

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ ДИОДЫ

### ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ

Целью выполнения лабораторной работы является формирование практических навыков моделирования и расчета электрических цепей, содержащих диоды.

Основными задачами выполнения лабораторной работы являются:

1. определение значения тока и напряжение на диоде с помощью моделирования схемы;
2. определение значения тока и напряжение на диоде графическим способом.

Результатами работы являются:

- схема электрической цепи и значения тока и напряжение на диоде, полученные по показаниям приборов;
- уравнение линии нагрузки;
- график вольт – амперной характеристики диода и линии нагрузки;
- подготовленный отчет.

Необходимое оборудование для выполнения лабораторной работы:

- персональный компьютер с программным обеспечением Micro-Cap.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

**Полупроводниковым диодом** называется двухэлектродный прибор, основу которого составляет электронно-дырочный ( $n$ - $p$ ) переход (рис.33).

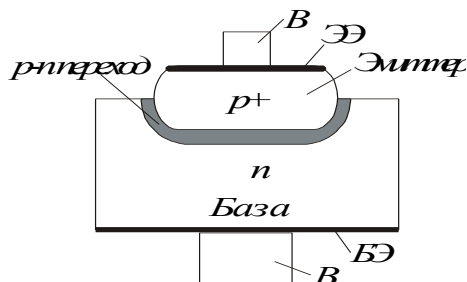


Рис.33. Устройство полупроводникового диода

Изготавливают диоды главным образом из кремния и германия. Одна из областей  $n$ - $p$  – структуры диода – эмиттер, вследствие того что в нее введено больше примеси, имеет большую концентрацию основных носителей, чем другая область, называемая базой. Поэтому при прохождении прямого тока носители инжектируются преимущественно из эмиттера в базу. База и эмиттер с помощью специальных электродов ЭЭ, БЭ, обеспечивающих омический контакт, соединяются с металлическими выводами В, посредством которых диод включается в электрическую цепь.

### Отличия реальной характеристики от теоретической

Свойствами электронно-дырочного перехода определяются все важнейшие характеристики и параметры полупроводникового диода.

**Реальная вольт – амперная характеристика** полупроводникового диода показана на рис. 34, здесь же пунктиром нанесена **теоретическая вольт – амперная характеристика** электронно-дырочного перехода.

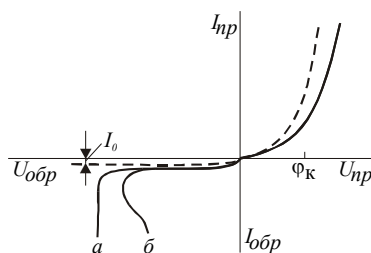


Рис. 34. Теоретическая и реальная вольт – амперная характеристика диода

В области малых токов реальная и теоретическая характеристики совпадают. Но при больших прямых токах, а также при больших обратных напряжениях характеристики расходятся, что является следствием ряда причин, не учтенных при теоретическом анализе процессов в электронно-дырочном переходе.

В области больших прямых токов порядка десятков и более миллиампер становится значительным падение напряжения на омическом распределенном сопротивлении базы диода и сопротивлении электродов. При этом напряжение на электронно-дырочном переходе будет заметно меньше напряжения, приложенного к диоду, в результате реальная характеристика идет ниже теоретической и оказывается почти линейной.

### Рабочий режим

В практических схемах в цепь диода включается какая-либо нагрузка, например, резистор (рис. 35).

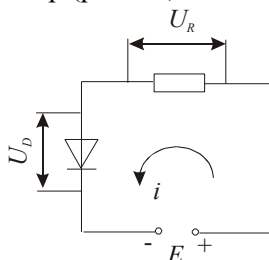


Рис. 35. Схема диода с нагрузкой

Режим диода с нагрузкой называют **рабочим режимом**. Если бы диод обладал линейным сопротивлением, то общее сопротивление

цепи было бы равно сумме сопротивления диода постоянному току  $R_0$  и сопротивления нагрузочного резистора  $R_n$ . Но диод обладает нелинейным сопротивлением, и значение  $R_0$  у него изменяется при изменении тока. Поэтому расчет тока делают графически. Задача состоит в следующем: известны значения  $E$ ,  $R_n$  и характеристика диода. Требуется определить ток в цепи и напряжение на диоде.

Характеристику диода следует рассматривать как график некоторого уравнения, связывающего величины  $i$  и  $U$ . Для сопротивления  $R_n$  подобным уравнением является закон Ома:

$$i = U_R / R_n = (E - U) / R_n \quad (1)$$

Имеется два уравнения с двумя неизвестными  $i$  и  $U$ , причем одно из уравнений дано графически. Для решения такой системы уравнений надо построить график второго уравнения и найти координаты точки пересечения двух графиков.

Уравнение для сопротивления  $R_n$  – это прямая линия, называемая *линией нагрузки*. Ее можно построить по двум точкам на осях координат. При  $i = 0$  из уравнения (1) получим:  $E - U_D = 0$  или  $U_D = E$ , что соответствует точке  $A$  на рис. 36. Если  $U = 0$ , то  $i = E / R_n$  (точка  $B$  на рис. 36). Через точки  $A$  и  $B$  проводим прямую, которая является линией нагрузки. Координаты точки  $T$  дают решение поставленной задачи. Следует отметить, что все остальные точки прямой  $AB$  не соответствуют каким-либо рабочим режимам диода.

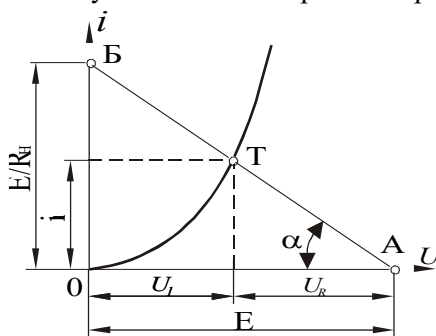


Рис. 36. Построение линии нагрузки

Цепь, изображенная на рис. 35 является нелинейной. Характеристику такой цепи, называемую *рабочей характеристикой диода*, т.е. график зависимости  $i = f(U)$ , можно получить суммированием напряжений для характеристик диода и нагрузочного резистора  $R_n$  (рис. 37). Характеристика резистора  $R_n$  выражает закон Ома  $i = U_R / R_n$  и является прямой линией, проходящей через начало координат.

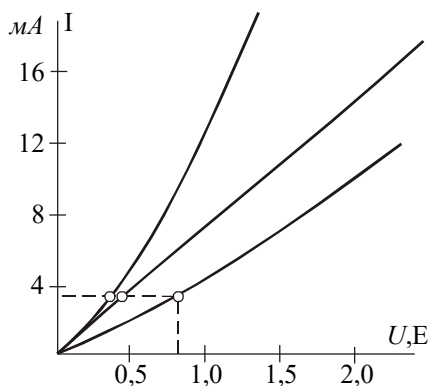


Рис. 37. Построение рабочей характеристики для цепи, изображенной на рис. 35

Для построения этой прямой на график наносится точка, соответствующая произвольному напряжению  $U_R$  и току  $U_R / R_n$ . Через эту точку и начало координат проводится прямая.

Рабочую характеристику цепи  $i = f(U)$  строим, складывая для нескольких значений тока  $i$  напряжения  $U$  и  $U_R$ , т.к.  $E = U + U_R$ . Например, при токе  $3 \text{ mA}$  имеем:  $U = 0,4 \text{ V}$  и  $U_R = 0,5 \text{ V}$ . Суммируя эти напряжения, получаем  $E = 0,9 \text{ V}$  и соответствующую точку результирующей характеристики. Аналогично находим другие точки, и через них проводим кривую.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

На выполнение лабораторной работы отводится 2 академических часа.

Порядок выполнения:

1. Изучить краткий теоретический материал.
2. Собрать схему электрической цепи и определить значения тока и напряжение на диоде.
3. Определить значения тока и напряжение на диоде графическим способом.
4. Оформить отчет.
5. Защитить выполненную работу у преподавателя.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Рассмотрим электрическую цепь (рис. 38).

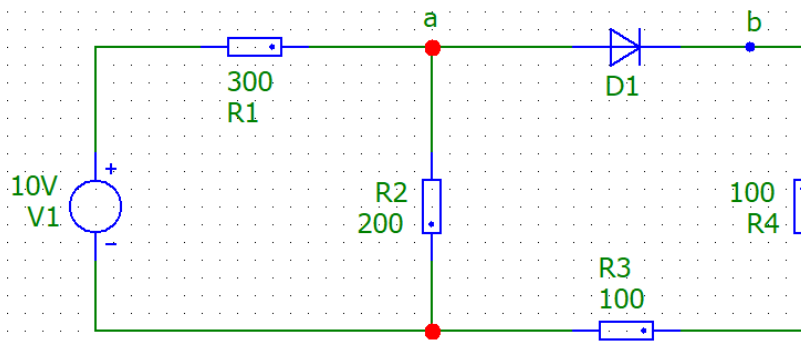


Рис. 38. Исследуемая электрическая цепь

Анализ схемы проведем по теореме об эквивалентном источнике напряжения. Для этого преобразуем исходную схему (рис. 39) и найдем  $U_{abxx}$  и  $R_{ab}$ .

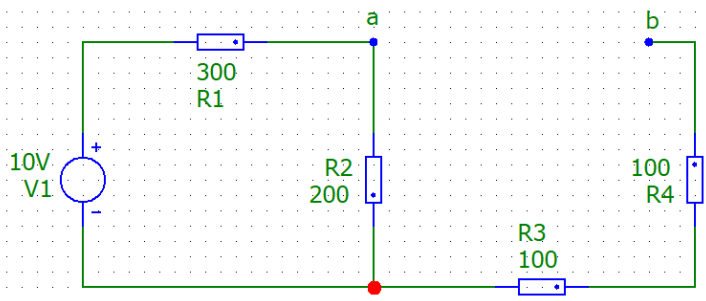


Рис. 39. Преобразованная электрическая схема

Для определения  $U_{abxx}$  можно, например, воспользоваться вольтметром (рис. 40) или мультиметром. Для определения  $R_{ab}$  воспользуемся мультиметром, но при этом необходимо отключить источник напряжения  $E_I$ .

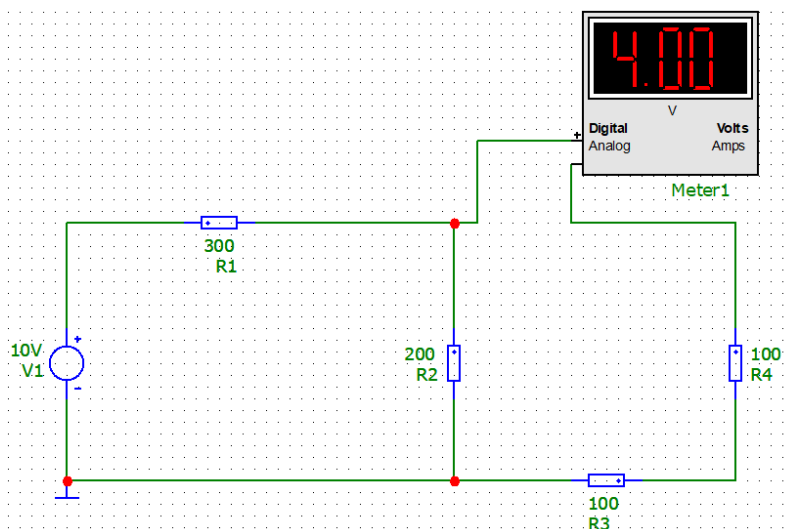


Рис. 40. Схема для определения  $U_{abxx}$

В результате измерений получим следующие значения:  
 $U_{abxx} = 4 \text{ В}$ ;  $R_{ab} = 320 \text{ Ом}$ .

Значения  $U_{abxx}$  и  $R_{ab}$  определим по расчетным формулам:

$$R_{ab} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 + R_4 = \frac{200 \cdot 300}{200 + 300} + 200 = 120 + 200 = 320 \text{ Ом};$$

$$U_{abxx} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E_1 = \frac{200}{200 + 300} \cdot 10 = 4 \text{ В}.$$

Согласно [теореме](#) об эквивалентном источнике напряжения исходную схему (рис. 38) преобразуем в схему, показанную на рис. 41.

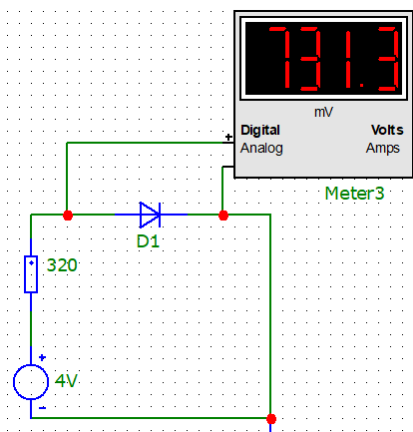


Рис. 41. Преобразованная, согласно теореме электрическая схема

Из преобразованной схемы (рис. 41), с помощью вольтметра и амперметра найдем ток и напряжение на диоде:  $U_D = 0,7 \text{ В}$  ,  $I_D = 10,27 \text{ мА}$  .

Определим значения тока в цепи и напряжение на диоде [графическим способом](#). Для этого в одной системе координат можно построить [вольт – амперную характеристику](#) (ВАХ) диода и линию нагрузки. Уравнение [линии нагрузки](#) имеет вид:

$$I_D = f(U_D) = \frac{U_{abxx} - U_D}{R_{ab}}.$$

Эта линия строится по токам пересечения с осями координат:

$$I_D = 0 ; U_D = U_{abxx} = 4 \text{ В} ;$$

$$U_D = 0 ; I_D = \frac{U_{abxx}}{R_{ab}} = 12,5 \text{ мА} .$$

Точка пересечения ВАХ и линии нагрузки будет соответствовать искомым значениям тока и напряжения.



С помощью схемы, изображенной на рис. 42 построим прямую ветвь ВАХ диода.

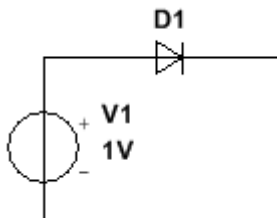


Рис. 42. Схема для исследования прямой ветви ВАХ диода

Схема (рис. 42) содержит источник напряжения ( $V1$ ) и диод ( $D1$ ). Проведем исследование схемы с помощью меню *Analysis* пункт *DC...*

В диалоговом окне *DC Analysis Limits* пункта *DC...* на вкладке задаются параметры источников при исследовании схемы по постоянному току. В схеме на рис. 42 имеется один источник напряжения  $V1$ . Для источника  $V1$  задаются начальное значение, шаг изменения величины и конечное значение изменяемой величины. Для схемы на рис. 42 можно задать следующие значения:  $0\text{ V}$ ;  $1\text{ V}$  и  $0,001\text{ V}$  (рис. 43).

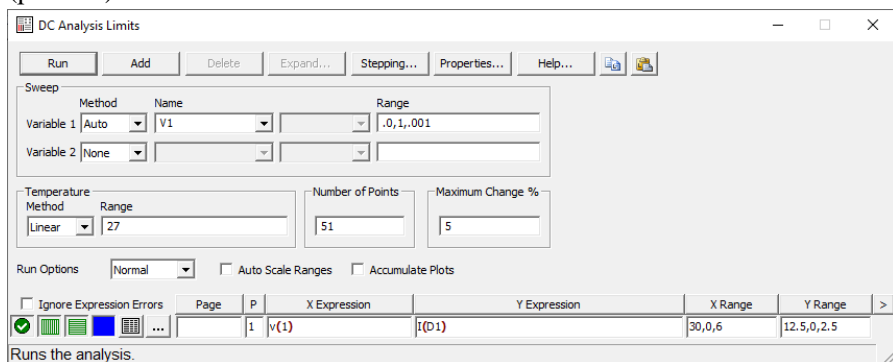


Рис. 43. Настройки вкладки *Analysis parameters* диалогового окна *DC Sweep*

Также необходимо выбрать изменяемую величину. Для получения ВАХ диода это изменение тока на диоде  $I(D1)$ .

Результаты моделирования показаны на рис. 44. Для полученного графика можно задать параметры изображения. К параметрам

относятся: атрибуты заголовка изображения, атрибуты координатных осей и выводимой линии.

Кнопка *Cursor Mode* позволяет вывести числовые значения для двух визирных линий. В частности на рис. 44 показана визирная линия в точке пересечения ВАХ с линией нагрузки. Числовые значения этой точки:  $I = 10,27 \text{ мА}$  ;  $U = 715,29 \text{ мВ}$  соответствуют ранее полученным измеренным значениям.

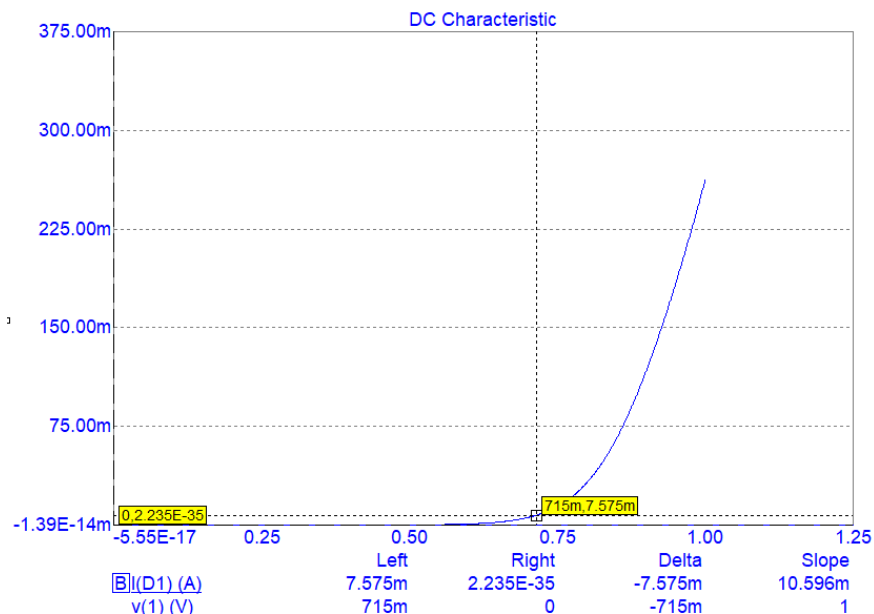


Рис. 44. Прямая ветвь ВАХ диода

Выводы, которые можно сделать из приведенных расчетов: ток в цепи и напряжение на диоде соответствуют значениям  $U_D = 0,7 \text{ В}$  ,  $I_D = 10,27 \text{ мА}$ .

В преобразованной схеме (рис. 42) источник напряжения соответствует  $E = 4 \text{ В}$  . Часть этого напряжения падает на диоде  $U_D = 0,7153 \text{ В}$  , а часть на сопротивлении  $R_{ab}$  :

$$U_R = I_D R_{ab} = 0,01027 \cdot 320 = 3,2864 \text{ В} .$$

$$\text{Таким образом } E = U_R + U_D = 3,2864 + 0,7153 = 4,0017 \text{ В} .$$

## ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

№	Исследуемая электрическая схема
1	
2	
3	
4	

5	
6	
7	
8	

9	
10	
11	
12	

13	
14	
15	

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. В чем отличие реальной [вольт – амперной характеристики](#) диода от теоретической?
2. Что понимается под пробоем диода?
3. Какие основные виды пробоев электронно – дырочного перехода существуют?
4. Назовите виды электрических пробоев электронно – дырочного перехода?
5. Какой вид пробоя электронно – дырочного перехода является обратимым?

6. Для каких типов электронно – дырочных переходов характерны лавинный и туннельный пробой?
7. Чем объясняется тепловой пробой диода?
8. Что характеризуют барьерная и диффузионная емкости электронно – дырочного перехода?
9. Каково влияние температуры на электронно – дырочного переход?
10. Что понимается под рабочим режимом диода?

### **ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Номер варианта студенту выдается преподавателем. Отчет на защиту предоставляется в печатном виде.

Структура отчета (на отдельном листе(-ах)):

- титульный лист;
- цели и задачи работы;
- формулировка задания (вариант);
- схемы электрических цепей и значения тока и напряжение на диоде, полученные по показаниям приборов;
- вольт – амперная характеристика диода и построенная по точкам линия нагрузки;
- выводы.