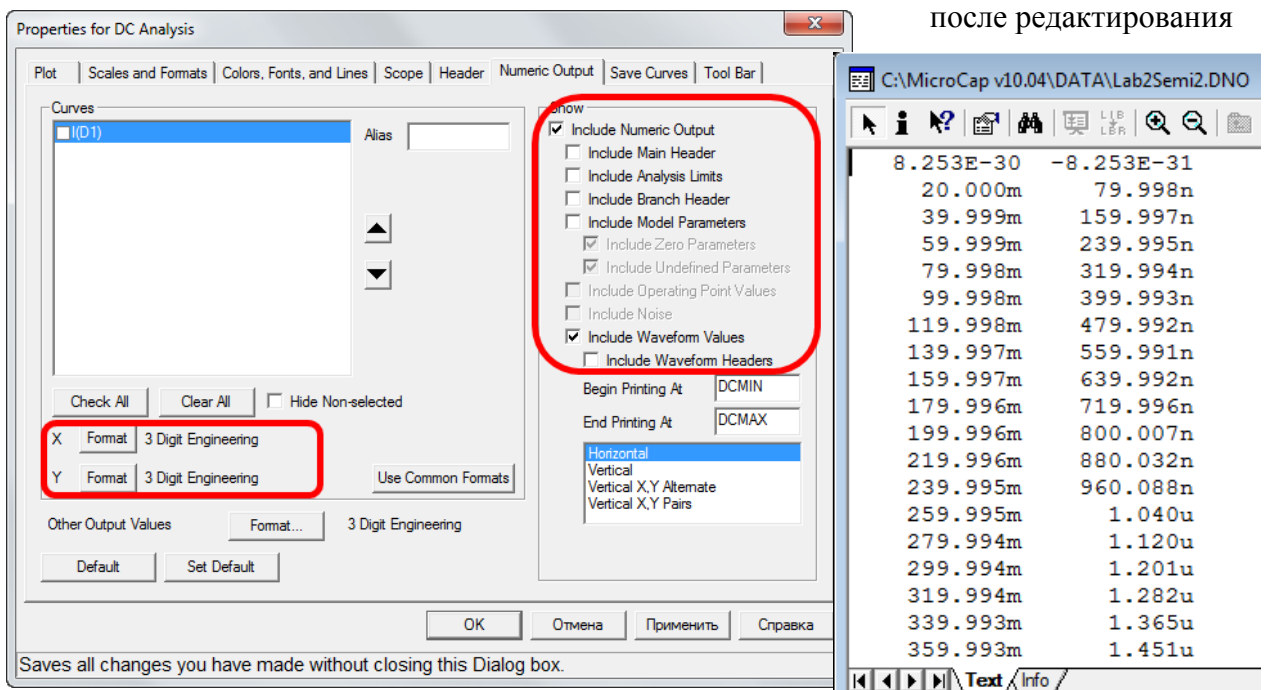
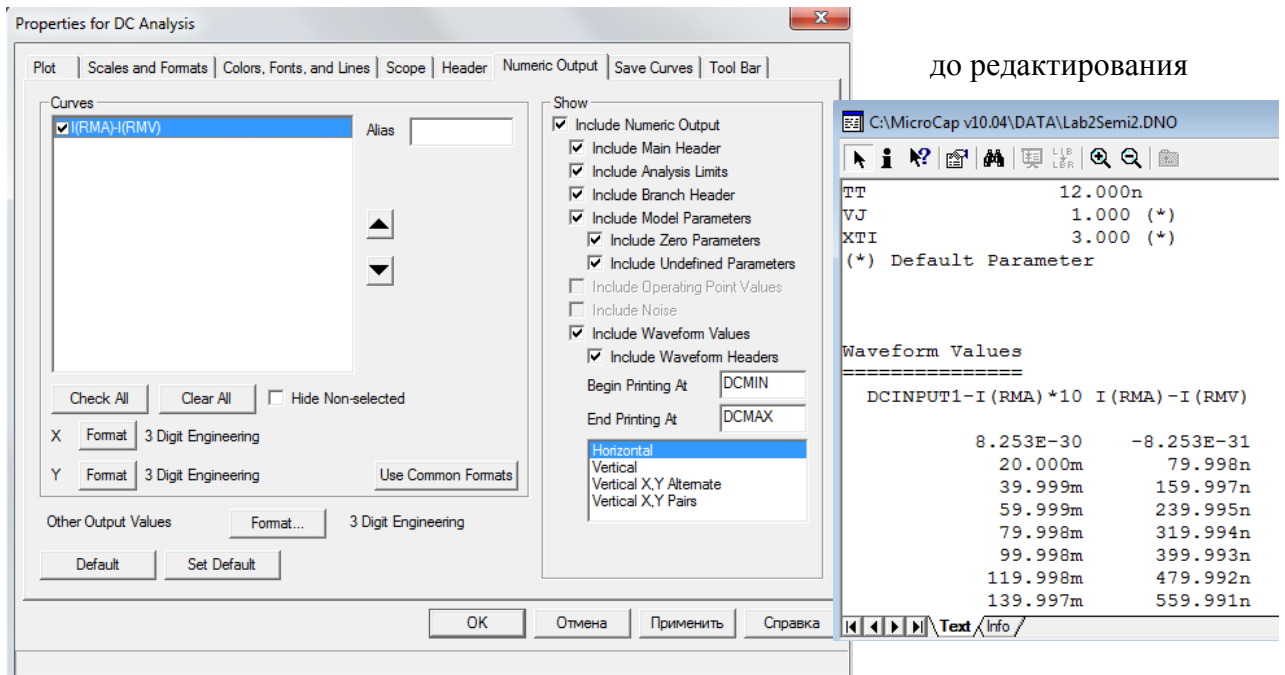


Рисунок 11

Но при этом остаются проблемы восприятия, чтения данных из файла, сформированного в Numeric Output. Microcap использует формат вывода численных данных с буквенными множителями (m – мили, множитель 10-3). Исправить формат вывода на десятичный, читаемый MathCAD ом можно на закладке Scales and Formats диалогового окна свойств графика. Здесь изменяется формат Scale и Cursor как для оси X так и для оси Y

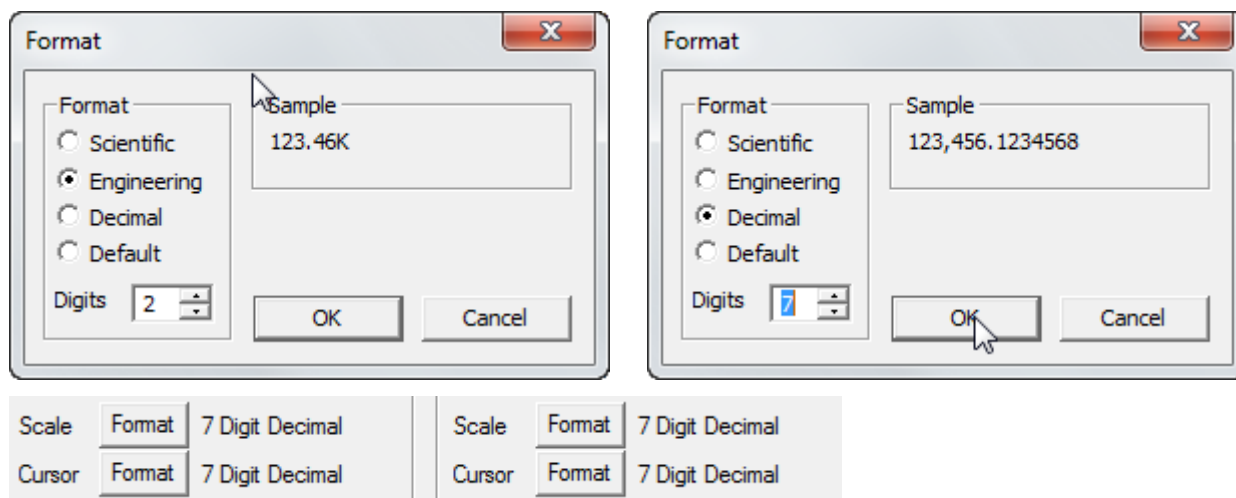
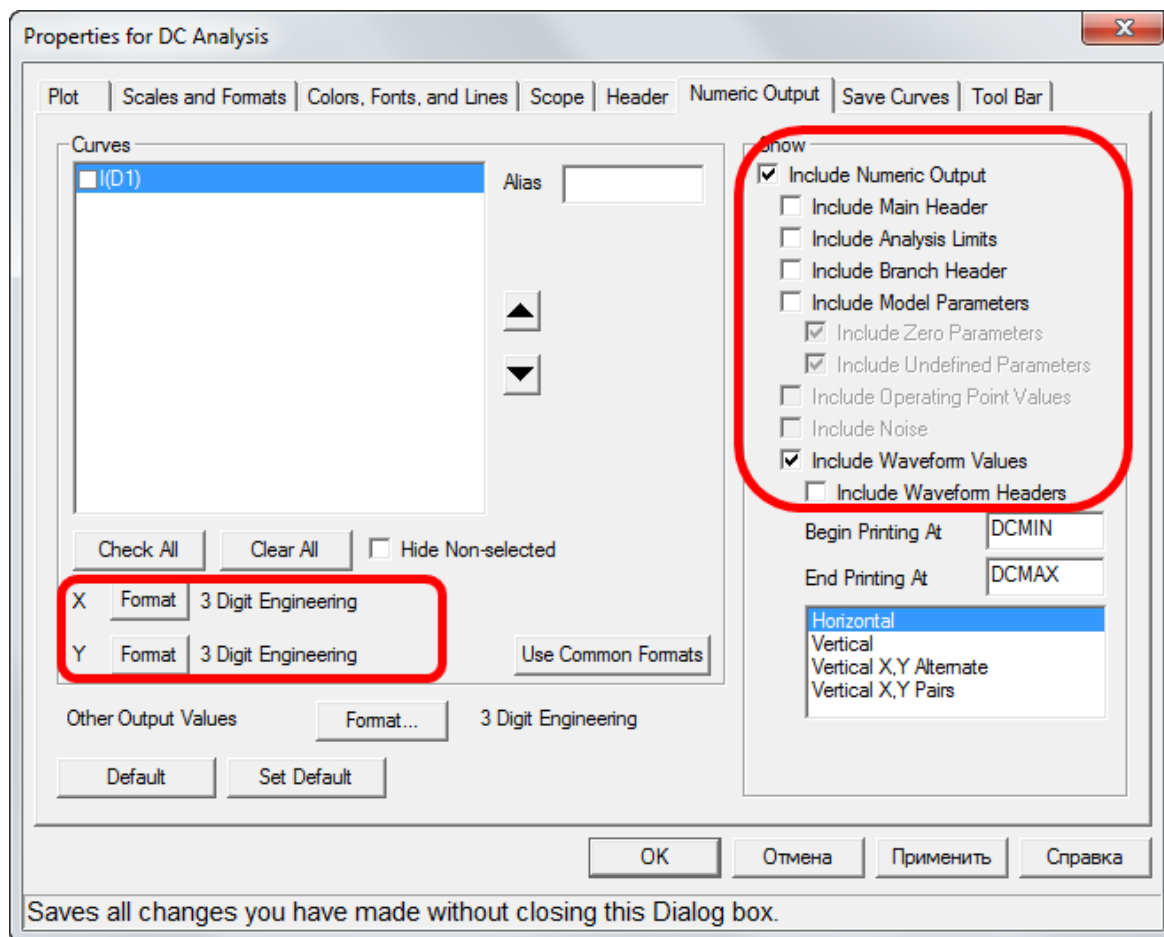


Рисунок 12



## РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДИОДА

Статические характеристики электронных приборов обычно описывают нелинейными функциями.

Вольтамперная характеристика, т. е. зависимость тока, протекающего через р-п-переход, от значения и полярности приложенного к нему напряжения  $U$ , достаточно хорошо соответствует выражению

$$I = I_0 (e^{\frac{q_e U}{kT}} - 1) = I_0 (e^{U/\phi_T} - 1),$$

Рисунок 21

где  $I_0$  — ток насыщения;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура;  $\phi_T = (T/11600)$  — температурный потенциал электрона, равный при  $t = 20$  °C,

$$\phi_T = \frac{273 + 20}{11600} \approx 0,025 \text{ В} = 25 \text{ мВ}.$$

При отрицательном (обратном) напряжении от десятых вольта и выше слагаемым

$$e^{-U_{обр}/0,025}$$

можно пренебречь по сравнению с единицей, и ток оказывается равным

$$I = I_{обр},$$

не зависящим от напряжения. При прямом приложенном напряжении в десятые доли вольта и выше можно пренебречь единицей по сравнению со слагаемым

$$e^{-U_{обр}/0,025}$$

и, следовательно, ВАХ оказывается близкой к экспоненте.

Реальный диод можно рассматривать как последовательное соединение идеального диода (идеальный генератор тока) и объемного сопротивления области базы. Существует несколько способов решить задачу определения параметров модели полупроводникового диода. Например, метод трех ординат

Уравнение для модели диода с учётом объемного сопротивления области базы

$$I_d = I_0 * (\exp(\frac{U_d - I_d * R_b}{N * F_t}) - 1)$$

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

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

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

$$\begin{cases} U_{d1}' = R_b * I_{d1}' + N * F_t * \ln\left(\frac{I_{d1}'}{I_o}\right) \\ U_{d2}' = 2 * R_b * I_{d1}' + N * F_t * \ln\left(\frac{2 * I_{d1}'}{I_o}\right) \\ U_{d3}' = 4 * R_b * I_{d1}' + N * F_t * \ln\left(\frac{4 * I_{d1}'}{I_o}\right) \end{cases}$$

и даст возможность получить решение в виде:

$$\begin{cases} R_b = \frac{(U_{d1}' - 2 * U_{d2}' + U_{d3}')}{I_{d1}'} \\ N * F_t = \frac{(3 * U_{d2}' - 2 * U_{d1}' - U_{d3}')}{\ln(2)} \\ I_o = I_{d1}' * \exp\left(\frac{-(2 * U_{d2}' - U_{d3}')}{N * F_t}\right) \end{cases}$$

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

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

В этом случае остальные параметры  $R_b$  и  $I_o$  определяются по двум точкам характеристики  $I_{d1}'$  и  $2 * I_{d1}'$ , что соответствует системе уравнений:

$$\begin{cases} U_{d1}' = R_b * I_{d1}' + N * F_t * \ln\left(\frac{I_{d1}'}{I_o}\right) \\ U_{d2}' = 2 * R_b * I_{d1}' + N * F_t * \ln\left(\frac{2 * I_{d1}'}{I_o}\right) \end{cases}$$

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 BAX может быть выполнен в соответствии с текстом программы MCAD показанной ниже.

В программе производится считывание таблицы значений BAX из текстового файла за счёт использования функции READPRN, строится график BAX и рассматривается введённая таблица данных:

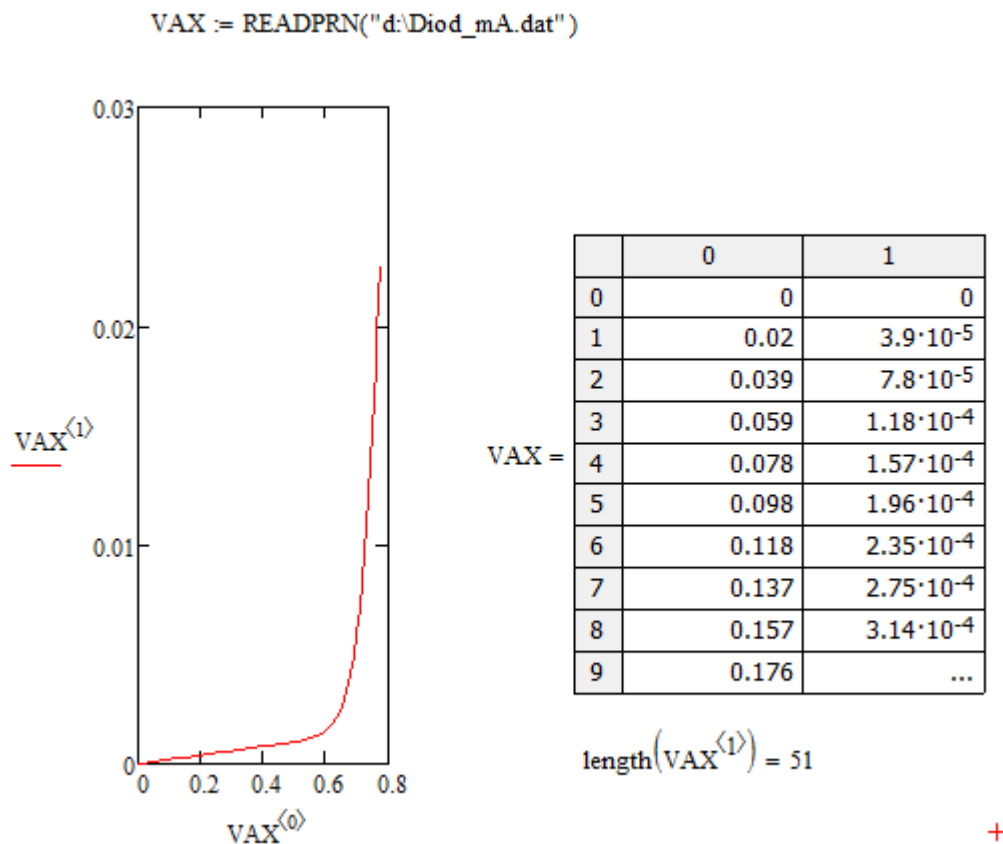


Рисунок 13

Здесь же определяется длина введённой таблицы и показывается возможность обращения к любому элементу таблицы, как к значениям тока, так и значениям напряжения.

$$Id3 := \max(VAX^{(1)})$$

$$Id3 = 0.023$$

Значение индекса максимального тока

$$nMax := \text{match}(Id3, VAX^{(1)})$$

$$nMax = (50)$$

Значение максимального напряжения для максимального тока

$$Ud3 := (VAX^{(0)})_{50} \quad Ud3 = 0.772$$

$$nId1 := \text{match}\left(\frac{Id3}{4}, VAX^{(1)}\right)$$

$$nId2 := \text{match}\left(\frac{Id3}{2}, VAX^{(1)}\right)$$

$$nId1 = \begin{pmatrix} 37 \\ 38 \end{pmatrix}$$

$$nId2 = \begin{pmatrix} 42 \\ 43 \end{pmatrix}$$

Рисунок 14

После чего рассчитываются параметры модели. Плотность данных (число точек) полученных в процессе эксперимента может не удовлетворить расчёт, поэтому может потребоваться интерполяция между узловыми точками графика для определения значений токов в расчёте. Это может быть сделано за счёт построения графика и интерполяции между точками 37 и 38 исходных данных для получения значения  $Ud3$  и  $Id3$ .

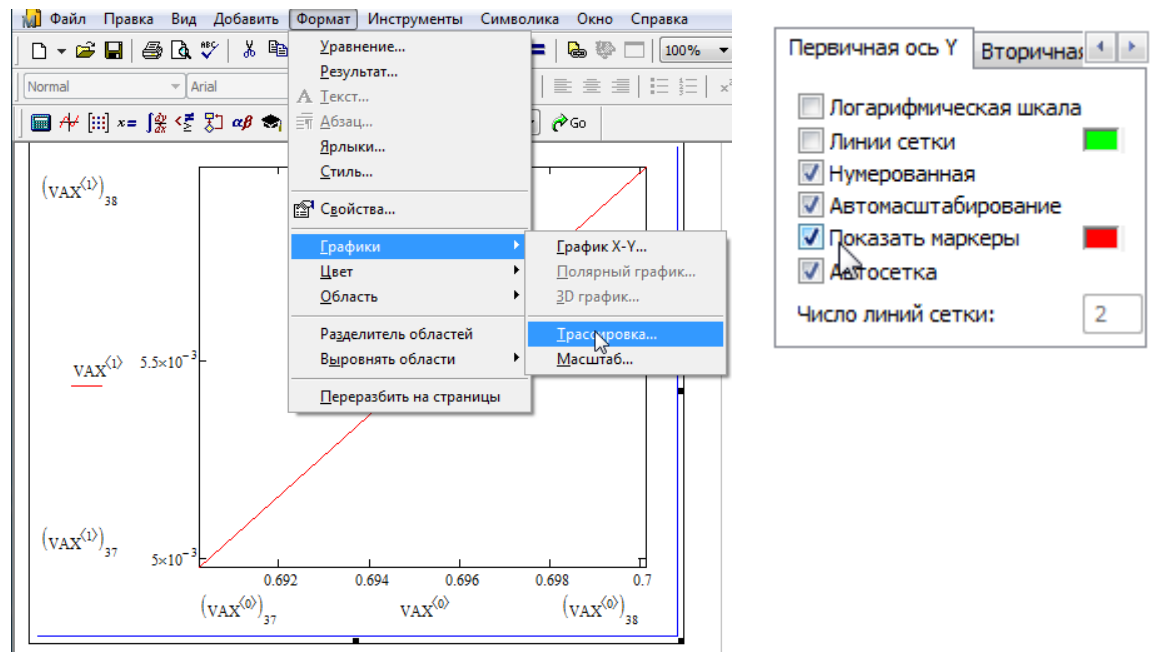


Рисунок 15

Дополнительно можно ввести на график маркеры, то есть линии для значений интересующих токов. Таким образом, можно получить данные по напряжению и току точек:

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

вычисленное значение тока Id1

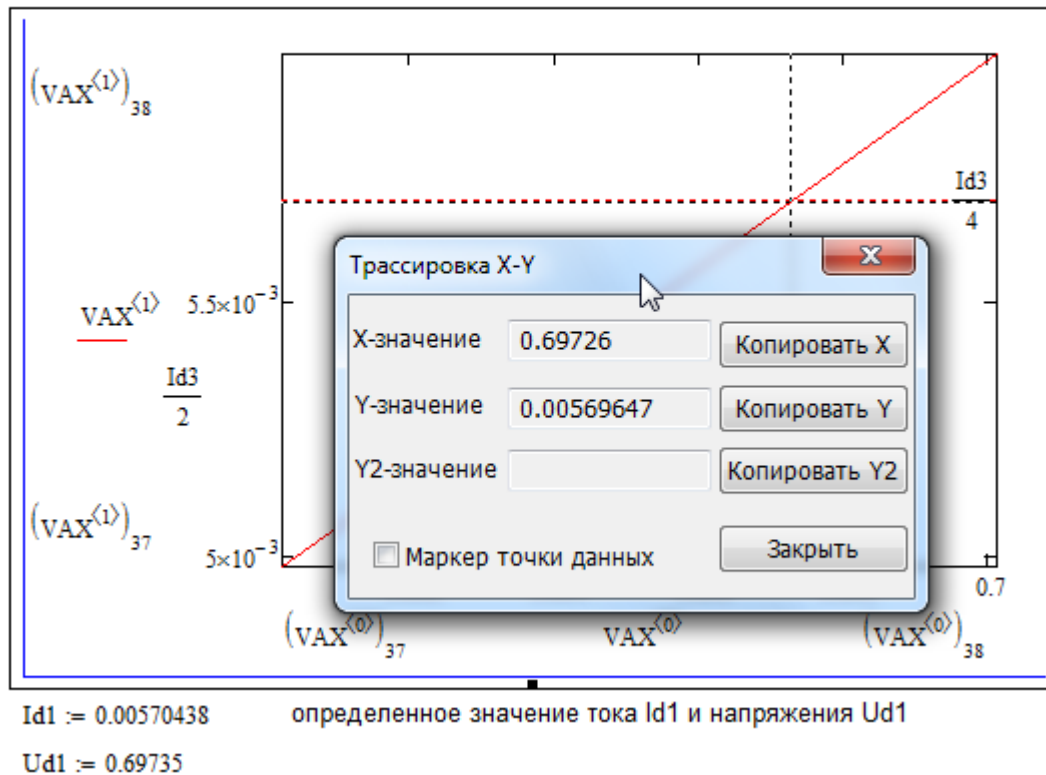


Рисунок 16

Большой интерес представляется вычисление значений интерполированных точек с использованием встроенных функций MCAD.

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

Рисунок 17

Полученный результат требует проверки, а поскольку главной целью построения модели является адекватность модели, то проверку можно провести, построив на одном графике ВАХ экспериментальную и ВАХ модельную.

Необходимо только обеспечить равенство масштабов по осям токов и напряжений.  
Пример проверки показан на рисунке.

$$L_{\text{tab}} := \text{length}(VAX^{(0)}) \quad \min(VAX^{(1)}) = 0 \quad \max(VAX^{(1)}) = 0.023$$

$$\Delta I := \left( \frac{\max(VAX^{(1)}) - \min(VAX^{(1)})}{L_{\text{tab}}} \right) \quad \Delta I = 4.474 \times 10^{-4}$$

$$I := \min(VAX^{(1)}), (\min(VAX^{(1)}) + \Delta I) .. \max(VAX^{(1)})$$

$$Is0 = 1.572 \times 10^{-8}$$

$$Rb = 0.414$$

$$U(I) := I \cdot Rb + \ln \left[ \frac{(I + Is0)}{(Is0)} \right] \cdot NFt$$

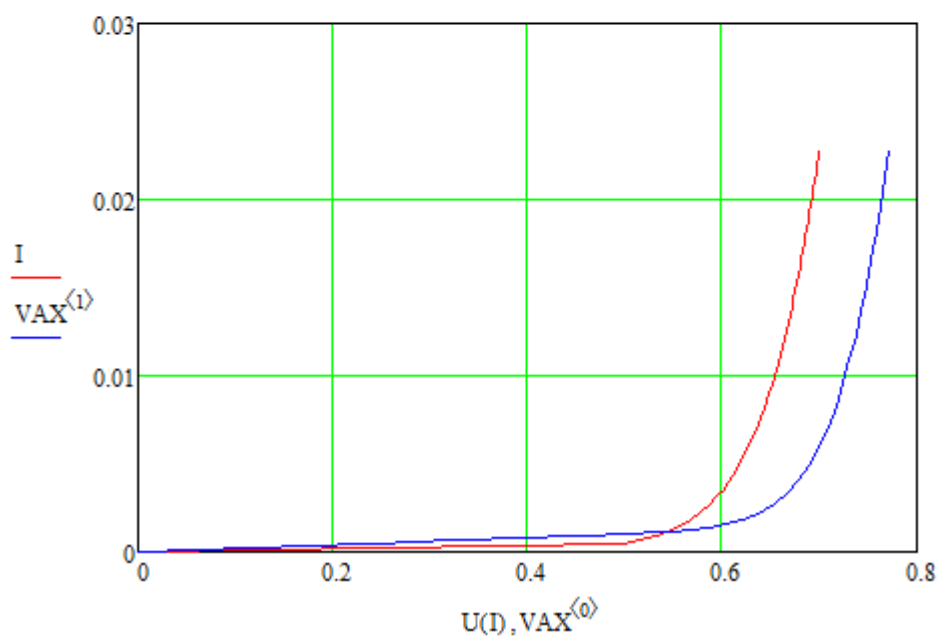


Рисунок 18

При определении тока  $Is0$  могут возникнуть трудности в визуализации этого тока. По умолчанию MCAD все значения менее  $10^{-15}$  будет считать нулём. Для отображения меньших значений можно использовать возможности форматирования полученного результата установив нулевой порог отображения числа

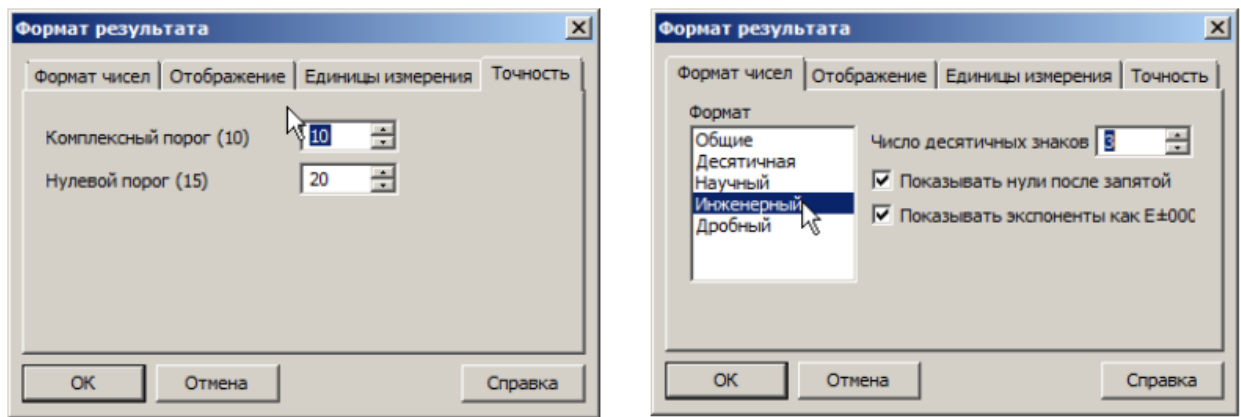


Рисунок 19

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Задача исследования лабораторной работы и состоит в том, чтобы по экспериментальным данным получить параметры модели диода. В данном случае - статические параметры модели.

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.

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 Multisim имеет следующий вид:



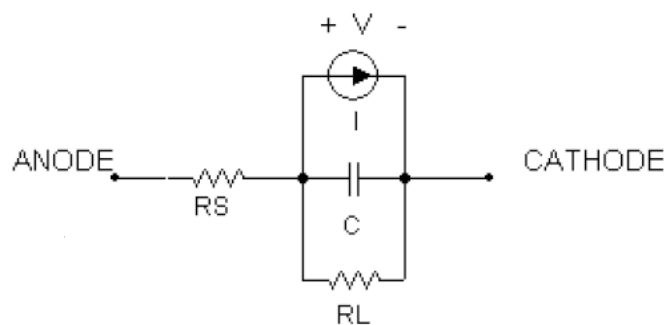


Рисунок 20

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

Таблица

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

Обозначение	Параметр модели
<b>TBV1</b>	Линейный температурный коэффициент BV
<b>TBV2</b>	Квадратичный температурный коэффициент BV
<b>TRS1</b>	Линейный температурный коэффициент RS
<b>TRS2</b>	Квадратичный температурный коэффициент RS
<b>KF</b>	Коэффициент фликкер-шума
<b>AF</b>	Показатель степени в формуле фликкер-шума
<b>RL</b>	Сопротивление утечки перехода

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

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

## РЕШЕНИЕ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ

Решение систем линейных и нелинейных уравнений и неравенств возможно с помощью вычислительного блока Given который ограничивается функциями Find, Minerr, Maximize, Minimize. Построение решения осуществляется по правилам:

Начало блока решения, задание начальных условий до начала блока Given-Minerr и задание ограничений на Ft в блоке Given-Minerr

$IS := 10^{-6}$      $Ft := 0.03$     Начальные приближения для неизвестных

Given

$$IS \cdot \exp \left[ \frac{(DataOFdiod^{(0)})_{38}}{Ft} \right] - 1 = (DataOFdiod^{(1)})_{38}$$

38 точка напряжение-ток исходных данных

$$IS \cdot \exp \left[ \frac{(DataOFdiod^{(0)})_{40}}{Ft} \right] - 1 = (DataOFdiod^{(1)})_{40}$$

40 точка напряжение-ток исходных данных

$otvet := Minerr(IS, Ft)$

$otvet_1 = 2.544E-002$

$otvet_0 = 9.208E-013$

+

Параметры источника тока в МС  $1e-12 \cdot (\exp(v(In)/0.0255) - 1)$

$$otvet_0 \cdot \exp \left[ \frac{(DataOFdiod^{(0)})_{38}}{otvet_1} \right] - 1 = 3.796E+002$$

$(DataOFdiod^{(1)})_{38} = 3.796E+002$

$$otvet_0 \cdot \exp \left[ \frac{(DataOFdiod^{(0)})_{40}}{otvet_1} \right] - 1 = 9.752E+002$$

$(DataOFdiod^{(1)})_{40} = 9.752E+002$

Параметры источника тока в МС  $1e-12 \cdot (\exp(v(In)/0.0255) - 1)$

$$otvet_0 \cdot \exp \left[ \frac{(DataOFdiod^{(0)})_{38}}{otvet_1} \right] - 1 = 3.796E+002$$

$(DataOFdiod^{(1)})_{38} = 3.796E+002$

$$otvet_0 \cdot \exp \left[ \frac{(DataOFdiod^{(0)})_{40}}{otvet_1} \right] - 1 = 9.752E+002$$

$(DataOFdiod^{(1)})_{40} = 9.752E+002$

Рисунок 21

Для того, чтобы ввести жирный знак равно требуется нажать клавиши [CTRL + =]. Ограничительные условия обычно задаются в виде неравенств или равенств, которые должны удовлетворяться решению уравнения.

Следует помнить, что система уравнений или неравенств должна быть записана после или правее ключевого слова Given.

*Блок Given не пригоден для поиска индексированных переменных.*

Признаком окончания системы служит функция Find, если необходимо найти точное решение системы, или же функция Minerr, 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 MathCAD). Если окажется, что блок содержит слишком мало уравнений или неравенств, то блок может быть дополнен тождествами или повторяющимися выражениями.

Решение задачи определения параметров модели полупроводникового диода  
GIVEN MINERR

Многие уравнения и системы не имеют аналитических решений. Численные решения с заданной точностью (не более значения, заданного системной переменной TOL). При решении системы нелинейных уравнений используют специальный вычислительный блок, открываемый служебным словом – директивой Given и имеющий следующую структуру:  
начальные приближения неизвестных переменных  
Given  
Уравнения (знак присвоения между левой и правой частями Ctrl = )  
Ограничительные условия  
Выражения с функциями Find и Minerr  
  
Проверка решения.  
Find(v1,v2,...vn) – возвращает значение одной или ряда переменных для точного решения;  
Minerr(v1,v2,...vn) – возвращает значение одной или ряда переменных для приближенного решения.  
Find используется, когда решение реально существует. Minerr функция пытается найти максимальное приближение даже к несуществующему решению путем минимизации среднеквадратической погрешности решения.

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

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

Решение  $F(x)=0$  для переменной  $U_d$ .

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

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

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

Построение графика функции:

$$F_t := 0.0255 \quad I_S := 10^{-10} \quad R_b := 1 \quad m := 2$$

$$I_d := 0, 10^{-5} \dots 10^{-3} \quad U_d(I_d) := I_d \cdot R_b + \ln \left[ \frac{(I_S + I_d)}{I_S} \right] \cdot m \cdot F_t$$

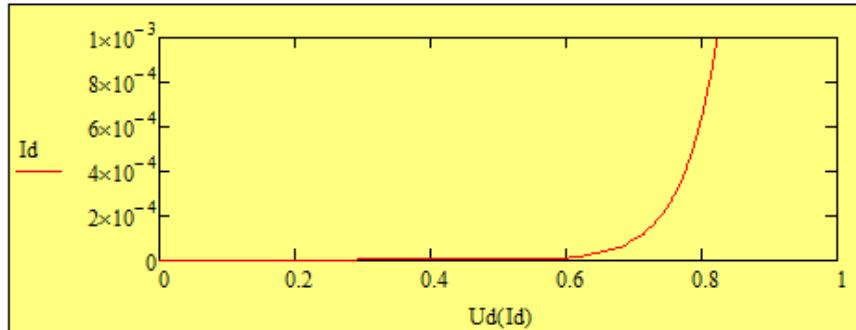


Рисунок 22

На рисунке представлена часть листинга программы по определению параметров модели полупроводникового диода с использованием директив Given Minerr

Собственно, решение системы нелинейных уравнений, показан ниже:

**Вычисление ВАХ при заданных параметрах**

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

$$F(x) = 2.174$$

**Заданные параметры модели**

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

$$Ft = 0.026$$

**Given** открывает блок решения системы

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

первая точка ВАХ, заданная током и напряжением

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

вторая точка ВАХ, заданная током и напряжением

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

третья точка ВАХ, заданная током и напряжением

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

четвертая точка ВАХ, заданная током и напряжением

**Diod\_P := Minerr(IS, Rb, m, Ft)**

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

$$\text{Diod\_P}_0 = 1.013 \times 10^{-10} \quad \text{Diod\_P}_1 = 1 \quad \text{Diod\_P}_2 = 1.972 \quad \text{Diod\_P}_3 = 0.026$$

Проверка решения:

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

$$F(Id) := Id \cdot \text{Diod\_P}_1 + \ln \left[ \frac{(\text{Diod\_P}_0 + Id)}{\text{Diod\_P}_0} \right] \cdot \text{Diod\_P}_2 \cdot \text{Diod\_P}_3$$

$$F(Id) = 0.823$$

Рисунок 23

Важным моментом расчета является процедура проверки полученного решения. Для реализации проверки должен быть построен график, на котором будут присутствовать две кривые – исходная и модельная ВАХ. На графике, таким образом должны совместиться исходная кривая, представленная матрицей данных и график определенной формулой.

.MODEL KD102AD (IS=21.66P N=1.28 RS=1.79 CJO=3.27P TT=6.12E-9  
 + M=0.32 VJ=0.71 FC=0.5 BV=250 IBV=1E-11 EG=1.11 XTI=3 )

MCxxin := READPRN("DIOD\_F.dat") - данные из MCxx demo, массив данных

	0	1	2
MCxxin =	0	0	0
1	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2.14 \cdot 10^{-14}$
2	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4.282 \cdot 10^{-14}$
3	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	...

$L := \text{length}(MCxxin^{(2)})$  - число точек массива MCxx demo  $L = 1.009 \times 10^3$

$\Delta I := \left( \frac{\max(MCxxin^{(2)}) - \min(MCxxin^{(2)})}{L} \right)$  - шаг графика массива MCxx demo  
 $\Delta I = 3.231 \times 10^{-5}$

$I := \min(MCxxin^{(2)}) , \min(MCxxin^{(2)}) + \Delta I .. \max(MCxxin^{(2)})$

$R_s := 3 \cdot R_s$

+

$U(I) := I \cdot R_s + \ln\left(\frac{I + I_s}{I_s}\right) \cdot N \cdot F_t$  - модельная характеристика с параметрами модели,  
 полученными в процессе расчета по исходным  
 данным MCxx

Рисунок 24

При правильном расчете модельных параметров эти кривые должны совпасть с требуемой точностью:

Совместный график, по данным mcxxdemo и расчетом в MathCad

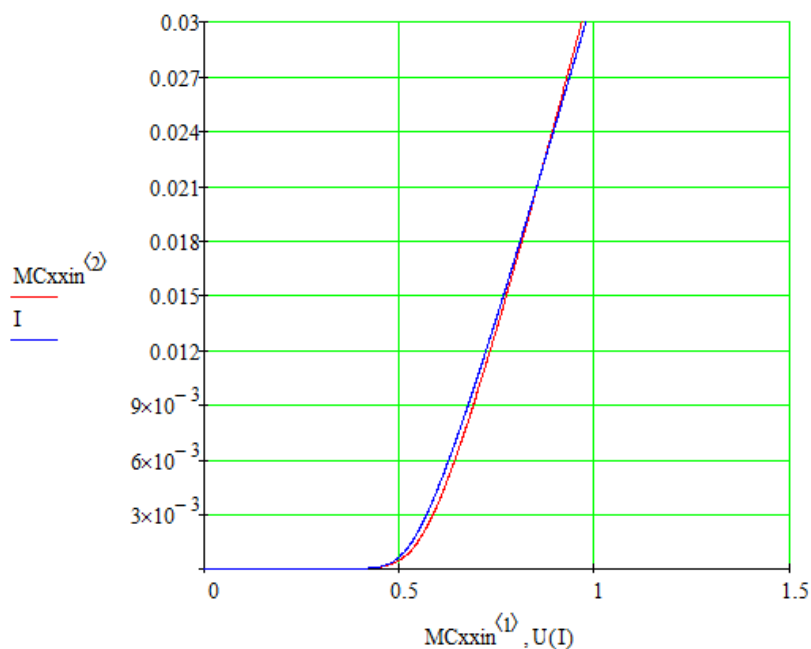


Рисунок 25

Рисунок 26

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА МЕТОДОМ ТРЕХ ОРДИНАТ

Уравнение для модели диода с учётом объёмного сопротивления области базы

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

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

$$U_d = I_d * R_b + N * F_t * \ln(\frac{I_d + I_o}{I_o})$$

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

$$\begin{cases} U_{d1}' = R_b * I_{d1}' + N * F_t * \ln(\frac{I_{d1}'}{I_o}) \\ U_{d2}' = 2 * R_b * I_{d1}' + N * F_t * \ln(\frac{2 * I_{d1}'}{I_o}) \\ U_{d3}' = 4 * R_b * I_{d1}' + N * F_t * \ln(\frac{4 * I_{d1}'}{I_o}) \end{cases}$$

и даст возможность получить решение в виде:

$$\begin{cases} R_b = \frac{(U_{d1}' - 2 * U_{d2}' + U_{d3}')}{I_{d1}'} \\ N * F_t = \frac{(3 * U_{d2}' - 2 * U_{d1}' - U_{d3}')}{\ln(2)} \\ I_o = I_{d1}' * \exp(\frac{-(2 * U_{d2}' - U_{d3}')}{N * F_t}) \end{cases}$$

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

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

В этом случае остальные параметры  $R_b$  и  $I_o$  определяются по двум точкам характеристики  $I_{d1}'$  и  $2 * I_{d1}'$ , что соответствует системе уравнений:



$$\begin{cases} Ud1' = Rb * Id1' + N * Ft * \ln\left(\frac{I1'}{Io}\right) \\ Ud2' = 2 * Rb * Id1' + N * Ft * \ln\left(\frac{2 * I1'}{Io}\right) \end{cases}$$

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 BAX может быть выполнен в соответствии с текстом программы MCAD показанной ниже.

В программе производится считывание таблицы значений BAX из текстового файла за счёт использования функции READPRN, строится график BAX и рассматривается введённая таблица данных:

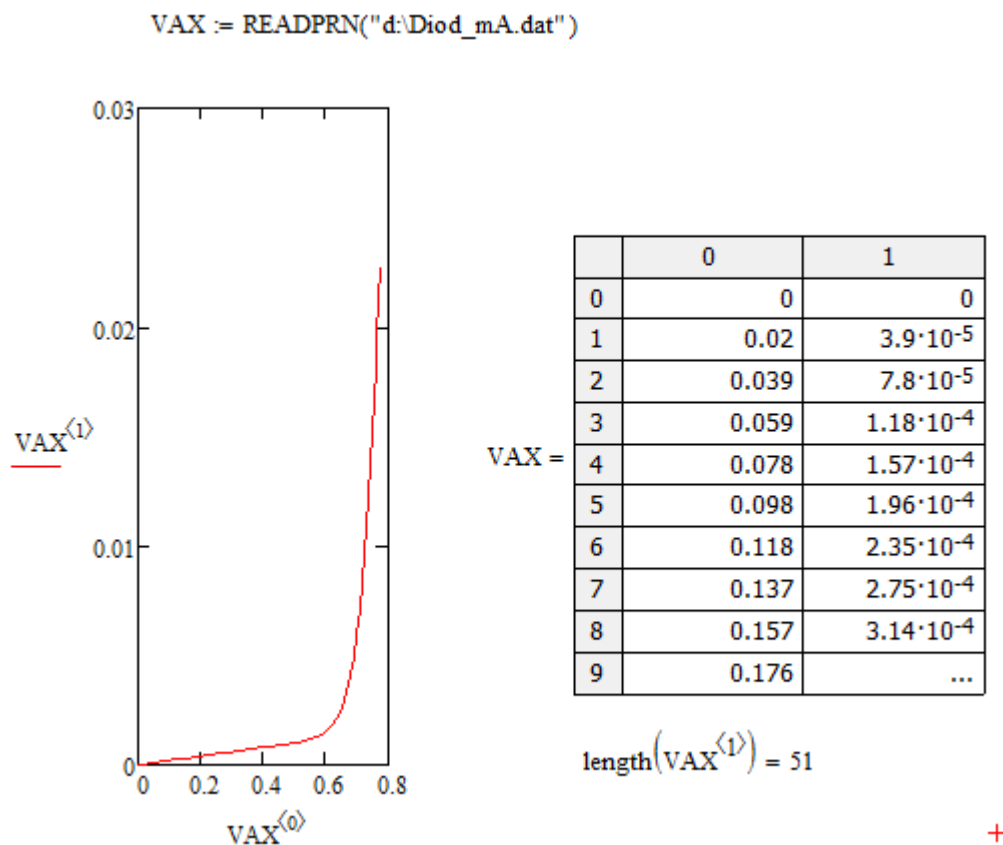


Рисунок 27

Здесь же определяется длина введённой таблицы и показывается возможность обращения к любому элементу таблицы, как к значениям тока, так и значениям напряжения.

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

Рисунок 28

После чего рассчитываются параметры модели. Плотность данных (число точек) полученных в процессе эксперимента может не удовлетворить расчёт, поэтому может потребоваться интерполяция между узловыми точками графика для определения значений токов в расчёте. Это может быть сделано за счёт построения графика и интерполяции между точками 37 и 38 исходных данных для получения значения  $Ud3$  и  $Id3$ .

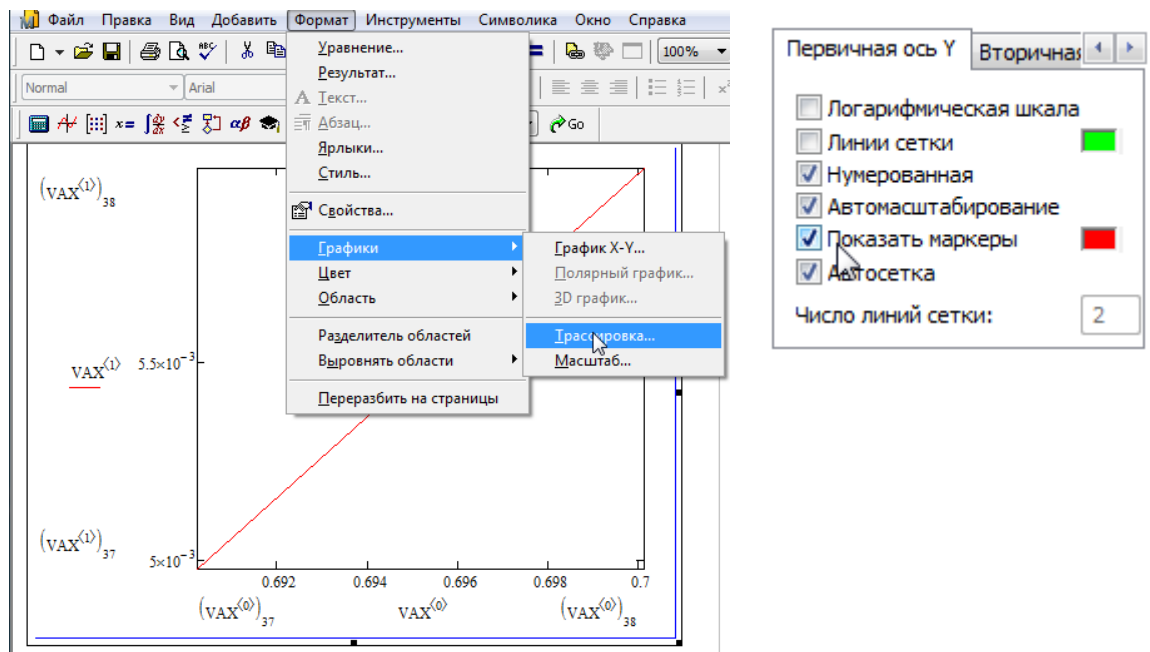


Рисунок 29

Дополнительно можно ввести на график маркеры, то есть линии для значений интересующих токов. Таким образом, можно получить данные по напряжению и току точек:

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

вычисленное значение тока Id1

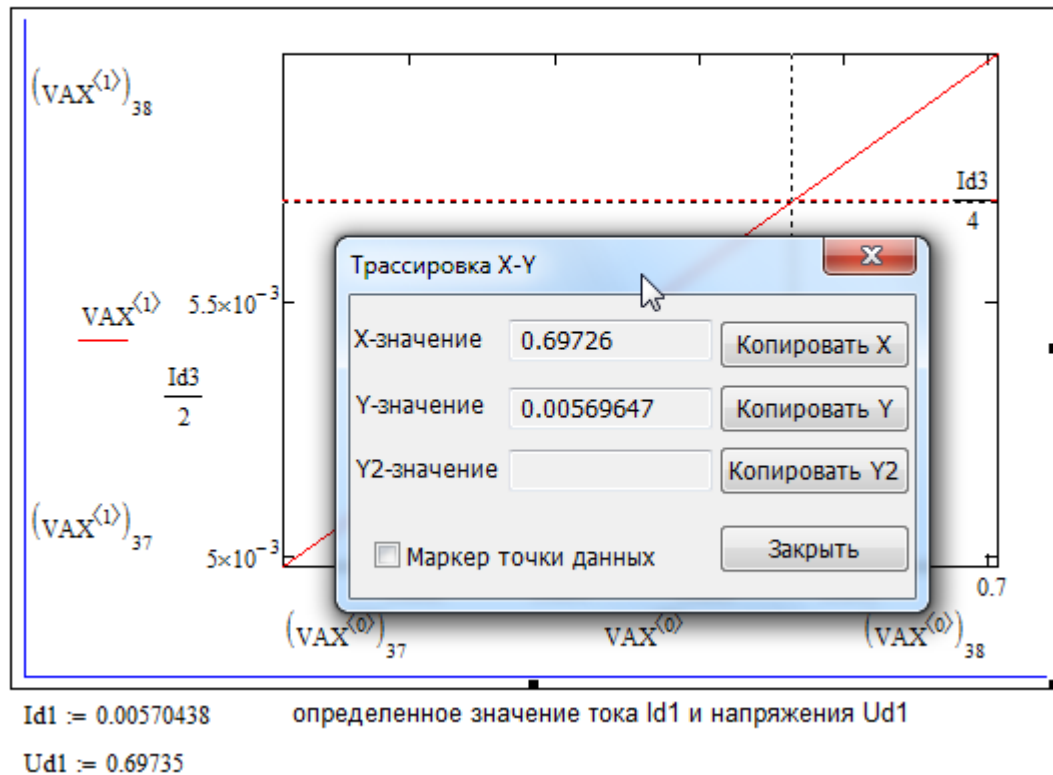


Рисунок 30

Большой интерес представляется вычисление значений интерполированных точек с использованием встроенных функций MCAD.

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

Рисунок 31

Полученный результат требует проверки, а поскольку главной целью построения модели является адекватность модели, то проверку можно провести, построив на одном графике ВАХ экспериментальную и ВАХ модельную.

Необходимо только обеспечить равенство масштабов по осям токов и напряжений. Пример проверки показан на рисунке.

$$L_{\text{tab}} := \text{length}(VAX^{(0)}) \quad \min(VAX^{(1)}) = 0 \quad \max(VAX^{(1)}) = 0.023$$

$$\Delta I := \left( \frac{\max(VAX^{(1)}) - \min(VAX^{(1)})}{L_{\text{tab}}} \right) \quad \Delta I = 4.474 \times 10^{-4}$$

$$I := \min(VAX^{(1)}), (\min(VAX^{(1)}) + \Delta I) .. \max(VAX^{(1)})$$

$$Is0 = 1.572 \times 10^{-8}$$

$$Rb = 0.414$$

$$U(I) := I \cdot Rb + \ln \left[ \frac{(I + Is0)}{(Is0)} \right] \cdot NFt$$

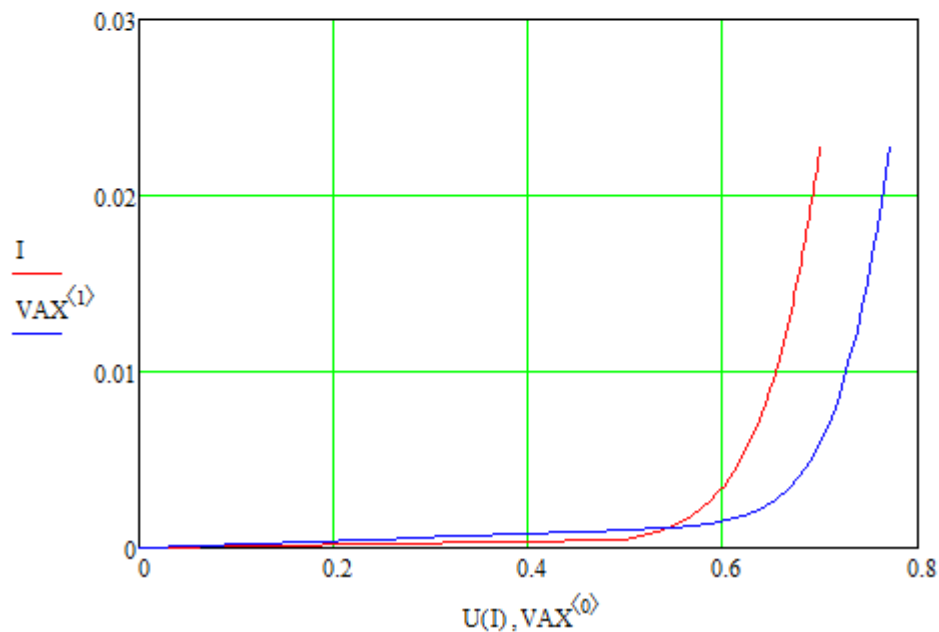


Рисунок 32

При определении тока  $Is0$  могут возникнуть трудности в визуализации этого тока. По умолчанию MCAD все значения менее  $10^{-15}$  будет считать нулём. Для отображения меньших значений можно использовать возможности форматирования полученного результата установив нулевой порог отображения числа

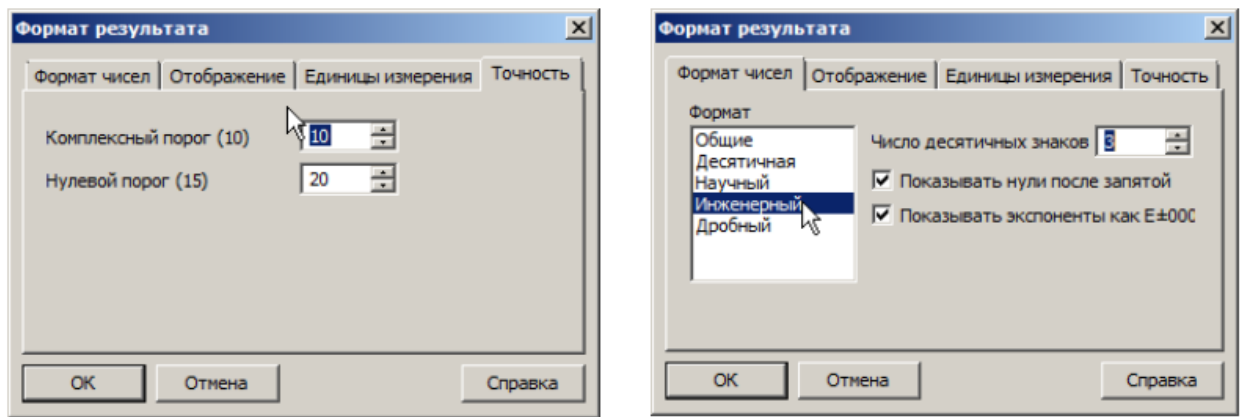


Рисунок 33



## РАБОТА С ПРОГРАММОЙ MODEL ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ ДИОДА

Для версии Microcap 7 вызов программы может быть осуществлен непосредственно как из меню программы, так и запустив на выполнение файл model.exe. Исполняемый файл можно найти в каталоге программы на жестком диске.



mc7	exe	3 182 592
model	exe	249 856
Mc7	hlp	1 410 004
Model	hlp	76 718

Рисунок 34

После выбора пункта New... в окне New File Name производится выбор типа прибора для ввода данных с целью получения параметров модели. В этом же окне задаётся и путь до файла с расширением MDL – файла программы MODEL.

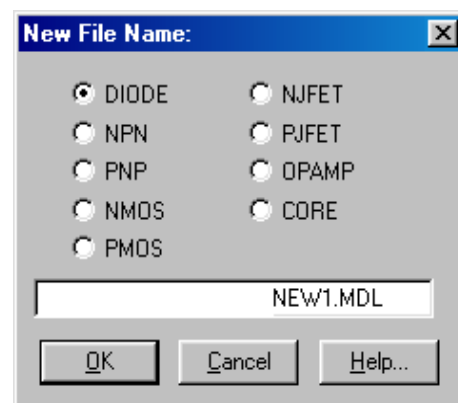
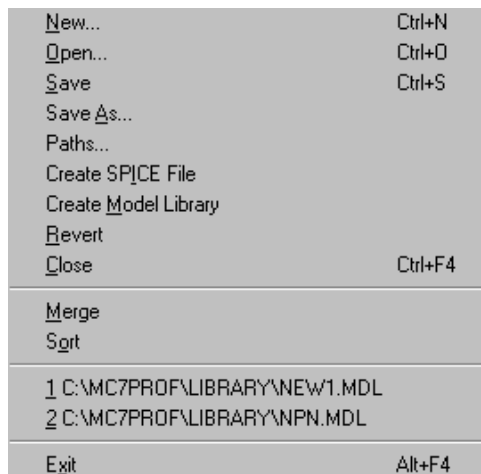


Рисунок 35

После этих действий программа представляет из себя набор окон (их четыре для полупроводникового диода), которые должны быть заполнены экспериментальными данными и здесь же будут показаны результаты расчетов параметров модели. Для того, чтобы перейти в многооконный вид работы с программой расчета в пункте меню View необходимо выбрать All Graphs

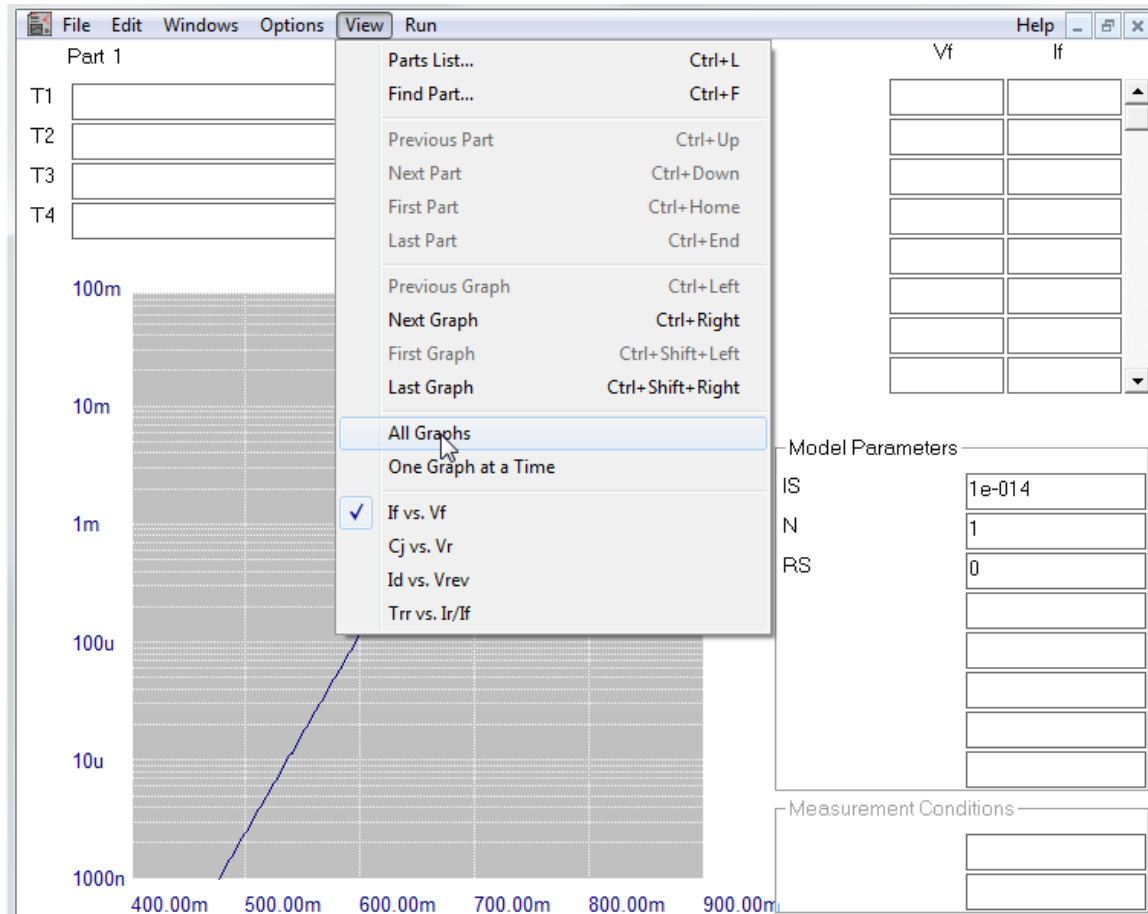


Рисунок 36

Тип расчета параметров определяет подчеркнутое название окна расчета:



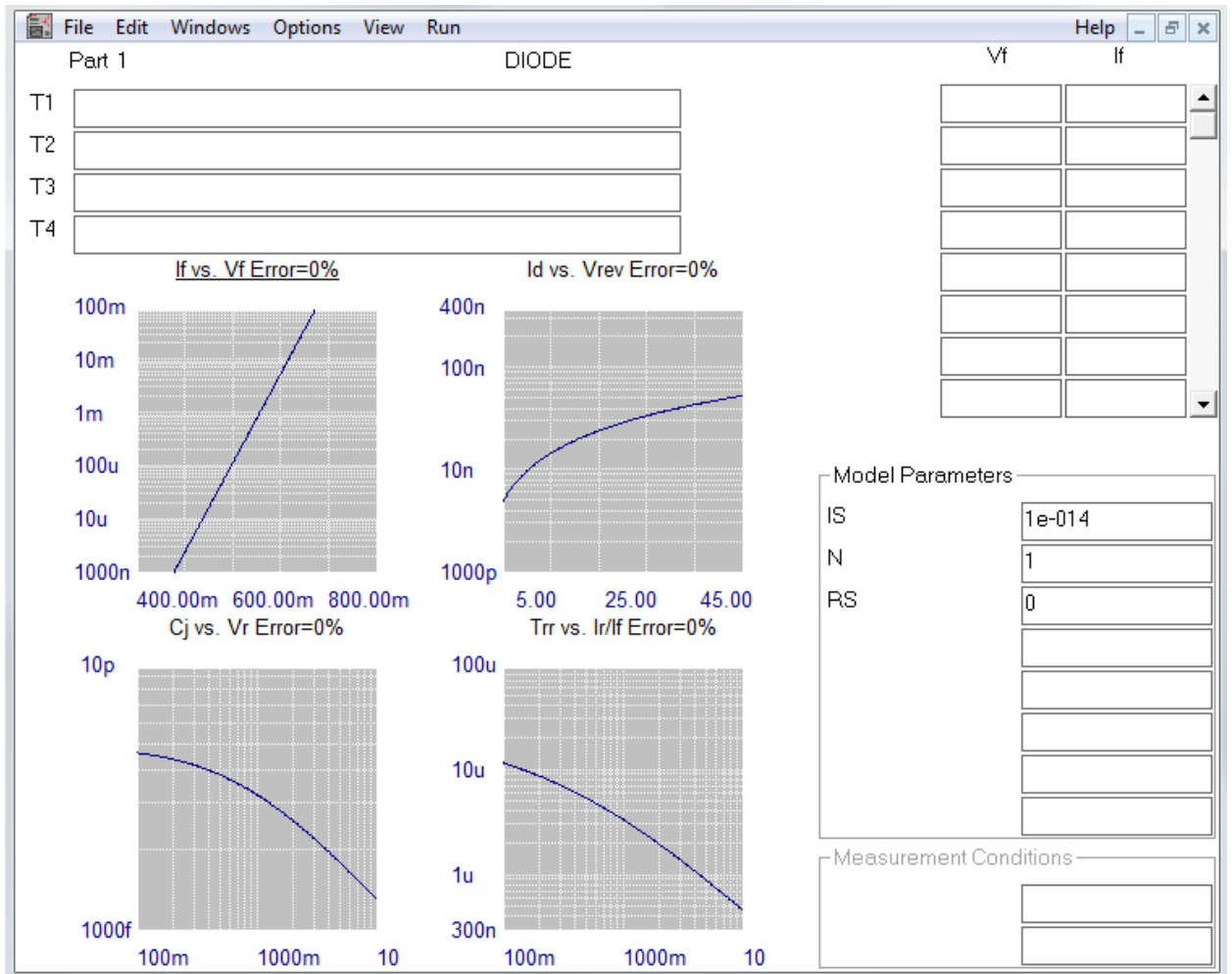


Рисунок 37

Основные компоненты любого окна MODEL следующие:

Part 1	DIODE
T1	D100MyDiod
T2	Практикум по Электронике
T3	Diod_In
T4	Работа с программой Model

Рисунок 38

Текстовые поля: имеются четыре поля текстовые поля: 'T1', 'T2', 'T3', и 'T4'.

'T1' и 'T3' импортируются в библиотеки модели MC7. Поле 'T1' определяет название компонента и используется в библиотеке. Другие текстовые поля служат только как дополнительная документация.

Числовые поля данных: имеют от одного до трех полей данных, в зависимости от Типа устройства и исходных графиков. В поле данных может быть введено от одной до пятидесяти позиций. Данные обычно получаются по ВАХ прибора. Если ВАХ нет, то может быть использована единственная пара значений, найденная в справочниках. Если же и в справочниках нет данных, то параметры модели задаются по умолчанию.

*Примечание: Удалить данные из таблицы можно за счёт нажатия горячих клавиш CTRL/D, или через пункт меню Edit – Delete Data, предварительно выбрав строку данных*

Начало работы с программой: первое окно расчёта параметров модели полупроводникового диода.

В полях **Model Parameters** расположены значения модельных параметров. Они могут быть исправлены пользователем по экспертным значениям. Поля Условий эксперимента **Measurement Condition**: здесь приводят значение условия проведения эксперимента в процессе получения исходных данных.

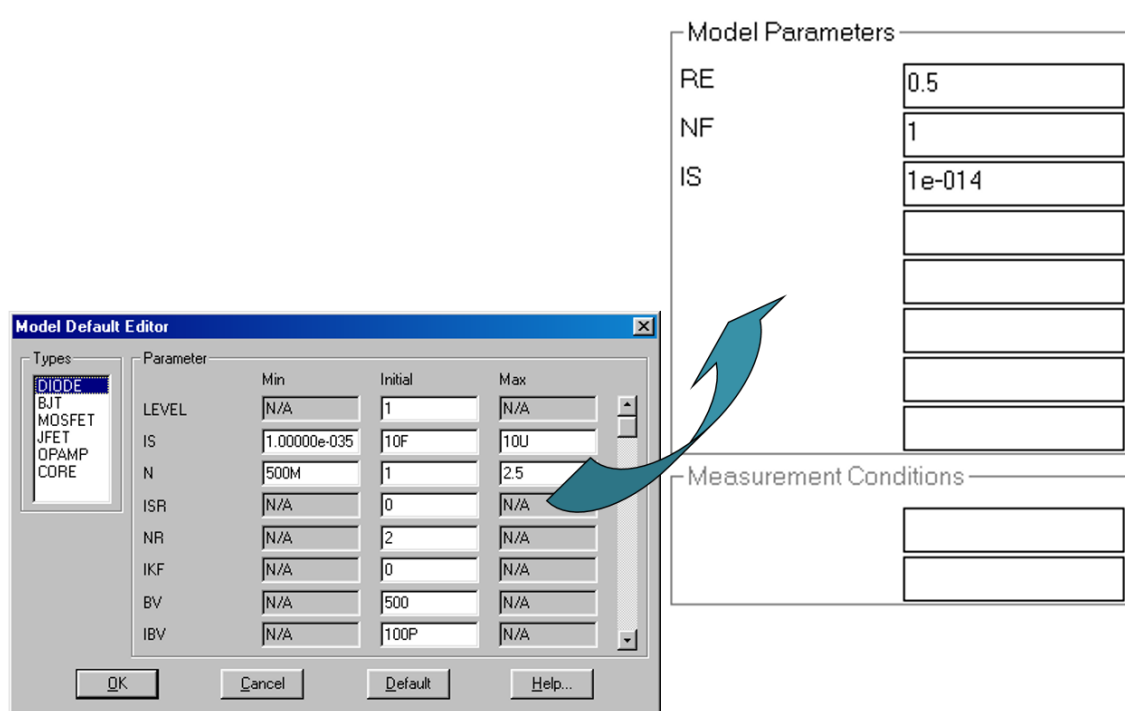


Рисунок 39

*Примечание: Начальные, по умолчанию параметры задаются в окне Model Default Editor*

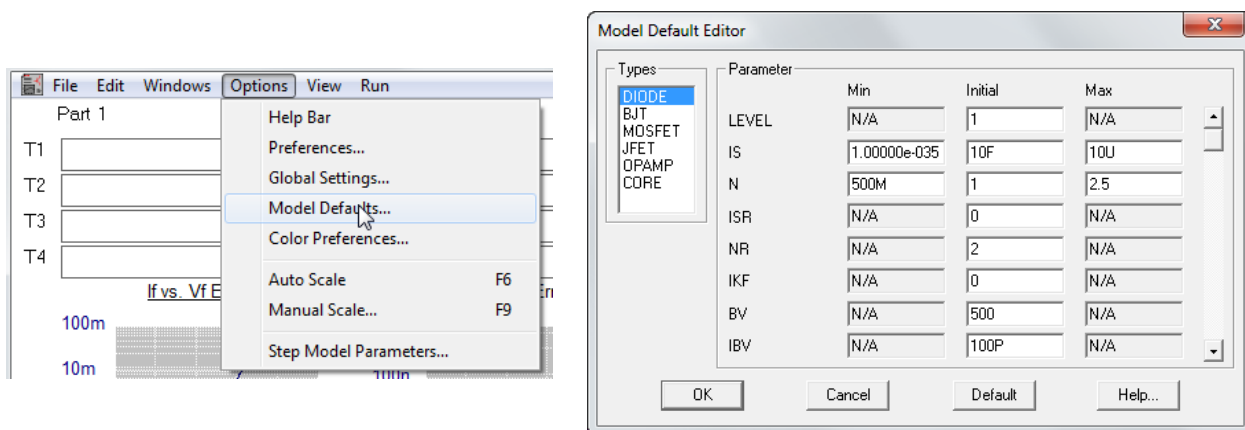


Рисунок 40

Расчет параметров модели происходит после последовательного выбора в пункте меню Run пунктов Initialize и Optimize

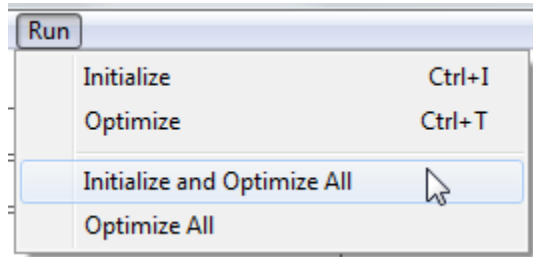


Рисунок 41

В первом окне расчета производится определение параметров расчета исходя из данных на прямой ветви

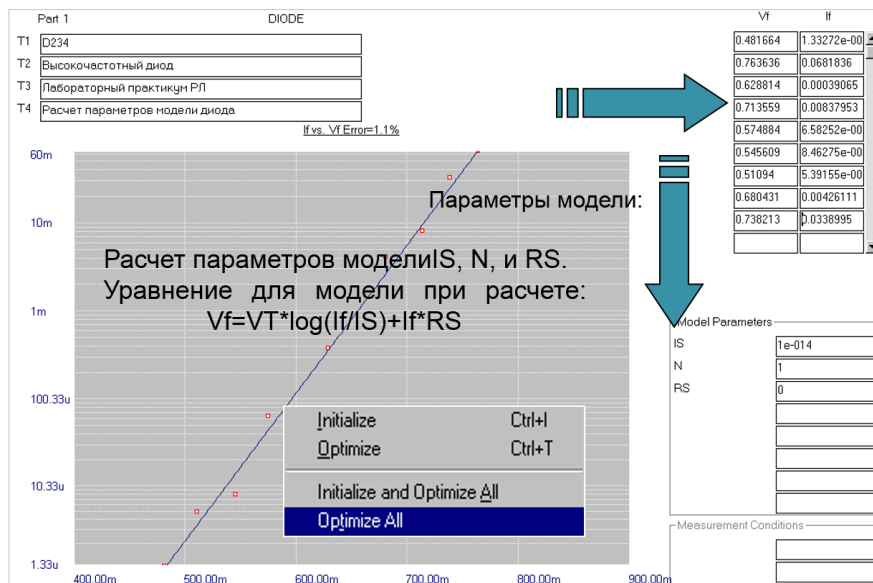


Рисунок 42

Вводить данные можно как в таблицу, так и графически (щелчком мыши на графике).

Второй экран посвящен расчету параметров из вольтфарадной характеристики.

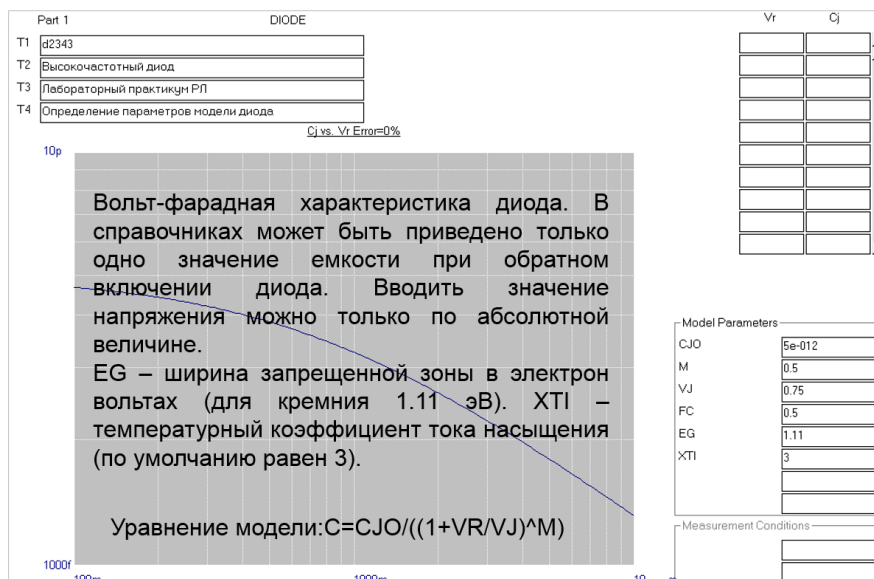


Рисунок 43

Третий экран программы обрабатывает данные, полученные при изучении обратной ветви ВАХ диода.

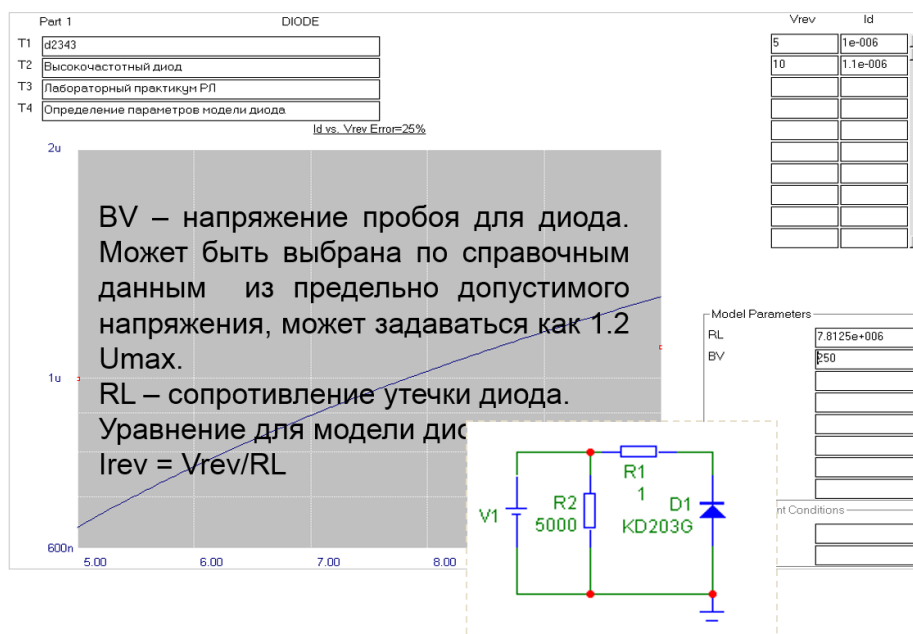


Рисунок 44

В этом расчете параметр BV – напряжение пробоя для диода. Он может быть выбрана по справочным данным из предельно допустимого напряжения, может задаваться как 1.2 Umax.

Четвертый экран рассчитывает время жизни неосновных носителей из данных о времени восстановления обратного сопротивления диода. Числовая характеристика процесса восстановления равновесной концентрации определяется значением постоянной времени (обозначается как TT) для диода (среднее время жизни носителей). Это время можно определить следующими способами:

- В общем случае постоянная времени для диода может быть определено:  
 $TT = t_{вос}(1 + \ln(I_{пр}/I_{обр}))$

- Постоянная времени для диода при сплавной технологии может быть определено как

$$TT = 4 t_{вос}(1 + \ln(I_{пр}/I_{обр})) \quad -- \quad [4 T_{rr} * (1 + \ln(I_{rr}/I_f))].$$

где –  $t_{вос}$  время восстановления обратного сопротивления,  $I_{пр}$  - значение прямого тока при котором было измерено значение времени восстановления обратного сопротивления (если данный параметр не указан в ТУ на диод, то вместо вводим значение постоянного прямого тока),  $I_{обр}$  - постоянный обратный ток. При диффузионной технологии можно положить  $TT = 1.6 t_{вос}$ .

- При известной максимальной частоте выпрямления  $f_{max}$  можно оценить время постоянную времени как  $TT = [1/(2 * \pi * f_{max})]$ .

Обработка экспериментальных данных может быть проведена в программе MCAD:

$$I_{пр} := 25.854 \times 10^{-3}$$

$$I_{обр} := (2.7 \cdot 10^{-3}) \quad \text{ratio} := \frac{I_{обр}}{I_{пр}}$$

$$T_{вос} := 3.017 \times 10^{-9} \quad \text{ratio} = 0.104$$

$$T_{rr} := \frac{T_{вос}}{\ln\left(1 + \frac{I_{пр}}{I_{обр}}\right)} \quad T_{rr} = 1.279 \times 10^{-9}$$

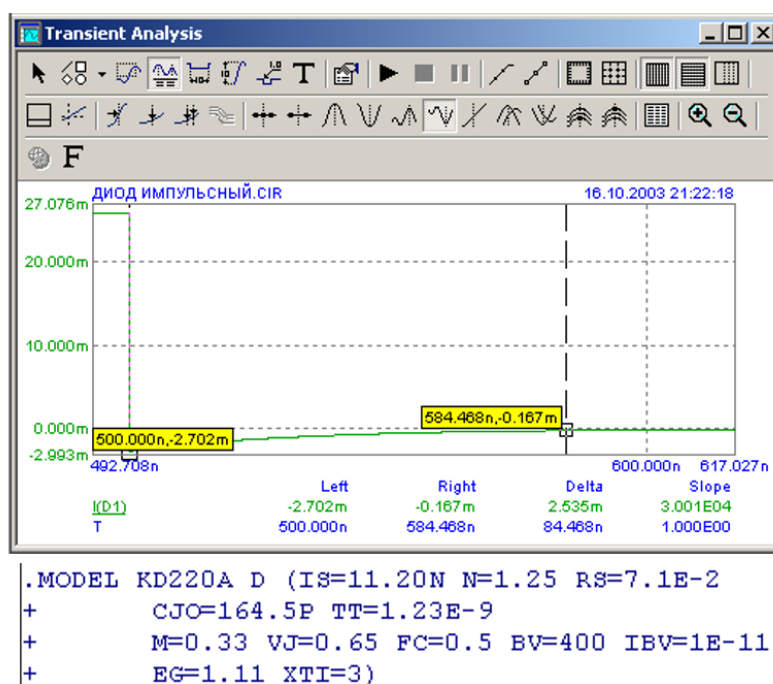


Рисунок 45

*Примечание: программа предоставляет возможность изучить влияние вариации отдельных параметров на вид различных характеристик через пункт меню Step Model Parameters*

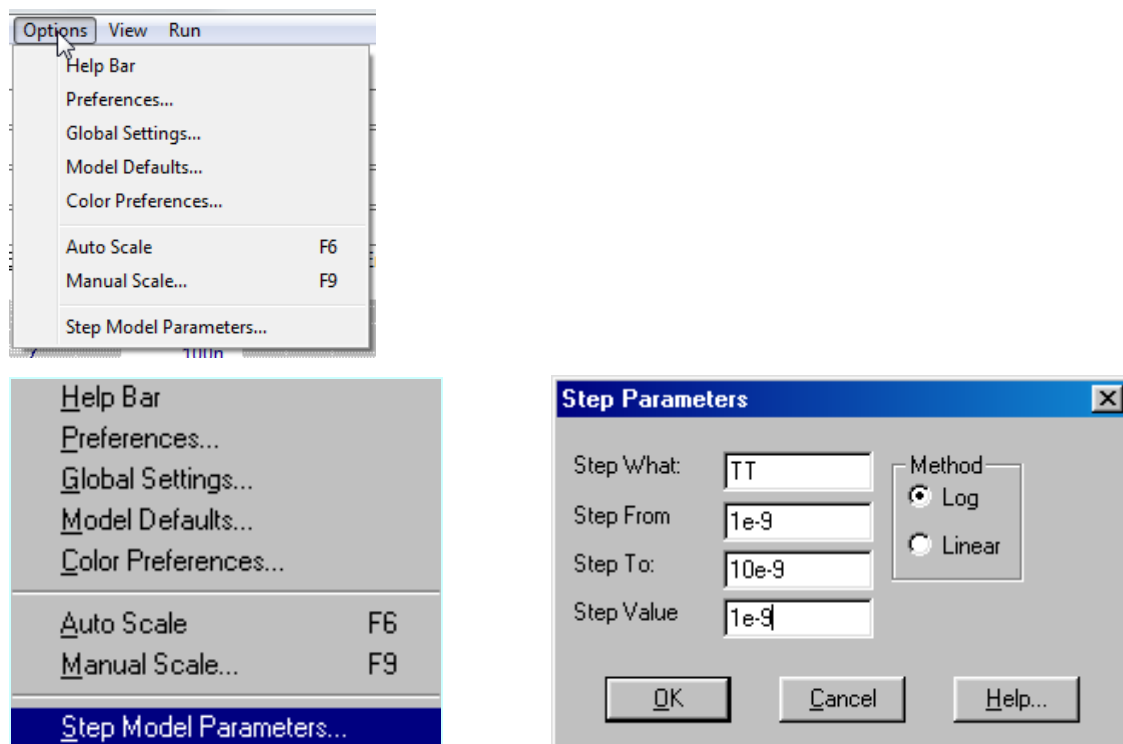


Рисунок 46

После нажатия экранной кнопки ОК программа будет готова к расчёту исходного графика с заданными пределами изменения параметра модели. Изменение параметра модели и перестроение графика произойдёт сразу после нажатия любой клавиши. Одновременно в окне Model Parameters будет указано значение этого параметра для перестроенного графика.

После расчёта параметров модели можно сохранить данные в форматах:

- В формате SPICE (файл с расширением LIB) и
- в формате упакованного файла для MC7 (расширение LBR).
- Соответственно пункты меню для этих расчетов Create SPICE File и Create Model Library

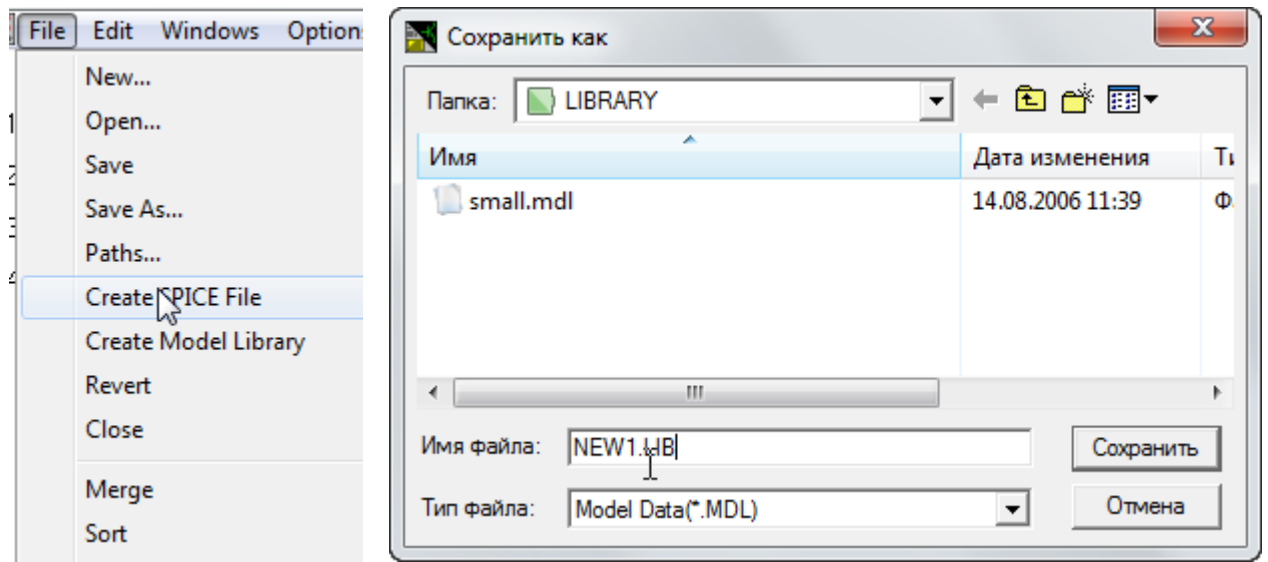


Рисунок 47

При сохранении файла библиотеки рекомендуется задавать расширение файла явно.

## **ПОСТРОЕНИЕ ВОЛЬТФАРАДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ПРОГРАММЕ MATHCAD**

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

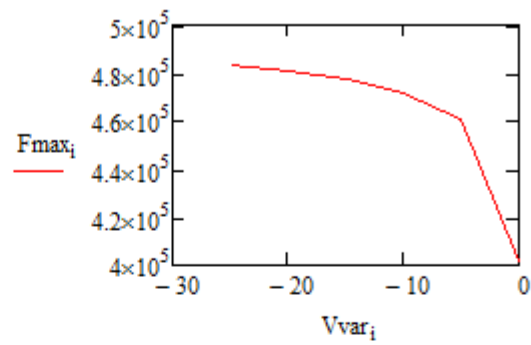


$i := 0..5$ 
 $F_{\max_i} :=$ 

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

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

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

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

$$\pi := 3.14$$

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

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

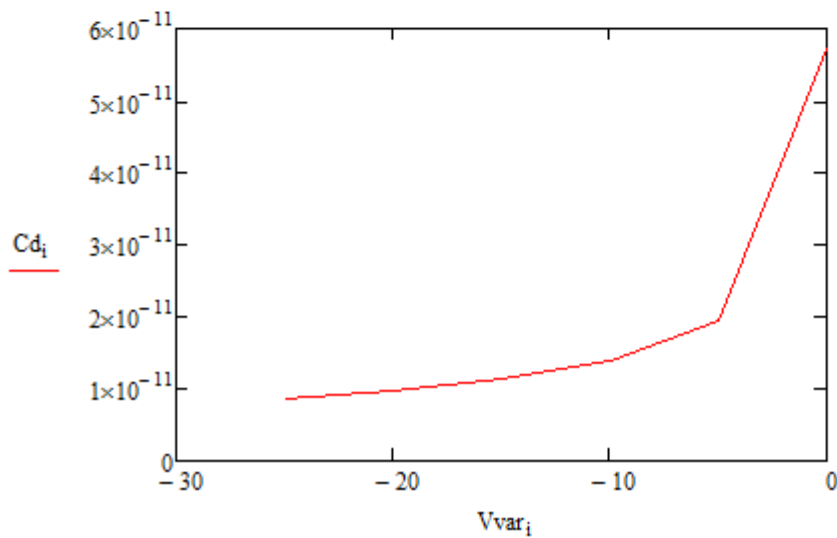


Рисунок 48



## ЧТЕНИЕ ДАННЫХ ИЗ ФАЙЛА В ПРОГРАММЕ MATHCAD

Чтение файла данных в программе MathCAD осуществляется встроенной функцией READPRN

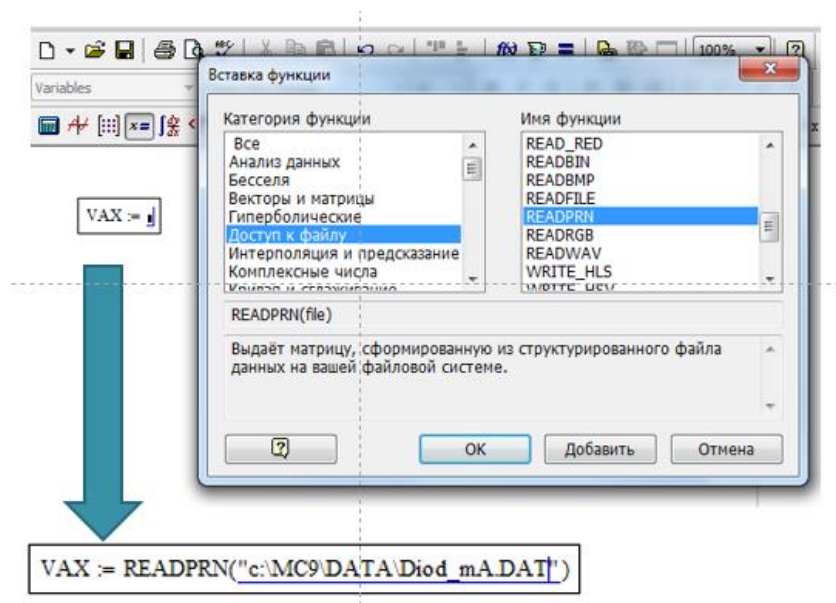


Рисунок 49

Полученную матрицу данных можно использовать как для доступа к отдельным элементам полученных данных:

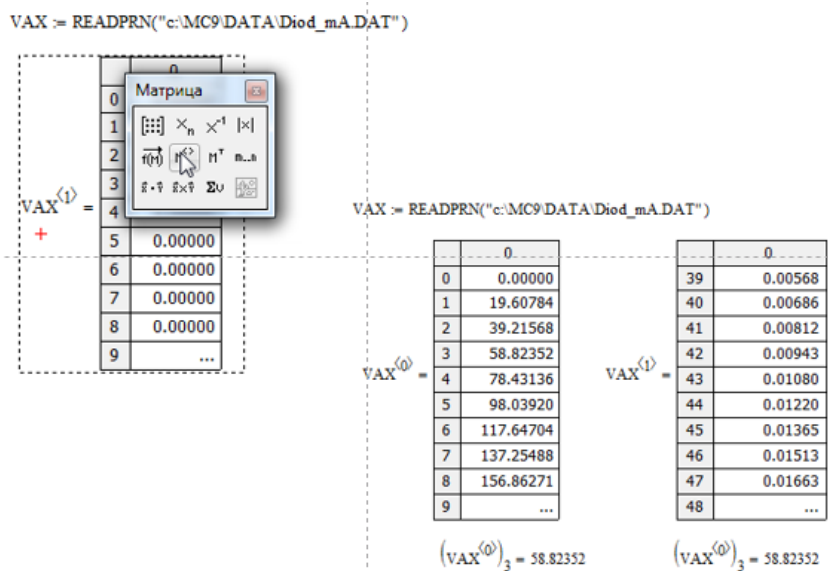


Рисунок 50

так и для построения графиков

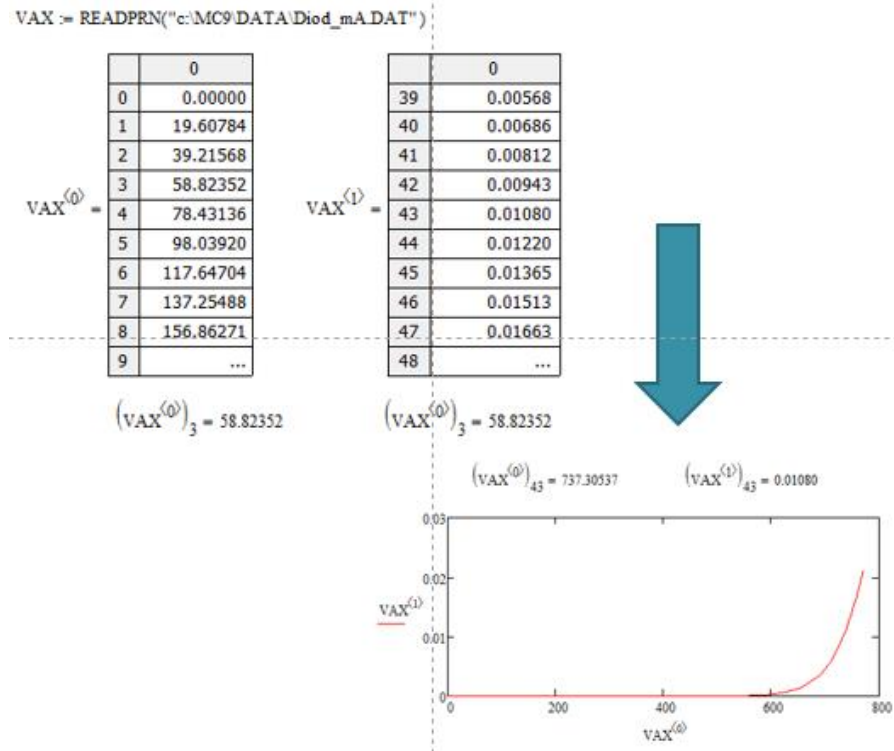


Рисунок 51

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ИХ СВОЙСТВА

Полупроводниковым диодом называют прибор с одним р-п-переходом, имеющим два вывода: анод А и катод К. Теоретическая вольтамперная характеристика р-п-перехода и отличие реальной ВАХ диода (кривая 2) от теоретической (кривая 1) показаны ниже на рисунке

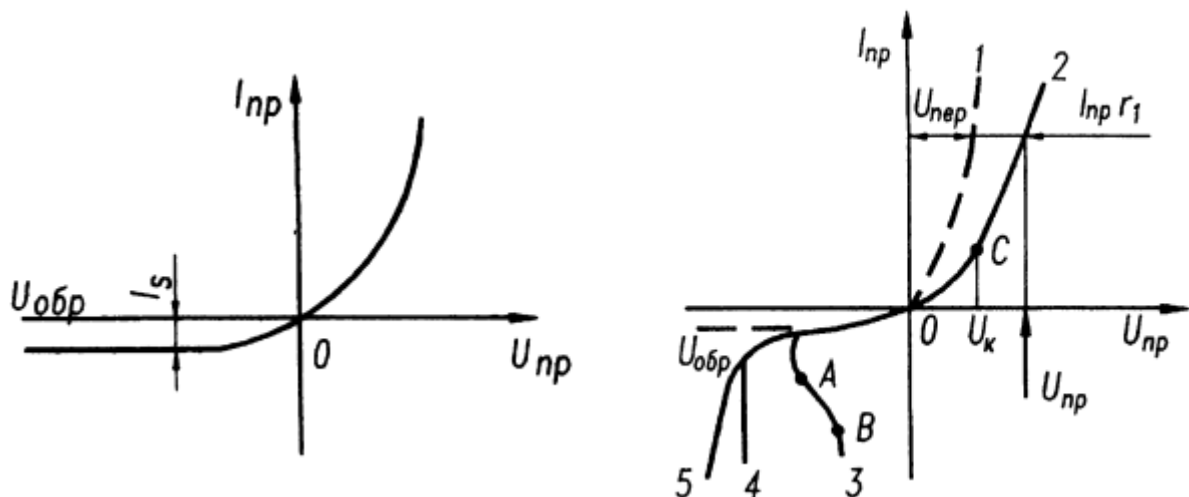


Рисунок 52

При обратном включении р-п-перехода отличия обусловлены генерацией носителей зарядов и пробоем р-п-перехода. Количество генерируемых носителей пропорционально объему запирающего слоя, который зависит от ширины р-п-перехода. Поскольку ширина запирающего слоя пропорциональна **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**, ток генерации будет расти при увеличении обратного напряжения. Поэтому на реальной характеристике при увеличении обратного напряжения до определенного значения наблюдается небольшой рост обратного тока. Возрастанию обратного тока способствуют также токи утечки.

При некотором обратном напряжении наблюдается резкое возрастание обратного тока. Это явление называют пробоем р-п-перехода. Существуют три вида пробоя: туннельный, лавинный и тепловой. Туннельный и лавинный пробой представляют собой разновидности электрического пробоя и связаны с увеличением напряженности электрического поля в переходе. Тепловой пробой определяется перегревом перехода.

Туннельный пробой обусловлен прямым переходом электронов из валентной зоны одного полупроводника в зону проводимости другого, что становится возможным, если напряженность электрического поля в р-п-переходе из кремния достигает значения  $4 \cdot 10^5$

В/см, а из германия  $2 \cdot 10^5$  В/см. Такая большая напряженность электрического поля возможна при высокой концентрации примесей в р- и n-областях, когда толщина р-n-перехода становится весьма малой. Под действием сильного электрического поля валентные электроны вырываются из связей. При этом образуются парные заряды электрон-дырка, увеличивающие обратный ток через переход. На рисунке кривая 5 представляет собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики перехода, соответствующую туннельному пробую.

В широких р-n-переходах, образованных полупроводниками с меньшей концентрацией примесей, вероятность туннельного просачивания электронов уменьшается и более вероятным становится лавинный пробой. Он возникает тогда, когда длина свободного пробега электрона в полупроводнике значительно меньше толщины р-n-перехода. Если за время свободного пробега электроны накапливают кинетическую энергию, достаточную для ионизации атомов в р-n-переходе, наступает ударная ионизация, сопровождающаяся лавинным размножением носителей зарядов. Образовавшиеся в результате ударной ионизации свободные носители зарядов увеличивают обратный ток перехода. Увеличение обратного тока характеризуется коэффициентом лавинного умножения  $M$ :

**Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**

где **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** - напряжение пробоя;  $m$  зависит от материала полупроводника.

Тепловой пробой обусловлен значительным ростом количества носителей зарядов в р-n-переходе за счет нарушения теплового режима. Подводимая к р-n-переходу мощность расходуется на его нагрев. При плохих условиях отвода теплоты от перехода возможен его разогрев до температуры, при которой происходит тепловая ионизация атомов. Образующиеся при этом носители заряда увеличивают обратный ток, что приводит к дальнейшему разогреву перехода. В результате такого нарастающего процесса р-n-переход недопустимо разогревается и возникает тепловой пробой, характеризующийся разрушением кристалла (кривая 3 на приведенном выше рисунке).

Из ВАХ диода следует, что он обладает неодинаковой электрической проводимостью в прямом и обратном направлениях его включения. Поэтому полупроводниковые диоды используют в схемах выпрямления переменного тока.

Так как напряжение на полностью открытом диоде не превышает 0,5...0,7 В, то для приближенных расчетов диод рассматривают как вентиль: открыт — закрыт, имеющий ВАХ, изображенную на рисунке

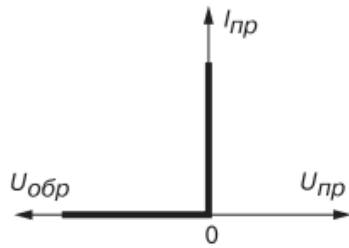


Рисунок 53

Анализ типовых ВАХ диодов показывает, что прямое напряжение  $U_{пр}$  на германиевом диоде почти в два раза меньше, чем на кремниевом, при одинаковых значениях прямого тока  $I_{пр}$ , а обратный ток  $I_{обр}$  кремниевого диода значительно меньше обратного тока германиевого при одинаковых обратных напряжениях  $U_{обр}$ . К тому же, германиевый диод начинает проводить ток при ничтожно малом прямом напряжении  $U_{пр}$ , а кремниевый — только при  $U_{пр} = 0,4...0,5$  В.

Исходя из этих свойств, германиевые диоды применяют как в схемах выпрямления переменного тока, так и для обработки сигналов малой амплитуды (до 0,3 В), а кремниевые, наиболее распространённые — как в схемах выпрямления, так и в схемах устройств, в которых обратный ток недопустим или должен быть ничтожно мал. К тому же, кремниевые диоды сохраняют работоспособность до температуры окружающей среды 125... 150 °С, тогда как германиевые могут работать только до 70 °С.

## ДИОД ВАРИКАП

Полупроводниковый диод, действие которого основано на использовании зависимости барьерной емкости  $C_{бар}$  от значения приложенного обратного напряжения называется варикапом. Это позволяет применить варикап в качестве элемента с электрически управляемой емкостью.

Основной характеристикой варикапа является вольтфарадная характеристика - зависимость барьерной емкости от значения приложенного обратного напряжения. Схематическое изображение варикапа и его вольтфарадная характеристика приведены на рисунке 1.

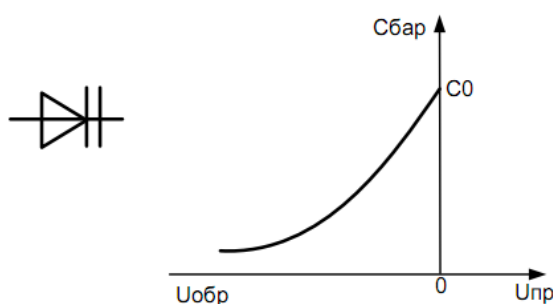


Рисунок 54

В выпускаемых промышленностью варикапах значение емкости может изменяться от единиц до сотен пикофард. Основными параметрами варикапа являются:  $C_v$  - емкость, измеренная между выводами варикапа при заданном обратном напряжении;  $K_c$  - коэффициент перекрытия по емкости, используемый для оценки зависимости  $C_v = f(U_{обр})$  и равный отношению емкостей варикапа при двух заданных значениях обратного напряжения ( $K_c = 2 - 20$ ). Варикапы применяются в качестве конденсатора с управляемой емкостью. Их делят на построечные и умножительные, или варакторы. Подстроечные варикапы используют для изменения резонансной частоты колебательных систем.

В упражнении определяется вольтфарадная характеристика полупроводникового диода, полученная при экспериментальном исследовании резонансных характеристик параллельного колебательного контура к которому параллельно подсоединён полупроводниковый диод. При изменении управляющего напряжения от источника постоянного тока меняется барьерная ёмкость полупроводникового диода, что вызывает изменение резонансной частоты собственно контура. Фиксируя эти изменения и зная параметры колебательного контура можно рассчитать величину барьерной ёмкости диода,



которая вызывает смещение резонансной частоты, и построить вольтфарадную характеристику барьерной компоненты ёмкости диода.

В теории доказывается, что образование р-п перехода связано с возникновением объёмных зарядов  $Q$ , создаваемых неподвижными ионизованными атомами примесей. Приложенное к переходу внешнее напряжение изменяет величину объёмного заряда в переходе.

Следовательно, р-п переход ведёт себя как своеобразный плоский конденсатор. Обкладками конденсатора служат проводящие области п и р, а изолятором обеднённый носителями слой объёмного заряда, имеющий большое сопротивление. В зависимости от физической природы изменяющегося заряда различают ёмкости зарядную (барьерную) и диффузионную.

Особенностью этого конденсатора, отличающей его от обычного, является то, что ёмкость меняется при изменении приложенного напряжения. Действительно, объёмный заряд образуется неподвижными атомами примеси, и любое увеличение его должно быть связано с изменением ширины области, занимаемой объёмным зарядом. Это эквивалентно увеличению расстояния между пластинами обычного конденсатора и уменьшению его ёмкости. Ёмкость резкого перехода получается равной

**Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**

Выражение определяет так называемую барьерную ёмкость р-п перехода при заданном напряжении на нем. Её существование не связано с протеканием тока через переход, и, за исключением нелинейности, барьерная ёмкость р-п перехода аналогична по свойствам ёмкости обычного конденсатора.

Барьерная ёмкость р-п перехода диода при нулевом напряжении **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**, в параметрах модели эта ёмкость обозначается как  $C_{JO}$ .

Барьерная ёмкость связана с напряжением выражением

**Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**

Где **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** напряжение на диоде в момент измерения; **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** ёмкость диода при напряжении **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**;  $\varphi_{кон}$  контактная разность потенциалов перехода, в параметрах модели этот параметр обозначается как  $V_J$ ; **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** показатель степени, который зависит от технологии изготовления диода: если диод сплавной, то переход резкий и **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**=

0.5, если диффузионный, то переход плавный и **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** = 0.33. Для реального диода значения **Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.** могут лежать в указанном диапазоне.

Характер зависимости барьерной составляющей емкости диода от приложенного напряжения имеет вид, показанный на рисунке, вольтфарадная характеристика,

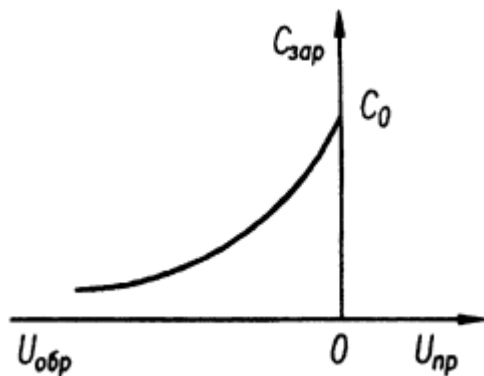


Рисунок 55

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТИ ДИОДА

Определить параметры барьерной емкости можно из эксперимента изменения резонансной частоты колебательного контура к которому подключен полупроводниковый диод – управляемая емкость (диод варикап).

Схема эксперимента для программы Microcap показана ниже на рисунке:

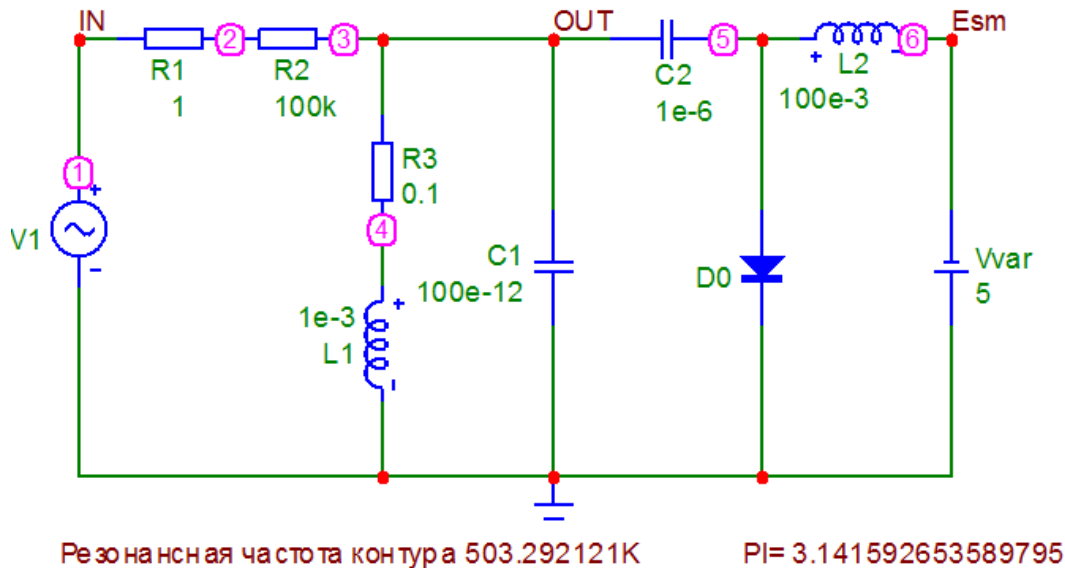


Рисунок 56

Особенности схемы состоят в том, что прямое подключение диода к колебательному контуру, при управлении от источника Vvar невозможно. Малое внутреннее сопротивление источника управления резко снизит добротность контура

Резонансная частота колебательного контура может быть подсчитана внутри программы Microcap – встроенным калькулятором.

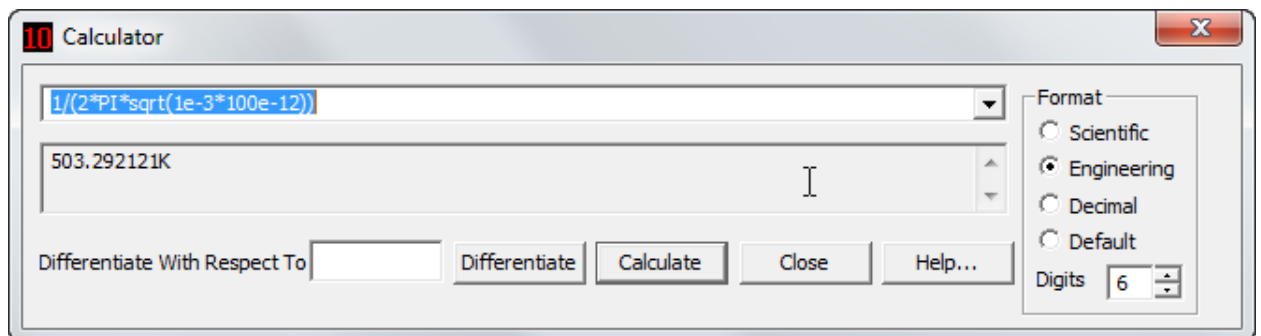


Рисунок 57

При проведении частотного анализа диалоговое окно пределов анализа определяет основные параметры анализа

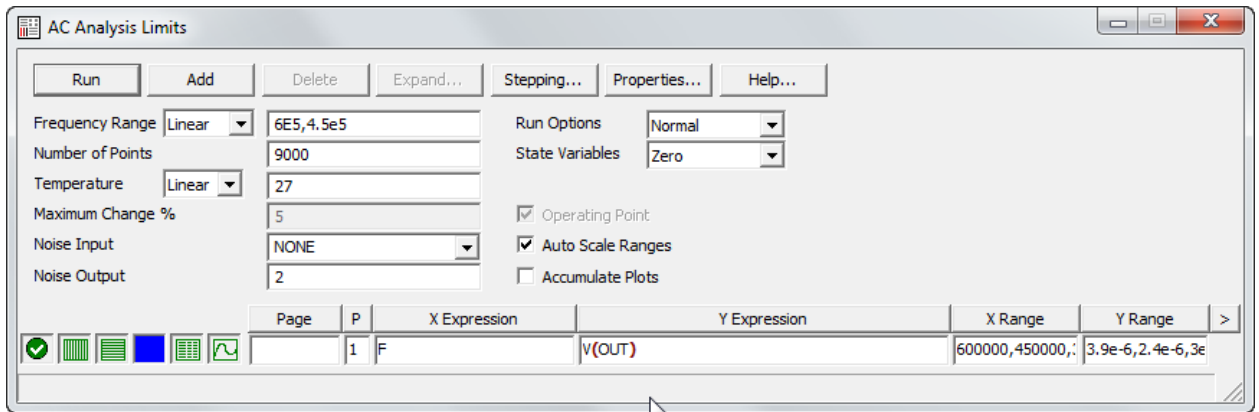


Рисунок 58

Frequency Range – задает пределы анализа по форме  $F_{max}$ ,  $F_{min}$ , 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 рисунке:

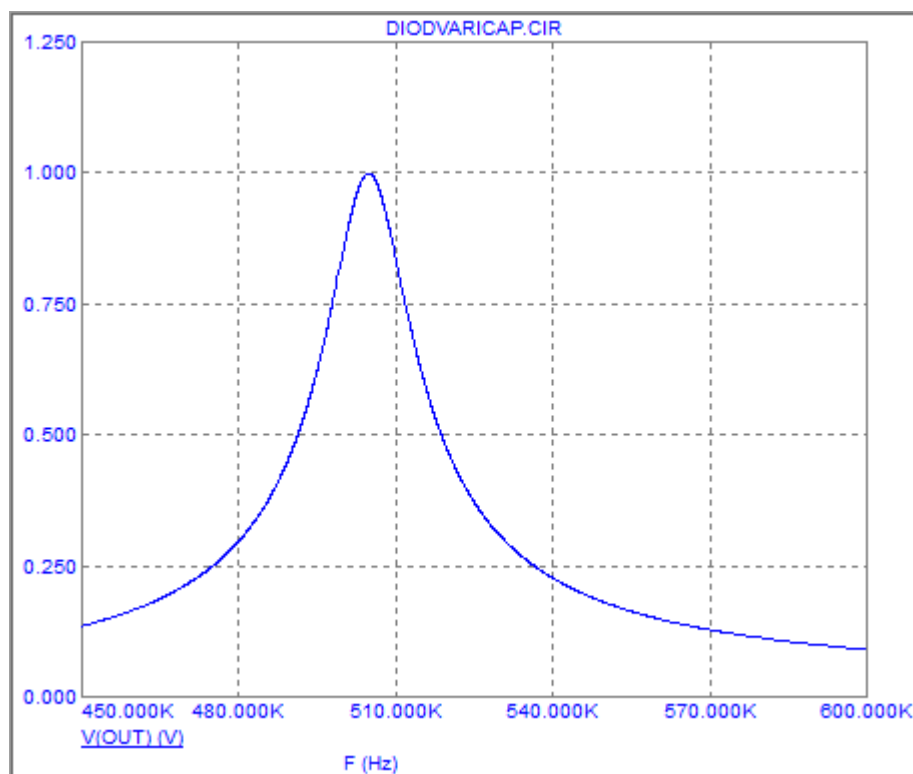


Рисунок 59

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 AC анализа, или за счет нажатия экранной кнопки Stepping, или горячей клавиши F11).

1: VVAR.dc	2:	3:	4:	5:	6:	7:	8:	9:	10:	11:	12:	13:
Step What: <input type="text" value="VVAR"/> dc.value												
From: <input type="text" value="1"/>												
To: <input type="text" value="30"/>												
Step Value: <input type="text" value="3"/>												
Step It <input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No			Method <input checked="" type="radio"/> Linear <input type="radio"/> Log <input type="radio"/> List				Parameter Type <input checked="" type="radio"/> Component <input type="radio"/> Model <input type="radio"/> Symbolic					

Рисунок 60

В диалоге задается 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.

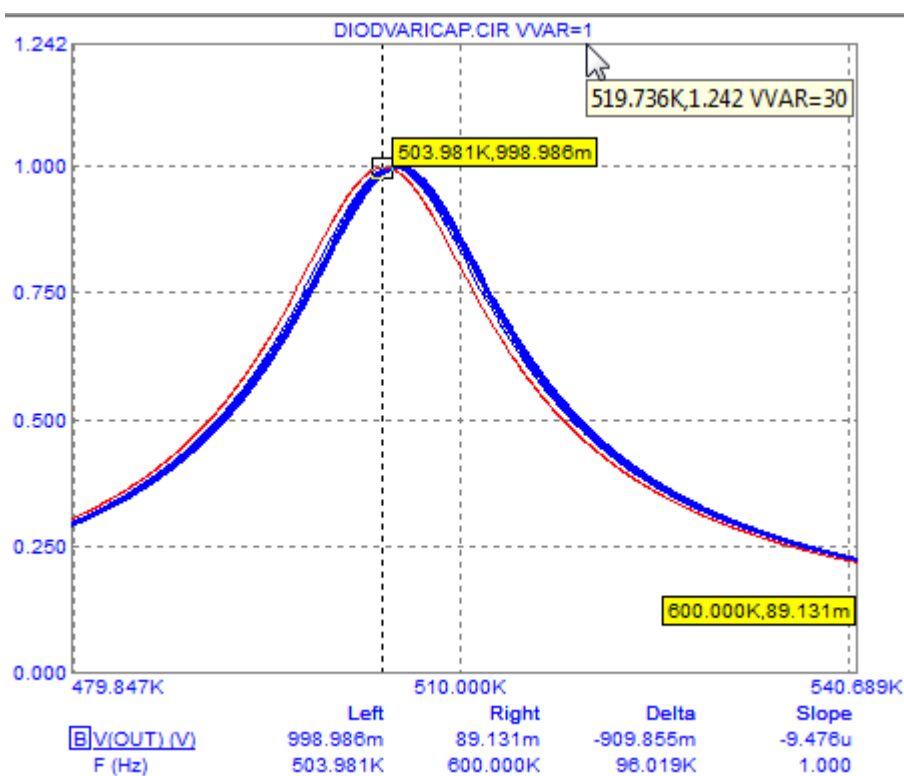


Рисунок 61

В режиме работы с курсорами в заголовке окна результата можно будет увидеть значение напряжения Vvar, 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 емкости диода для напряжения управления и

построить вольтфарадную характеристику. Вид фрагмента программы *MathCAD* показан ниже на рисунке:

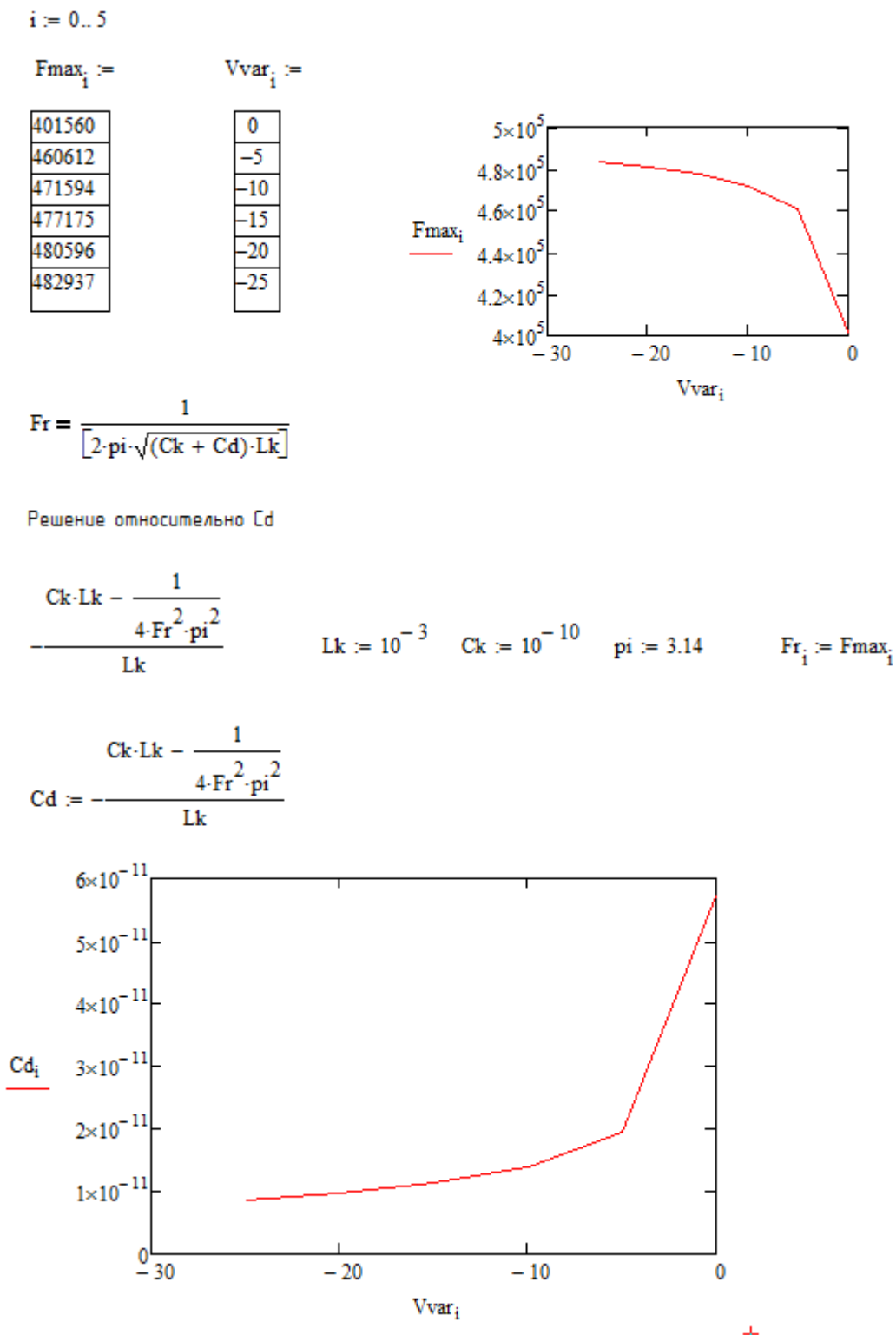


Рисунок 62

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

называется система из вводного слова Given и функции той или иной математической операции, например, Find – решение системы уравнений или Minerr – поиск точки минимальной невязки системы. Для решения системы уравнений с помощью вычислительного блока необходимо выполнить следующую последовательность действий.

- Задать начальные приближения корней уравнения.
- Набрать вводное слово Given
- Строго под вводным словом задать систему уравнений.

В качестве знаков равенства следует использовать логическое равенство (Ctrl+=) – жирный знак =.

- Ввести функцию решения систем уравнений find(x1,x2,...) или Miner(x1,x2,...)). В скобках через запятую задать переменные в том порядке, в котором должны быть расположены в ответе соответствующие им корни.

В качестве примера можно предложить решение системы, для которой предварительно была построена вольтфарадная характеристика по известным заранее параметрам модели. В примере можно сравнить полученные в результате расчёта данные и исходные значения параметров модели.

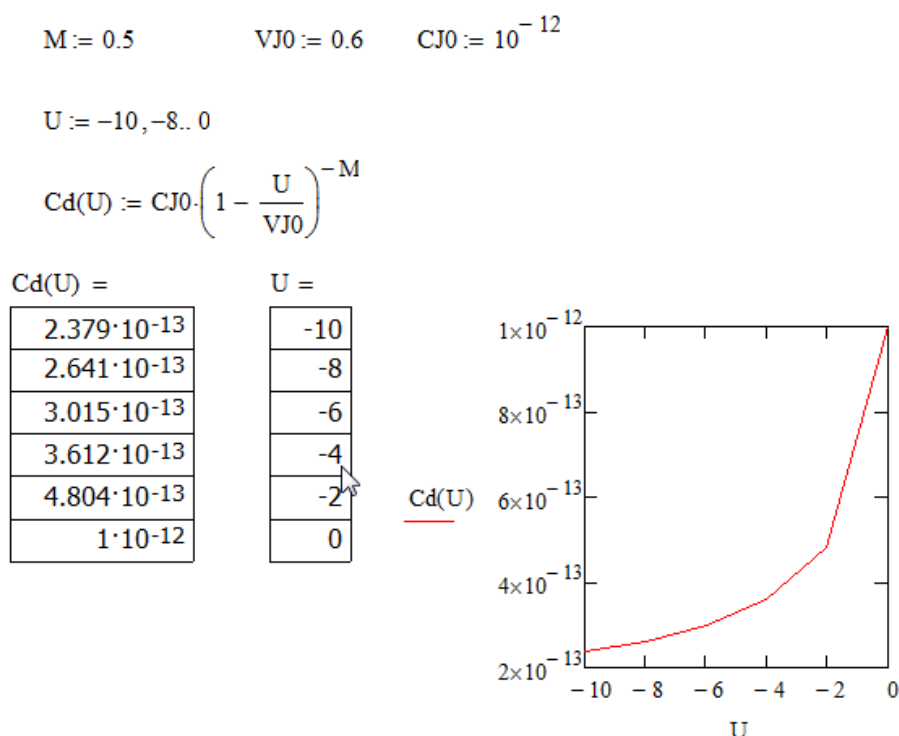


Рисунок 63

Собственно, решение системы будет выглядеть так:

Given	Given
$(2.379 \times 10^{-13}) = CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-10}{VJ0}\right)^{-M}$	$(2.379 \times 10^{-13}) = CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-10}{VJ0}\right)^{-M}$
$(4.804 \times 10^{-13}) = CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-2}{VJ0}\right)^{-M}$	$(4.804 \times 10^{-13}) = CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-2}{VJ0}\right)^{-M}$
$(3.612 \times 10^{-13}) = CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-4}{VJ0}\right)^{-M}$	$(3.612 \times 10^{-13}) = CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-4}{VJ0}\right)^{-M}$
$(3.015 \times 10^{-13}) = CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-6}{VJ0}\right)^{-M}$	$(3.015 \times 10^{-13}) = CJ0 \cdot \left(1 - \frac{-6}{VJ0}\right)^{-M}$
$\text{find}(CJ0, VJ0, M) = \begin{pmatrix} 9.982 \times 10^{-13} \\ 0.604 \\ 0.501 \end{pmatrix}$	$\text{minerr}(CJ0, VJ0, M) = \begin{pmatrix} 9.982 \times 10^{-13} \\ 0.604 \\ 0.501 \end{pmatrix}$

Рисунок 64

Контактная разность потенциалов  $\varphi_{\text{кон}}$  (VJ) (потенциальный барьер) зависит от материала диода. Если материал кремний, то  $VJ = (0.7...0.8) \text{ В}$ , если материал германий, то  $VJ = (0.1...0.5) \text{ В}$ .

Параметр модели EG - ширина запрещённой зоны зависит от материала диода: для кремния  $EG = 1.1 \text{ ЭВ}$ ; для германия  $EG = 0.67 \text{ ЭВ}$ .

Время переноса заряда TT (среднее время жизни носителей) можно определить следующими способами: Для диода, изготовленного по сплавной технологии:

$$TT = 4 \cdot T_{\text{вос}} \cdot \left(1 + \ln \frac{I_{np}}{I_{обр}}\right)$$

Где  $T_{\text{вос}}$  - время восстановления обратного сопротивления,  $I_{обр}$  - обратный, постоянный ток,  $I_{np}$  - значение прямого тока, при котором было измерено время восстановления.

Если диод изготовлен по диффузионной технологии, то  $TT = 1.6 \cdot T_{\text{вос}}$ .



При известной максимальной частоте выпрямления  $f_{\text{макс}}$  время переноса заряда

$$TT = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{макс}}}$$

равно

Если в справочнике приведена величина заряда переключения  $Q_{\text{пк}}$  и значение постоянного тока перед моментом переключения  $I_{\text{пр}}$ , то постоянная времени может быть рассчитана по формуле

$$TT = \frac{Q_{\text{пк}}}{I_{\text{пр}}}$$

## ЛИТЕРАТУРА. ОСНОВНАЯ.

1. Загидуллин Р.Ш. Лабораторный практикум по курсам «Дополнительные главы Информатики», «Основы Электроники». Часть 1. 1 Введение в работу с программой MathCAD. 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 Mathcad 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. MATHCAD 6.0 PLUS Финансовые, инженерные и научные расчеты в среде Windows-95. Перевод с англ. - М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 1996. -712 с.