

**Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Уфимский государственный авиационный технический университет**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

**Практикум по дисциплине «Твердотельная электроника»**

**Часть I**

**Уфа 2008**

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Уфимский государственный авиационный технический университет  
Кафедра промышленной электроники

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Практикум по дисциплине «Твердотельная электроника»

Часть I

Уфа 2008

Составитель Р.А.Кудаяров  
УДК 621.382.2 (07)  
ББК 32.852.2 (Я7)

Исследование характеристик полупроводниковых приборов:  
Практикум по дисциплине «Твердотельная электроника». Часть I /  
Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т: Сост. Р.А. Кудаяров. – Уфа, 2008. –  
48 с.

Первая часть практикума разработана применительно к разделу «Полупроводниковые диоды» учебной программы дисциплины «Твердотельная электроника» и является руководством к аудиторным практическим занятиям по теме «Полупроводниковые диоды». Излагаются теоретические сведения, необходимые для анализа характеристик, расчета параметров и построения эквивалентных схем полупроводниковых диодов, а также расчета простейших схем на их основе. Приводятся примеры решения задач, контрольные вопросы для подготовки и задания для самостоятельной работы.

Практикум предназначен для студентов, обучающихся по программам подготовки бакалавров по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника» и дипломированных специалистов по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника», специальность 210106 «Промышленная электроника».

Табл. 7. Ил. 29. Библиогр.: 12 назв.

Рецензенты:

докт. техн. наук, проф. Крымский В.Г.  
канд. техн. наук, доц. Юсупов Р.Р.

## Содержание

Введение.....	5
Практическое занятие №1	
Вольт-амперные характеристики и параметры полупроводниковых диодов.....	6
1. Цель занятия.....	6
2. Краткие теоретические сведения.....	6
2.1. Вольт–амперная характеристика $p$ - $n$ -перехода .....	6
2.1.1. Электронно-дырочный переход.....	6
2.1.2. Вольт–амперная характеристика идеального $p$ - $n$ -перехода.....	7
2.1.3. Вольт–амперная характеристика реального $p$ - $n$ -перехода.....	8
2.2. Полупроводниковые диоды .....	10
2.2.1. Основные виды полупроводниковых диодов .....	10
2.2.2. Вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов .....	12
2.2.3. Основные параметры полупроводниковых диодов.....	14
3. Вопросы для подготовки.....	17
4. Практическая часть.....	19
4.1. Расчет и построение вольт–амперной характеристики идеального $p$ - $n$ -перехода .....	19
4.2. Расчет и построение ВАХ идеального $p$ - $n$ -перехода с учетом сопротивления базовой области .....	21
4.3. Расчет дифференциального сопротивления полупроводникового диода.....	23
4.4. Расчет температурного коэффициента напряжения полупроводникового диода.....	24
4.5. Расчет температурного коэффициента напряжения стабилизации стабилитрона .....	26

## Практическое занятие №2

### Расчет электрических цепей, содержащих полупроводниковые

диоды .....	27
1. Цель занятия.....	27
2. Краткие теоретические сведения.....	27
2.1. Расчет нелинейных электрических цепей. Основные понятия и определения .....	27
2.2. Расчет цепей постоянного тока, содержащих полупроводниковые диоды.....	28
2.2.1. Графоаналитические методы расчета.....	28
Метод эквивалентных преобразований.....	28
Метод пересечения характеристик .....	30
2.2.2. Метод линеаризации.....	32
3. Вопросы для подготовки.....	36
4. Практическая часть.....	37
4.1. Расчет графическим методом цепи, содержащей полупроводниковый диод .....	37
4.2. Расчет аналитическим методом цепи, содержащей полупроводниковый диод .....	39
4.3. Расчет графическим методом рабочего режима схемы, содержащей стабилитрон .....	40
4.4. Расчет аналитическим методом рабочего режима схемы, содержащей стабилитрон .....	41
Задания для самостоятельной работы .....	43
Список литературы.....	45
Приложения .....	46
Варианты исходных данных для самостоятельной работы.....	46
Основные электрофизические параметры германия, кремния и арсенида галлия (при температуре 300°K).....	47
Физические постоянные.....	48

## Введение

Качество подготовки будущих специалистов в области проектирования, производства и эксплуатации современных электронных устройств и систем определяется уровнем знания и понимания используемой элементной базы. Основными компонентами современной электронной техники являются твердотельные электронные приборы. Это определяет необходимость изучения студентами принципов действия, формирования у них навыков анализа, оценивания и расчета параметров, характеристик и эквивалентных схем полупроводниковых приборов.

В данном практикуме рассмотрены вопросы анализа характеристик полупроводниковых диодов, определения их параметров и параметров соответствующих эквивалентных схем, а также расчетов простейших схем на их основе. Решение задач практикума предполагает знание основ физических процессов, протекающих в полупроводниковых материалах, и способов их описания, а также знакомство с методами расчета цепей постоянного тока, рассматриваемыми в курсе теоретических основ электротехники. Выполнение заданий направлено на укрепление понимания студентами принципов действия базовых полупроводниковых приборов, что является необходимым условием для успешного усвоения последующего учебного материала, посвященного типовым электронным блокам и устройствам. В ходе выполнения практикума предполагается повторение кратких теоретических сведений, рассмотрение примеров решения задач и самостоятельное выполнение заданий по приведенным исходным данным, согласно предложенным вариантам. Современные полупроводниковые приборы представляют собой комбинации различных электрических переходов, основным из которых является электронно-дырочный переход, или *p-n*-переход. В первой части практикума рассмотрены вопросы, связанные с изучением структуры простейшего полупроводникового прибора – диода, содержащего указанный переход. По отмеченной выше причине знание свойств и характеристик полупроводниковых диодов приобретает особое значение.

# Практическое занятие №1

## Вольт-амперные характеристики и параметры полупроводниковых диодов

### 1. Цель занятия

Исследование вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов и приобретение навыков расчета их основных параметров.

### 2. Краткие теоретические сведения

#### 2.1. Вольт-амперная характеристика $p$ - $n$ -перехода

##### 2.1.1. Электронно-дырочный переход

Основным элементом структур большинства полупроводниковых приборов является *электронно-дырочный переход* или  $p$ - $n$ -переход. Так называется переходная область вблизи плоскости контакта полупроводников  $n$ - и  $p$ -типа, в которой нескомпенсированные заряды ионов примеси создают электрическое поле с напряженностью  $E_K$ , и которая из-за ухода и рекомбинации носителей бедна свободными, подвижными носителями заряда. Схематически  $p$ - $n$ -переход представлен на рис. 1.1.

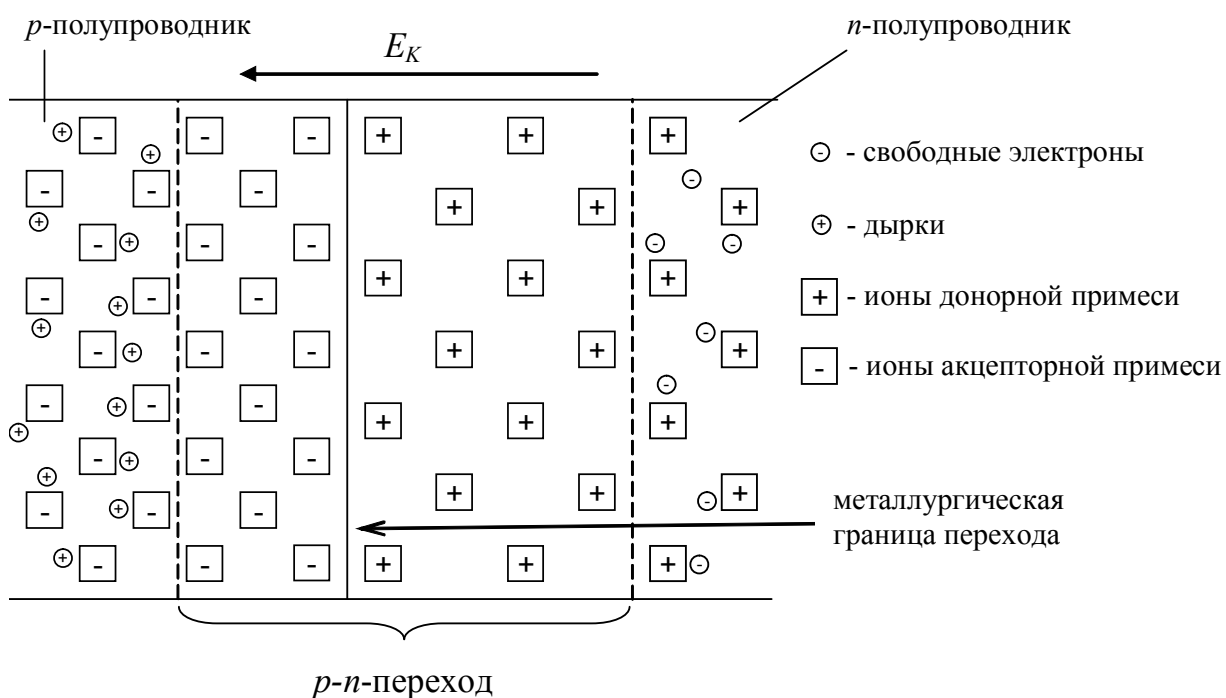


Рис. 1.1

При отсутствии внешнего напряжения на  $p$ - $n$ -переходе ток через него будет отсутствовать. Это происходит в результате равновесия диффузионных и дрейфовых потоков носителей заряда через переход. Такому состоянию равновесия соответствуют определенное значение напряженности электрического поля  $E_k$  и разность потенциалов, которую называют *контактной разностью потенциалов*, что в совокупности характеризует потенциальный барьер обедненного слоя. При подаче прямого напряжения из-за снижения потенциального барьера через переход будет протекать прямой ток, возникающий за счет возрастания диффузионного потока основных носителей. В результате такого движения будет увеличиваться концентрация неосновных носителей в соседних с переходом областях (*инжекция неосновных носителей*).

При обратном напряжении диффузионный поток носителей будет уменьшаться из-за увеличения потенциального барьера в переходе. Через него будет протекать обратный ток образованный дрейфовым потоком неосновных носителей. В результате дрейфа неосновных носителей будет происходить уменьшение концентрации неосновных носителей у границ перехода (*экстракция, выведение неосновных носителей*).

### 2.1.2. Вольт–амперная характеристика идеального $p$ - $n$ -перехода

*Идеализированным* считается  $p$ - $n$ -переход, для которого приняты следующие допущения.

1. В обедненном слое отсутствуют генерация, рекомбинация и рассеяние носителей зарядов.
2. Электрическое поле вне обедненного слоя отсутствует.
3. Пренебрегают электрическим сопротивлением нейтральных  $p$ - и  $n$ -областей по сравнению с сопротивлением обедненного слоя.
4. Границы обедненного слоя считаются плоскопараллельными, а носители заряда перемещаются по направлению, перпендикулярному к этим плоскостям.

Указанные предположения используются для аналитического определения зависимости тока через переход от приложенного напряжения, называемой *вольт-амперной характеристикой* (ВАХ). ВАХ идеализированного  $p$ - $n$ -перехода имеет вид

$$I = I_0 [\exp(U/\phi_T) - 1], \quad (1.1)$$



где  $\Phi_T$  - температурный или тепловой потенциал,

$I_0$  - параметр называемый *тепловым током*.

Температурный потенциал рассчитывается согласно выражению

$$\Phi_T = \frac{kT}{q}, \quad (1.2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,

$T$  - абсолютная температура,

$q$  - заряд электрона.

Зависимость (1.1) также называется формулой Шокли. Параметр  $I_0$  называется *тепловым током*, так как его значение сильно зависит от температуры. Величина теплового тока  $I_0$  линейно зависит от равновесных значений концентрации неосновных носителей заряда  $n_{p0}$  и  $p_{n0}$  в прилегающих к переходу областях, а их значения пропорциональны квадрату концентрации собственных носителей заряда в полупроводнике  $n_i^2$ . Между тем,  $n_i^2$  зависит от абсолютной температуры  $T$  по экспоненциальному закону, поэтому для теплового тока  $I_0$  справедлива следующая пропорциональная зависимость

$$I_0 \sim n_i^2 \sim \exp\left(-\frac{\Delta\epsilon_0}{kT}\right), \quad (1.3)$$

где  $\Delta\epsilon_0$  - ширина запрещенной зоны полупроводника.

### 2.1.3. Вольт–амперная характеристика реального $p$ - $n$ -перехода

В реальном  $p$ - $n$ -переходе необходимо учитывать факторы, связанные с невыполнением некоторых допущений, которые были приняты для идеализированного перехода. Эти факторы следующие.

1. В реальных условиях в обедненном слое имеются генерация и рекомбинация носителей заряда, т.е. изменение плотности тока.

Процесс генерации носителей в переходе проявляется при обратном напряжении. Ток генерации  $I_{\text{ген}}$  возрастает с увеличением значения обратного напряжения, так как расширяется обедненный слой.

При прямых напряжениях будет замечен рекомбинационный ток  $I_{\text{рек}}$  из-за увеличения потока основных носителей.

2. В реальных  $p$ - $n$ -переходах необходимо учитывать сопротивления  $p$ - и  $n$ -областей, значения которых составляют десятки и сотни Ом. Обычно  $p$ - $n$ -переходы несимметричны, так что сопротивление области с наименьшей концентрацией примеси будет наибольшим. Эту область принято называть *базовой*, а ее сопротивление – *базовым* ( $R_B$ ). Таким образом, суммарное сопротивление обеих областей можно считать равным  $R_B$ . Приложенное внешнее напряжение  $U$  распределяется между обедненным слоем, напряжение на котором равно  $U_{p-n}$ , и базовой областью. Согласно выражению:

$$U = U_{p-n} + U_B \quad (1.4)$$

Величина  $R_B$  зависит от концентрации основных носителей заряда (концентрации примеси), а также от концентрации инжектированных в базу неосновных носителей, которая будет заметна при больших значениях прямого тока, что приведет к снижению значения  $R_B$  (*эффект модуляции сопротивления базы*).

3. В реальных  $p$ - $n$ -переходах возможно возникновение пробоя. *Пробоем* является резкое увеличение обратного тока перехода при некотором обратном напряжении  $U_{\text{проб}}$ , называемом напряжением пробоя. Различают электрические пробой, обусловленные действием электрического поля в обедненном слое, и тепловой пробой, вызванный перегревом перехода. Существуют три основных вида электрического пробоя: лавинный, туннельный и поверхностный.

*Лавинный пробой* вызывается ударной ионизацией атомов кристаллической решетки полупроводника в обедненном слое. Такой пробой возникает при значениях обратного напряжения достаточного для ускорения неосновных носителей в  $p$ - $n$ -переходе до таких скоростей, при которых кинетическая энергия частиц достаточна для ионизации нейтральных атомов полупроводника, т.е. образования пар электрон-дырка. Величину напряжения, при котором возникает пробой  $U_{\text{проб}}$ , называют *напряжением лавинного пробоя*.

*Туннельный пробой* возникает, когда напряженность электрического поля в обедненном слое возрастает настолько, что проявляется *туннельный эффект* – переход электронов сквозь потенциальный барьер без изменения энергии. Туннельный эффект наблюдается в узких переходах, т.е. в переходах с очень высокой концентрацией примеси.

*Поверхностный пробой (ток утечки)* происходит из-за того, что реальные *p-n*-переходы имеют участки, выходящие на поверхность полупроводника. Вследствие возможного загрязнения и наличия поверхностных зарядов между *p*- и *n*-областями могут образовываться проводящие пленки и проводящие каналы, по которым идет ток утечки  $I_{\text{ут}}$ . Ток утечки увеличивается с увеличением приложенного напряжения.

С учетом отмеченного обратный ток реального диода будет определяться выражением

$$I_{\text{обр}} = I_0 + I_{\text{ген}} + I_{\text{ут}}. \quad (1.5)$$

Относительная доля  $I_{\text{ген}}$  и  $I_0$  в обратном токе диода зависит от типа исходного полупроводникового материала. Так, для германия  $I_{\text{ген}}/I_0 \ll 1$ , для кремния  $I_{\text{ген}}/I_0 \approx 1000$ .

Ток  $I_{\text{ут}}$  также зависит от типа применяемого полупроводникового материала. Для германиевых диодов всегда  $I_{\text{ут}} < I_0 + I_{\text{ген}}$ . Для некоторых типов кремниевых диодов наоборот  $I_{\text{ут}} > I_0 + I_{\text{ген}}$ .

*Тепловой пробой* связан с температурной зависимостью мощности, рассеиваемой в *p-n*-переходе. Он обусловлен существенным увеличением температуры структуры перехода, приводящим к увеличению концентрации носителей заряда и росту плотности тока, росту выделяемой мощности и дальнейшему росту температуры и т.д. Тепловой пробой, как правило, приводит к разрушению перехода (прибора) и является одним из основных факторов, ограничивающих допустимые режимы их эксплуатации, в частности, допустимые значения температуры окружающей среды.

## 2.2. Полупроводниковые диоды

### 2.2.1. Основные виды полупроводниковых диодов

*Полупроводниковым диодом* называют прибор с одним или несколькими электрическими переходами и двумя внешними выводами. Диоды классифицируются по назначению, физическим свойствам, основным электрическим параметрам, конструктивно-технологическим особенностям, виду исходного полупроводника.

Наиболее распространенной основой полупроводникового диода является несимметричный *p-n*-переход. Низкоомную область диодов называют *эмиттером*, а высокоомную – *базой*. Электрод, обеспечивающий электрическую связь с *n*-областью диода,

называется *катодом* (К), а *p*-областью – *анодом* (А). Условное обозначение диода изображено на рис. 1.2.

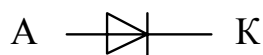


Рис. 1.2

Для изготовления диодов используют германий, кремний, арсенид галлия, фосфид индия, селен и другие полупроводниковые материалы.

К числу основных видов диодов в зависимости от назначения относятся выпрямительные, универсальные и импульсные диоды и стабилитроны.

*Выпрямительные диоды* служат для преобразования переменного тока в пульсирующий ток одного направления и используются в источниках питания радиоэлектронной аппаратуры.

Германиевые выпрямительные диоды изготавливаются методом сплавления. Наиболее распространенным примером может служить случай сплавления индия в исходную пластину германия *n*-типа. Для получения *p-n*-переходов кремниевых выпрямительных диодов осуществляется сплавление алюминия в кристалл *n*-типа или сплава золота с сурьмой в кремний *p*-типа. Для получения переходов используются также диффузионные методы.

*Универсальные и импульсные диоды* применяются для преобразования высокочастотных и импульсных сигналов. В данных диодах необходимо обеспечить минимальные значения реактивных параметров, что достигается благодаря специальным конструктивно-технологическим мерам. Основной причиной инерционности таких диодов является наличие электрических емкостей *p-n*-перехода.

*Стабилитрон* – это прибор, предназначенный для стабилизации напряжения на присоединенной параллельно ему нагрузке в случае изменения ее сопротивления или величины напряжения питания. В работе стабилитрона используется участок пробоя, где значительному изменению тока соответствует очень малое изменение напряжения. Для стабилизации небольших напряжений ( $< 1$  В) используют прямую ветвь ВАХ. Предназначенные для этого полупроводниковые диоды называются *стабисторами*.

Условное обозначение стабилитрона представлено на рис. 1.3.



Рис. 1.3

### 2.2.2. Вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов

Отметим, что на вид ВАХ диода влияют процессы, обусловленные особенностями реального  $p-n$ -перехода. Кроме этого необходимо учитывать влияние температуры  $T$  окружающей среды на значения теплового тока  $I_0$  и температурного потенциала  $\phi_T$ , что приводит к смещению прямой и обратной ветви ВАХ полупроводникового диода при изменении температуры  $T$ .

Вольт-амперная характеристика германиевого диода при различных температурах окружающей среды изображена на рис. 1.4. С ростом температуры в значительной степени увеличивается обратный ток диода, что обусловлено ростом концентрации неосновных носителей, а величина пробивного напряжения уменьшается. Основным видом пробоя является тепловой пробой. С ростом температуры прямая ветвь становится более крутой, а падение напряжения уменьшается. Значение последней величины не превышает 0,5 В.

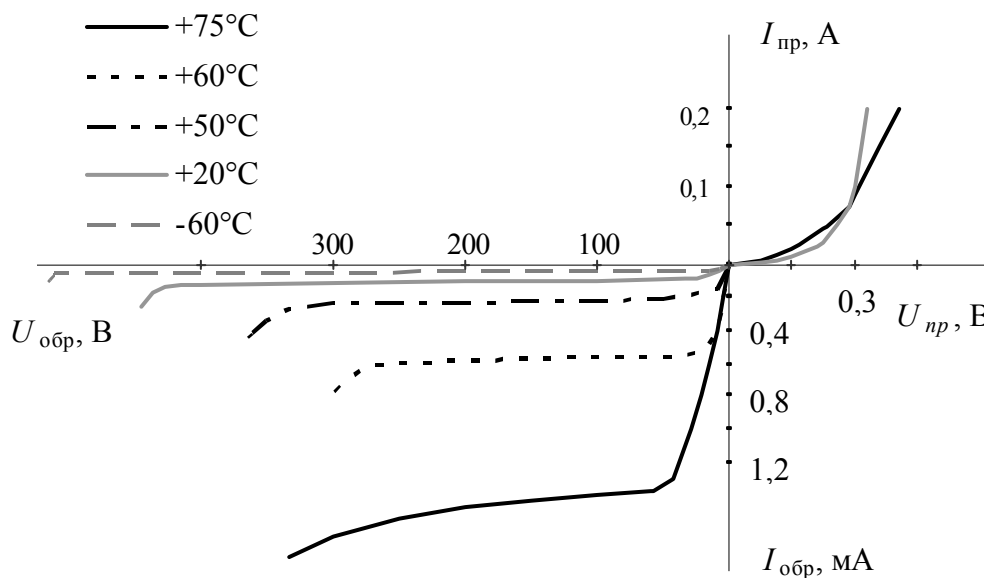


Рис. 1.4

ВАХ выпрямительного кремниевого диода приведена на рис. 1.5. Прямая ветвь слабо изменяется в довольно большом диапазоне температур. Значение прямого напряжения у кремниевых диодов выше в 1,5-2 раза по сравнению с германиевыми, что является их недостатком. По сравнению с германиевыми диодами кремниевые диоды позволяют получать большие значения выпрямленных токов, выдерживать большие обратные напряжения при меньших значениях

обратного тока. Они работают при больших значениях температур (до  $+125^{\circ}\text{C}$ ).

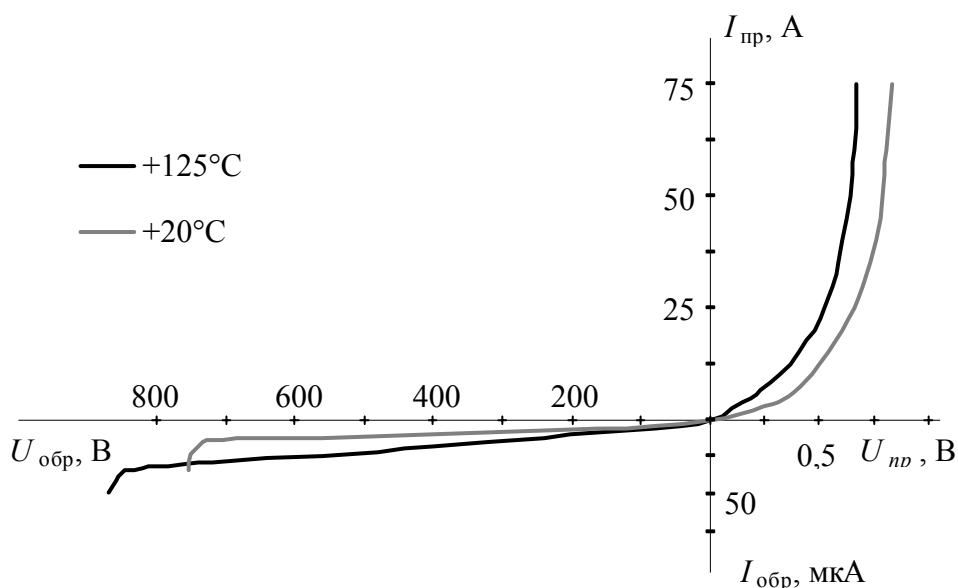


Рис. 1.5

ВАХ стабилитрона приведена на рис. 1.6. Из характеристики видно, что напряжение стабилизации  $U_{СТ}$  несколько отличается от напряжения электрического пробоя  $U_{проб}$ , поскольку в реальном диоде переход от области пробоя к рабочей точке не происходит резко, а с некоторым наклоном. В связи с этим для конкретного определения напряжения стабилизации следует задаться необходимой величиной рабочего тока.

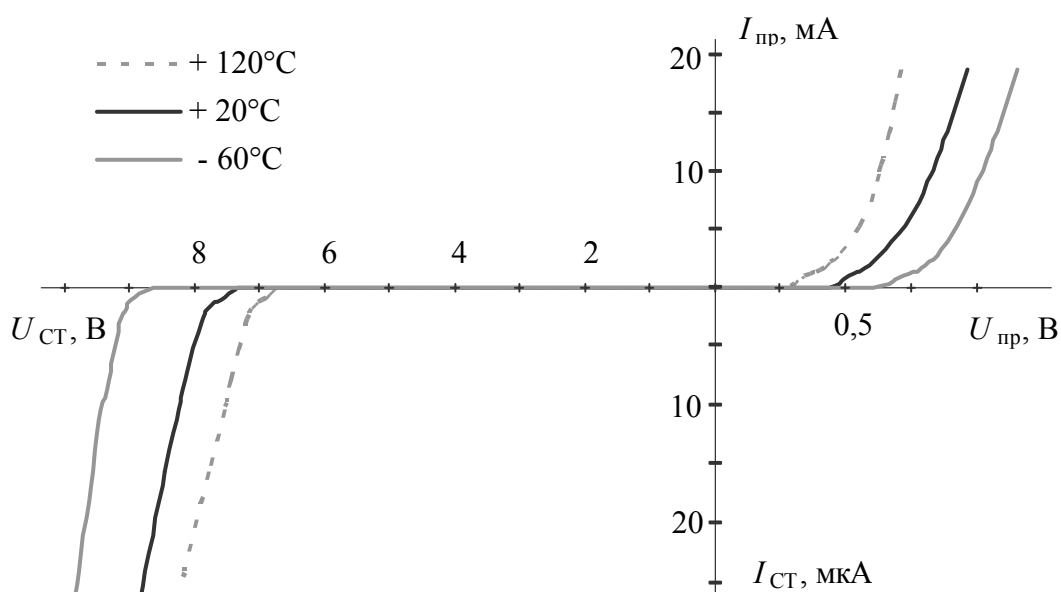


Рис. 1.6

Промышленностью выпускаются стабилитроны с параметрами  $U_{\text{СТ}}$  от 1,5 В до 180 В, токами стабилизации  $I_{\text{СТ}}$  от 0,5 мА до 1,4 А. Напряжение стабилизации  $U_{\text{СТ}}$  зависит от толщины  $p$ - $n$ -перехода, а толщина – от удельного сопротивления материалов, концентрации примеси. При использовании низкоомных материалов получают стабилитроны для стабилизации малых напряжений  $U_{\text{СТ}}$ . При напряжениях  $U_{\text{СТ}}$  ниже 6 В в  $p$ - $n$ -переходах наблюдается практически только туннельный вид пробоя. В диапазоне  $U_{\text{СТ}}$  от 6 до 8 В имеют место процессы как туннельного, так и лавинного механизмов пробоя, а в пределах от 8 до 200 В – только лавинного.

### 2.2.3. Основные параметры полупроводниковых диодов

К основным параметрам диодов относятся предельно допустимые значения токов и напряжений, ограничивающих допустимые режимы работы, которые предусматривают обеспечение условий нормального функционирования, недопущение перегрева и пробоя

приблизжающим основным параметром диодов является сопротивление постоянному току

$$R_0 = U/I. \quad (1.6)$$

Учитывая, что главная функция электронных приборов заключается в преобразовании сигнала или энергии, приходим к выводу, что основным режимом работы приборов является динамический режим. Одним из важнейших динамических параметров диодов являются дифференциальное сопротивление. Дифференциальное сопротивление  $R_{\text{диф}}$  диода – это величина, равная отношению малого приращения напряжения на диоде (дифференциала напряжения)  $dU$  к малому приращению силы тока через диод (дифференциалу силы тока)  $dI$ , вызванному или обусловленному этим приращением напряжения. Оно характеризует крутизну ВАХ в рассматриваемой точке, и определяется по следующему выражению

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI}, \quad (1.7)$$

Дифференциальное сопротивление обратно пропорционально производной  $dI/dU$  (дифференциальной проводимости). Применительно к идеализированному переходу согласно формуле (1.1) можно получить аналитическое выражение для дифференциального сопротивления

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Phi_T}{I + I_0}, \quad (1.8)$$

Для прямой ветви ВАХ, где  $I \gg I_0$ , выражение (1.10) примет вид

$$R_{\text{диф}} \approx \frac{\Phi_T}{I}. \quad (1.9)$$

При прямом напряжении  $R_{\text{диф}}$  мало и убывает с ростом напряжения, а при обратном очень велико.

Для стабилитрона качество стабилизации напряжения  $U_{\text{СТ}}$  определяется величиной дифференциального сопротивления  $R_{\text{диф}}$  (на участке пробоя): чем оно меньше, тем меньше величина изменения напряжения стабилизации  $U_{\text{СТ}}$ . Значения дифференциального сопротивления  $R_{\text{диф}}$  лежат в диапазоне от долей и единиц Ом (у мощных стабилитронов) до сотен и даже тысяч Ом (у высоковольтных маломощных стабилитронов).

Для графического расчета дифференциального сопротивления диода по его ВАХ в некоторой точке  $A$  (рис. 1.7) необходимо провести касательную  $AC$ . Точка  $B$ , принадлежащая ВАХ диода, находится близко к прямой  $AC$ . Через разность координат точек  $A$  и  $B$  по оси напряжений можно найти приращение напряжения  $\Delta U$

$$\Delta U = U_B - U_A. \quad (1.10)$$

Через разность координат точек по оси тока можно рассчитать приращение тока  $\Delta I$

$$\Delta I = I_B - I_A. \quad (1.11)$$

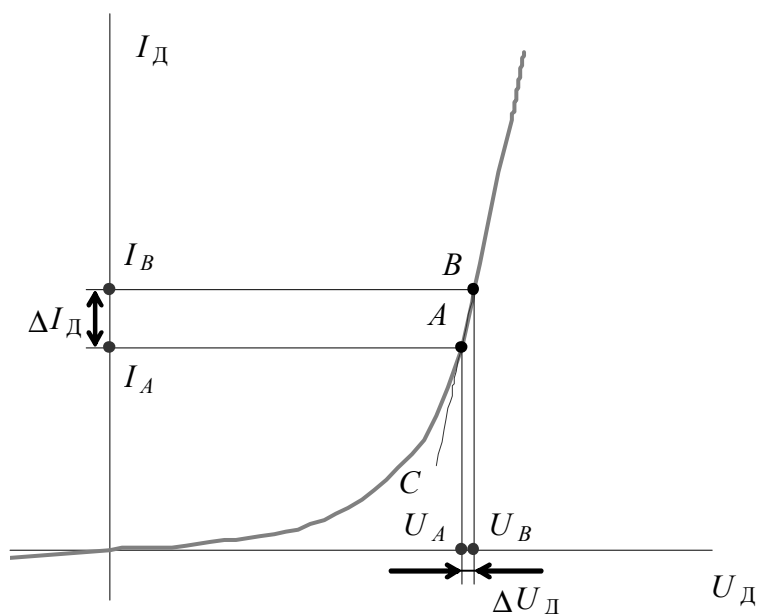


Рис. 1.7



На основе приближения  $dU \approx \Delta U$  и  $dI \approx \Delta I$  можно рассчитать приближенное значение дифференциального сопротивления

$$R_{\text{диф}} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (1.12)$$

К числу динамических параметров диодов относятся также барьерная  $C_{\text{б}}$  и диффузионная  $C_{\text{дф}}$  емкости полупроводникового диода ( $p$ - $n$ -перехода).

Барьерная  $C_{\text{б}}$  возникает при обратном напряжении на  $p$ - $n$ -переходе и обусловлена изменением в нем объемного заряда. В этом случае  $p$ - $n$ -переход рассматривается как обычный конденсатор, где пластинами являются границы обедненного слоя, а сам обедненный слой служит несовершенным диэлектриком с увеличенными диэлектрическими потерями.

Диффузионная емкость  $C_{\text{дф}}$  – дифференциальная емкость  $p$ - $n$ -перехода, характеризующая изменение избыточных носителей заряда в  $p$ - и  $n$ -областях (вне перехода) при изменении прямого напряжения приложенного к переходу. Диффузионная емкость характеризует инерционность накопления избыточных зарядов в областях, граничащих с обедненной областью ( $p$ - $n$ -переходом).

Следует отметить параметры, отражающие влияние температуры на ВАХ диода. Зависимость теплового тока  $I_0$  от абсолютной температуры  $T$   $I_0(T)$  характеризуют температурой удвоения  $\Delta T_{\text{удв}}$  теплового тока – приращением температуры, приводящим к удвоению теплового тока  $I_0$ , при температуре  $T + \Delta T_{\text{удв}}$ .  $I_0(T + \Delta T_{\text{удв}}) / I_0(T) = 2$ . (1.13)

Выражение для значения теплового тока идеального  $p$ - $n$ -перехода при заданном значении температуры  $T$ , согласно формуле (1.3), имеет вид

$$\Delta T_{\text{удв}} = \frac{\ln 2 k T^2}{\Delta \varepsilon_0 - \ln 2 k T}. \quad (1.14)$$

Для упрощенных расчетов значения теплового тока  $I_0$  при изменении температуры окружающей среды от исходного значения  $T$  на величину  $\Delta T$  можно пользоваться выражением

$$I_0(T + \Delta T) \approx I_0(T) \cdot 2^{\Delta T / \Delta T_{\text{удв}}}. \quad (1.15)$$

Для прямой ветви ВАХ диода при увеличении температуры  $T$  падение напряжения  $U$  при некотором значении прямого тока  $I$  будет

уменьшаться. Для оценки температурной зависимости ВАХ диода служит *температурный коэффициент напряжения* (ТКН)

$$\text{ТКН} = \left. \frac{\Delta U}{\Delta T} \right|_{I=\text{const}}, \quad (1.16)$$

где  $\Delta U$  - величина изменения напряжения диода, вызванная изменением температуры  $\Delta T$ .

Этот коэффициент показывает относительное изменение прямого напряжения на диоде при изменении температуры на  $1^\circ\text{C}$  ( $^\circ\text{K}$ ) при некотором значении прямого тока. Приблизительное значение ТКН равно  $-2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ .

При изменении температуры  $\Delta T$  напряжение стабилизации стабилитрона  $U_{\text{СТ}}$  также изменяется на некоторую величину  $\Delta U_{\text{СТ}}$ . Для учета такого влияния температуры  $T$  на напряжение стабилизации  $U_{\text{СТ}}$  используют *температурный коэффициент напряжения стабилизации*, который рассчитывается согласно выражению

$$\text{ТКНС} = \left. \frac{\Delta U_{\text{СТ}}}{\Delta T} \cdot \frac{1}{U_{\text{СТ}}} \cdot 100\% \right|_{I_{\text{СТ}}=\text{const}}. \quad (1.17)$$

В случае туннельного механизма электрического пробоя напряжение пробоя будет уменьшаться (отрицательный ТКН), в случае лавинного механизма пробоя напряжение пробоя будет расти (положительный ТКН). Также можно отметить, что для кремниевых диодов характерен лавинный пробой, т.е. напряжению пробоя  $U_{\text{проб}}$  таких диодов будет соответствовать положительный ТКН.

Значения ТКНС у выпускаемых стабилитронов находятся в пределах от 0,05 до 0,15%/°C.. Особую группу составляют прецизионные стабилитроны, имеющие ТКНС до 0,0005%/°C.

### 3. Вопросы для подготовки

1. Приведите определение электронно-дырочного перехода.
2. Объясните причину возникновения контактной разности потенциалов в  $p$ - $n$ -переходе.
3. Перечислите процессы, происходящие в  $p$ - $n$ -переходе в состоянии равновесия.
4. Какое напряжение называют прямым для  $p$ - $n$ -перехода?
5. Какие изменения наблюдаются в процессах, происходящих в  $p$ - $n$ -переходе, в случае подачи прямого напряжения?

6. Какое напряжение называют обратным для  $p$ - $n$ -перехода?
7. Какие изменения наблюдаются в физических процессах, происходящих в  $p$ - $n$ -переходе, в случае подачи обратного напряжения? Приведите формулу Шокли и дайте объяснение приведенным обозначениям.
9. Почему параметр  $I_0$  называется тепловым током?
10. Какую область  $p$ - $n$ -перехода называют базовой?
11. Какую область  $p$ - $n$ -перехода называют эмиттерной?
12. Какие допущения используются при выводе вольт-амперной характеристики идеального  $p$ - $n$ -перехода?
13. Какие процессы протекают в реальном  $p$ - $n$ -переходе в отличие от идеального?
14. Приведите определение полупроводникового диода.
15. Приведите обозначение полупроводникового диода. Приведите название электродов прибора.
16. Приведите примеры классификации полупроводниковых диодов.
17. Укажите назначение выпрямительных диодов. Какие требования к ним предъявляются?
18. Приведите особенности и отличия вольт-амперных характеристик германиевых и кремниевых диодов.
19. Дайте объяснения отличиям вольт-амперных характеристик германиевых и кремниевых диодов.
20. Перечислите основные параметры полупроводниковых диодов.
21. Какое назначение имеют универсальные и импульсные диоды? Какие требования предъявляются к значениям их параметров?
22. Какие параметры учитывают влияние температуры на вольт-амперную характеристику диодов? Приведите формулы для их расчета.
23. Сравните значения температуры удвоения теплового тока для германиевых и кремниевых диодов.
24. Назовите назначение стабилитронов.
25. На каком эффекте основан принцип действия полупроводникового стабилитрона?
26. Как связаны стабилизирующие свойства стабилитрона со значением дифференциального сопротивления стабилитрона на участке пробоя?
27. Какие процессы влияют на знак температурного коэффициента напряжения стабилизации полупроводникового стабилитрона?

## 4. Практическая часть

### 4.1. Расчет и построение вольт–амперной характеристики идеального $p$ - $n$ -перехода

С целью анализа зависимости (1.1) построим график ВАХ идеального  $p$ - $n$ -перехода. Для этого проведем необходимые расчеты для идеального  $p$ - $n$ -перехода (полупроводникового диода) при  $T = 300^\circ\text{K}$ , если значение теплового тока (обратного тока насыщения)  $I_0 = 10$  мкА. Расчет проведем в интервале напряжений от 0 до -5 В через 1 В и от 0 до 0,2 В через шаг 0,05 В.

Сначала вычислим величину теплового потенциала  $\phi_T$  при температуре  $T = 300^\circ\text{K}$  по формуле (1.2). Полученное значение будет равно

$$\phi_T = \frac{kT}{q} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 300\text{K}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} \approx 26 \text{ мВ}.$$

Используя рассчитанное значение теплового потенциала  $\phi_T$  и заданное значение теплового тока  $I_0$  (10 мкА), рассчитаем по формуле (1.1) величины тока  $I$  через  $p$ - $n$ -переход для значений напряжения  $U$ , соответствующих заданному интервалу. Результаты расчетов представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U$ , В	-5	-4	-3	-2	-1	0	0,05	0,1	0,15	0,2
$U/\phi_T$	-193	-154	-115	-77	-38	0	1,93	3,86	5,8	7,73
$I$ , мкА	-10	-10	-10	-10	-10	0	59	467	3283	22734
$I$ , мА	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0	0,59	4,67	3,283	22,734

Изображение ВАХ, полученной по рассчитанным в табл. 1.1 значениям, представлено на рис. 1.2. Отметим, что изображение обратной ветви характеристики сливается с осью напряжений, т.к. по результатам расчета значения максимального прямого тока превышает значения обратного (теплового) на три порядка.

Значения токов и напряжений для построения ВАХ идеального  $p$ - $n$ -перехода в области малых значений прямого и обратного напряжений (от  $-3\phi_T$  до  $3\phi_T$ ) представлены в табл. 1.2. Соответствующие им характеристики представлены на рис. 1.3 и рис. 1.4.

ВАХ идеального *p-n*-перехода

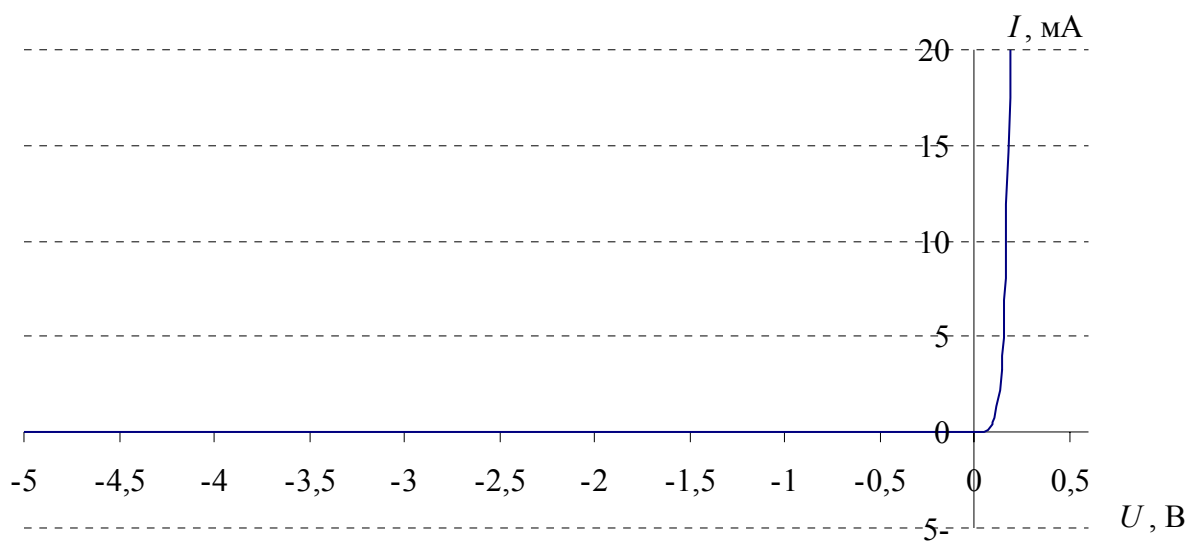


Рис. 1.2

Таблица 1.2

№	1	2	3	4	5	6	7
$U/\varphi_T$	-3	-2	-1	0	1	2	3
$U$ , мВ	-77,63	-51,75	-25,88	0	25,88	51,75	77,63
$I/I_0$	-0,95	-0,86	-0,63	0	1,72	6,39	19,09
$I$ , мкА	-9,5	-8,65	-6,32	0	17,18	63,89	190,86

ВАХ идеального *p-n*-перехода в области малых значений напряжений

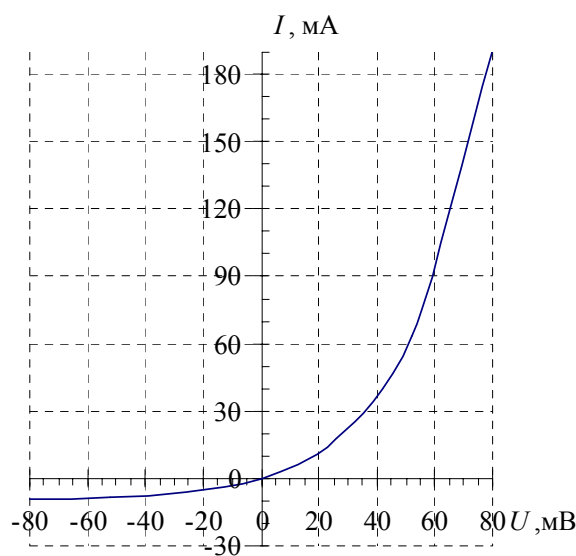


Рис. 1.3

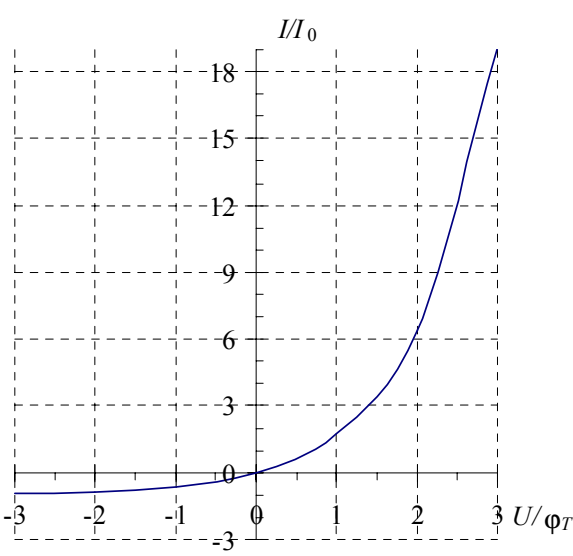


Рис. 1.4

## 4.2. Расчет и построение ВАХ идеального $p$ - $n$ -перехода с учетом сопротивления базовой области

Проведем анализ влияния сопротивления базовой области  $R_B$  на ВАХ идеального  $p$ - $n$ -перехода. Для условий, сформулированных в предыдущей задаче, рассчитаем и построим характеристику с учетом сопротивления базовой области  $R_B$ , равного 25 Ом. Построения выполним на графике, полученном в предыдущей задаче.

Используя формулу (1.4), пересчитаем значения напряжений, приложенных к  $p$ - $n$ -переходу (табл. 1.1 и 1.2) с учетом падения напряжения на сопротивлении базовой области  $R_B$ . Результаты приведены в таблицах 1.3 и 1.4. Изображение полученной вольт-амперной характеристики представлено на рис. 1.5.

Таблица 1.3

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{p-n}$ , В	-5	-4	-3	-2	-1	0	0,05	0,1	0,15	0,2
$U_{p-n}/\phi_T$	-193	-154	-115	-77	-38	0	1,93	3,86	5,8	7,73
$I$ , мкА	-10	-10	-10	-10	-10	0	59	467	3283	22734
$IR_B$ , В	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	0	1,48	11,67	82,1	568
$U$ , В	-5	-4	-3	-2	-1	0	0,05	0,11	0,23	0,77

Также рассчитаем и построим вольт-амперную характеристику идеального  $p$ - $n$ -перехода для диапазона малых прямых и обратных напряжений (от  $-3\phi_T$  до  $3\phi_T$ ). Результаты расчетов представлены в табл. 1.4. Изображения ВАХ перехода при малых значениях напряжения представлены на рис. 1.6.

Таблица 1.4

№	1	2	3	4	5	6	7
$U_{p-n}$ , мВ	-80	-51,75	-25,88	0	25,88	51,75	80
$U_{p-n}/\phi_T$	-3	-2	-1	0	1	2	3
$I/I_0$	-0,95	-0,86	-0,63	0	1,72	6,39	19,09
$I$ , мкА	-9,5	-8,65	-6,32	0	17,18	63,89	190,86
$IR_B$ , мВ	-0,24	-0,22	-0,16	0	0,43	1,6	4,77
$U$ , мВ	-80,24	-51,97	-26,03	0	26,3	53,35	84,77

Как видно из графика на рис. 1.5 и 1.6 влияние сопротивления базовой области  $R_b$  существенно для прямой ветви ВАХ. Влияние сопротивления базовой области  $R_b$  на вид построенных характеристик проявилось в появлении почти линейного (омического) участка. Следует отметить, что в реальных  $p-n$ -переходах необходимо учитывать влияние эффекта модуляции сопротивления базы  $R_b$  при больших значениях прямого тока  $I$ , который приводит к отклонению ВАХ от линейной зависимости.

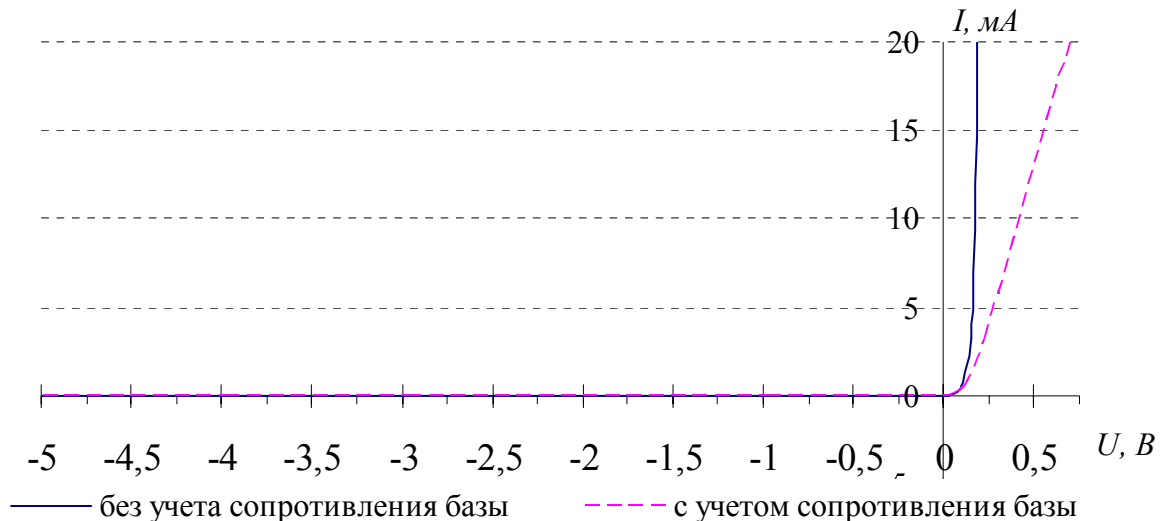


Рис. 1.5

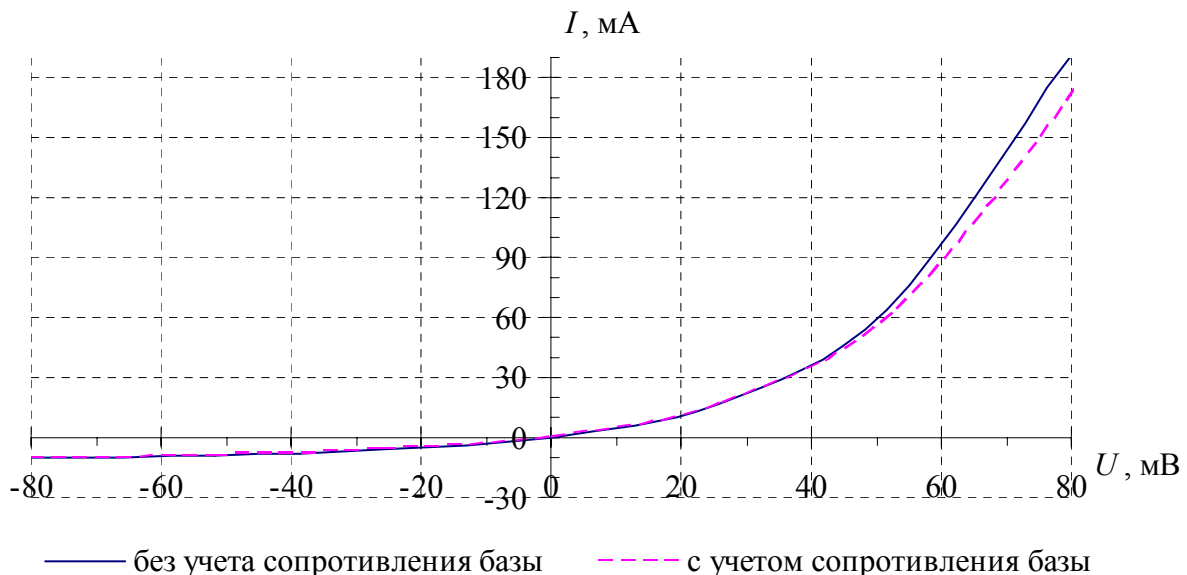


Рис. 1.6

### 4.3. Расчет дифференциального сопротивления полупроводникового диода

Рассчитаем дифференциальное сопротивление диода  $R_{\text{диф}}$ , используя его ВАХ, приведенную на рис. 1.7, для рабочей точки  $A$  со значением тока равным 13,5 мА.

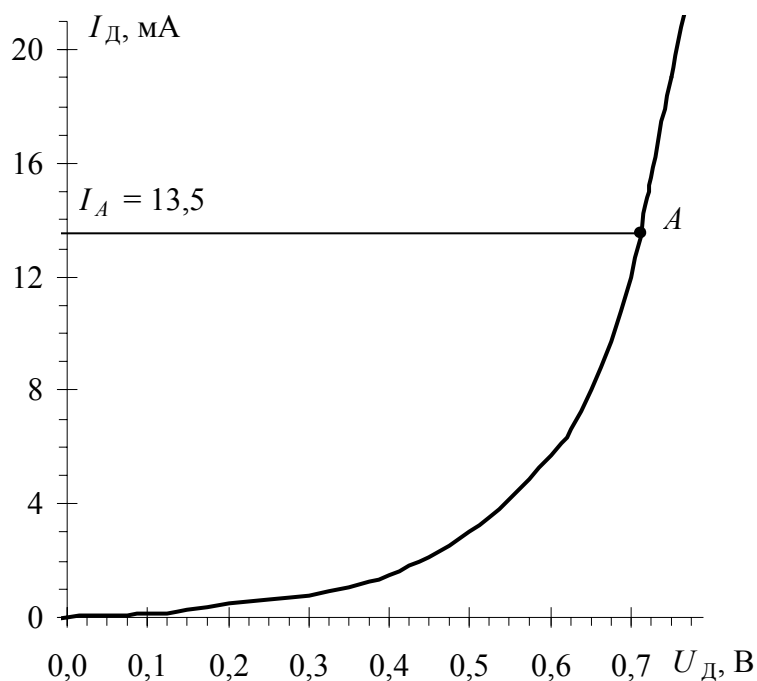


Рис. 1.7

Для удобства построений выделим область графика вблизи точки  $A$  в более крупном масштабе, рис. 1.8. Координаты точки  $A$  характеризуются значением напряжения  $U_D$  на диоде равным 0,71 В ( $U_A = 0,71\text{ В}$ ,  $I_A = 13,5\text{ мА}$ ).

Проведем из точки  $A$  касательную  $AC$ . Отметим на ВАХ диода точку  $B$ , расположенную практически на касательной  $AC$ . Координаты точки  $B$  характеризуются значениями напряжения  $U_B \approx 0,735\text{ В}$  и тока  $I_B = 17\text{ мА}$ . Выполненные построения с отмеченными точками  $A$  и  $B$ , касательной  $AC$  представлены на рис. 1.8. Найдем приращение напряжения  $\Delta U_D$  и тока  $\Delta I_D$  через разность координат точек  $A$  и  $B$

$$\Delta U_D = U_B - U_A \approx 0,735\text{ В} - 0,71\text{ В} \approx 25\text{ мВ}.$$

$$\Delta I_D = I_B - I_A \approx 17\text{ мА} - 13\text{ мА} \approx 3,5\text{ мА}.$$



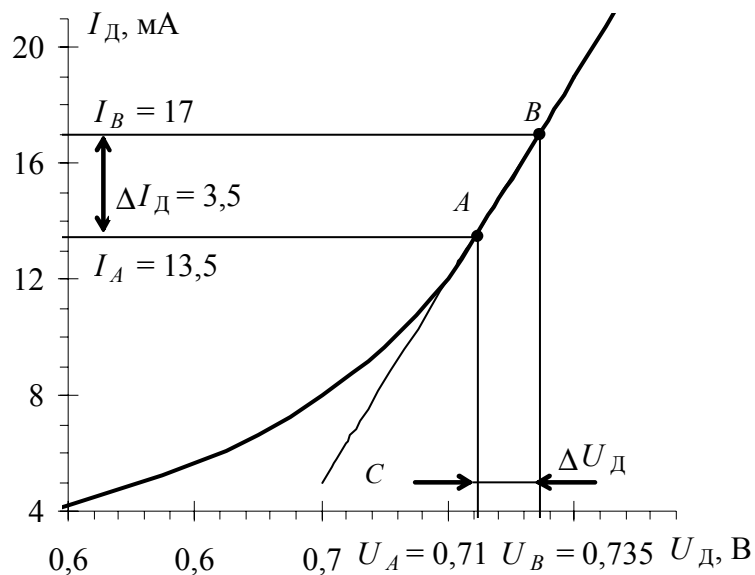


Рис. 1.8

На основе приближения  $dU_D \approx \Delta U_D$  и  $dI_D \approx \Delta I_D$  можно рассчитать приближенное значение дифференциального сопротивления

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_D}{I_D} \approx \frac{25 \text{ мВ}}{3,5 \text{ мА}} \approx 7 \text{ Ом}.$$

#### 4.4. Расчет температурного коэффициента напряжения полупроводникового диода

Рассчитаем температурный коэффициент напряжения диода, используя вольт-амперные характеристики при различных температурах ( $T_1 = 100^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_3 = -55^\circ\text{C}$ ), приведенные на рис. 1.9, для значения тока диода  $I_D$  равного 40 мкА.

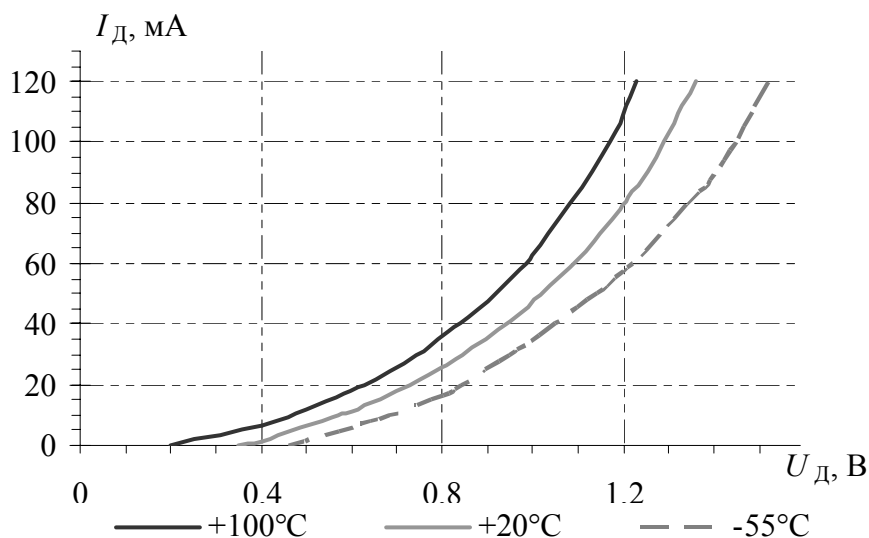


Рис. 1.9

Проведем расчет для заданного значения тока диода  $I_D$ , равного 40 мА. Для данного значения тока  $I_D$  при температуре  $T_1$ , равной  $+20^\circ\text{C}$  значение напряжения  $U_D$  на диоде равно  $U_1 = 0,945\text{ В}$ , при температуре  $T_2 = +100^\circ\text{C}$  –  $U_2 = 0,84\text{ В}$ , при температуре  $T_3 = -55^\circ\text{C}$  –  $U_3 = 1,05\text{ В}$ . Значения указанных напряжений отмечены на рис. 1.10. Для удобства область графика, соответствующая анализируемым точкам, приведена на рис. 1.10 в более крупном масштабе, чем на рис. 1.9.

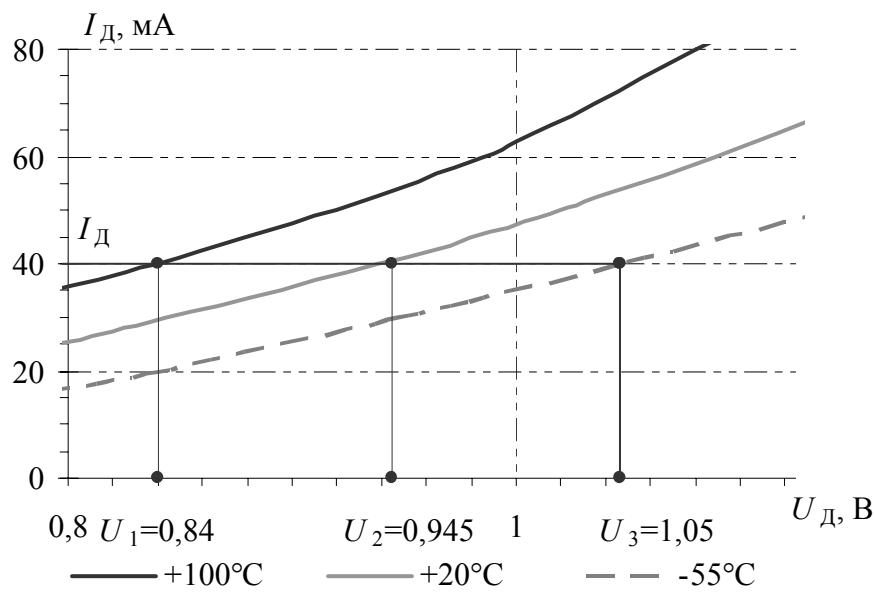


Рис. 1.10

Найдем значение ТКН, используя значения напряжений для температуры  $T_1 = 100^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 20^\circ\text{C}$ , с помощью выражения (1.7). Полученное значение будет равно

$$\text{TKH} = \left. \frac{0,945\text{ В} - 0,84\text{ В}}{20^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}} \right|_{I_D = 40\text{ мА}} = \frac{1,05\text{ В}}{-80^\circ\text{C}} = -1,31\text{ мВ}/^\circ\text{C}.$$

Порядок полученного значения ТКН совпадает с указанной выше (разд. 2.2.3) величиной. Как видно, ТКН имеет отрицательное значение на прямой ветви ВАХ, это обусловлено тем, что с увеличением температуры  $T$  при неизменной величине тока  $I_D$  значение напряжения  $U_D$  на диоде уменьшается.

#### 4.5. Расчет температурного коэффициента напряжения стабилизации стабилитрона

Рассчитаем температурный коэффициент напряжения стабилизации  $U_{CT}$  стабилитрона по ВАХ, представленной на рис. 1.6, для значения рабочего тока стабилитрона  $I_{CTP} = 9,5$  мА.

Для рабочего значения тока стабилитрона  $I_{CTP}$  при температуре  $T_1$ , равной  $+20^\circ\text{C}$  значение напряжения  $U_{CT}$  на стабилитроне равно  $U_{CT1} = 8,2$  В, для температуры  $T_2 = +120^\circ\text{C}$  –  $U_{CT2} = 7,5$  В, для температуры  $T_3 = -60^\circ\text{C}$  –  $U_{CT3} = 9,4$  В. Указанные значения напряжений приведены на семействе ВАХ стабилитрона, рис. 1.11.

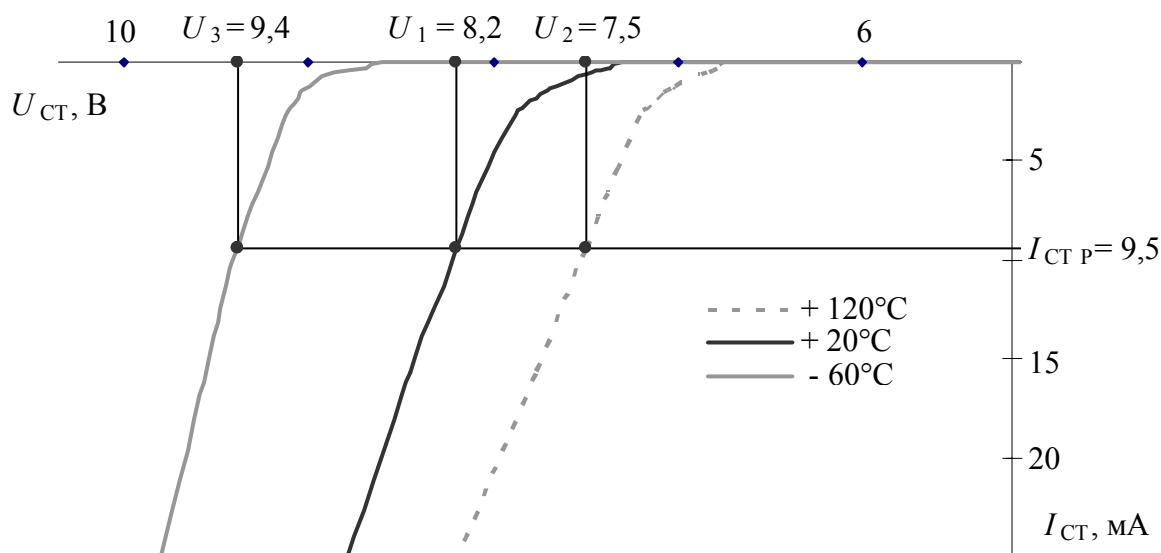


Рис. 1.11

Используя выражение (1.17) и исходные данные, значения напряжений  $U_{CT1}$  и  $U_{CT2}$  для значений температуры  $T_1$  и  $T_2$ , получим

$$\begin{aligned} \text{ТКНС} &= \frac{U_{CT2} - U_{CT1}}{T_2 - T_1} \cdot \frac{1}{U_1} \cdot 100\% \Bigg|_{I_{CT}=\text{const}} = \\ &= \frac{7,5\text{В} - 8,2\text{В}}{120^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}} \cdot \frac{1}{9,4} \cdot 100\% \Bigg|_{I=9,5\text{ мА}} = \frac{-0,7\text{В} \cdot 100\%}{100^\circ\text{C} \cdot 8,2\text{В}} = -0,085\%/^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

## Практическое занятие №2

### Расчет электрических цепей, содержащих полупроводниковые диоды

#### 1. Цель занятия

Изучение путей построения линеаризованных эквивалентных схем полупроводниковых диодов и приобретение навыков расчета цепей постоянного тока, содержащих полупроводниковые диоды.

#### 2. Краткие теоретические сведения

##### 2.1. Расчет нелинейных электрических цепей. Основные понятия и определения

*Нелинейным* называется такой элемент, основной параметр которого зависит от значений или направлений либо тока  $I$  через данный элемент, либо напряжения  $U$  на его выводах. Зависимость электрического сопротивления полупроводникового диода от приложенного напряжения  $R(U)$  также носит нелинейный характер, т.е. это – элемент с нелинейной ВАХ.

*Электрической цепью* называют совокупность устройств и элементов, соединенных между собой соответствующим образом и образующих путь для электрического тока. Электромагнитные процессы в цепи могут быть описаны с помощью понятий электродвижущей силы, тока и напряжения.

Графическое изображение электрической цепи с помощью условных обозначений ее устройств и элементов, показывающее их соединения, называют *схемой электрической цепи*.

Электрическая цепь, содержащая хотя бы один нелинейный элемент, является *нелинейной*. Все электрические цепи, включающие полупроводниковые приборы, в том числе диоды, являются, как правило, нелинейными. Электрическое состояние такой цепи описывается системой нелинейных уравнений, для решения которых кроме определения токов и напряжений необходимо также найти зависящие от них параметры нелинейных элементов. Для их решения используют приближенные графоаналитические либо более точные численные методы. Рассмотрим графоаналитические методы расчета электрических цепей, содержащие полупроводниковые диоды, применительно к статическому режиму.

## 2.2. Расчет цепей постоянного тока, содержащих полупроводниковые диоды

### 2.2.1. Графоаналитические методы расчета

#### Метод эквивалентных преобразований

*Метод эквивалентных преобразований* является самым простым из всех применяемых на практике графоаналитических методов анализа и расчета нелинейных электрических цепей. При этом группа нелинейных элементов цепи заменяется одним эквивалентным элементом, для которого определяется эквивалентная характеристика графическим путем.

Рассмотрим случай цепи, состоящей из двух последовательно соединенных элементов: линейного резистора  $R_1$  и нелинейного резистора  $R_2$  (рис. 2.1).

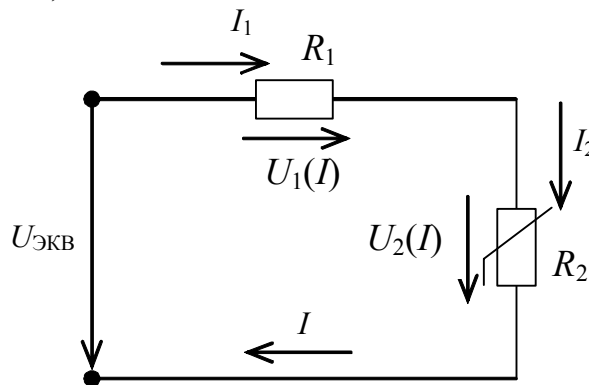


Рис. 2.1

Через каждый элемент такой цепи будет протекать один и тот же ток  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  т.е.

$$I = I_1 = I_2. \quad (2.1)$$

Для падения напряжения на эквивалентном элементе  $U_{\text{ЭКВ}}$ , согласно второму закону Кирхгофа, будет справедливо следующее выражение

$$U_{\text{ЭКВ}}(I) = U_1(I) + U_2(I), \quad (2.2)$$

где  $U_1(I)$ ,  $U_2(I)$  - падение напряжений на резисторах  $R_1$  и  $R_2$ .

ВАХ эквивалентного резистора может быть построена путем суммирования ординат ВАХ входящих в рассматриваемую цепь резисторов. Пример ВАХ эквивалентного элемента показан на рис. 2.2. С помощью этой ВАХ  $U_{\text{ЭКВ}}(I)$  можно определить графическим путем ток  $I'$  в цепи для любого заданного напряжения  $U'$ . А затем по

ВАХ отдельных элементов  $U_1(I)$ ,  $U_2(I)$  – соответствующие найденному току  $I'$  напряжения  $U'_1$  и  $U'_2$  на сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$ .

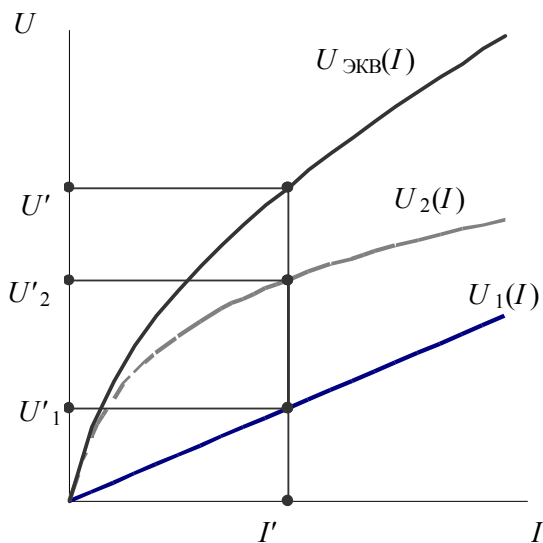


Рис. 2.2

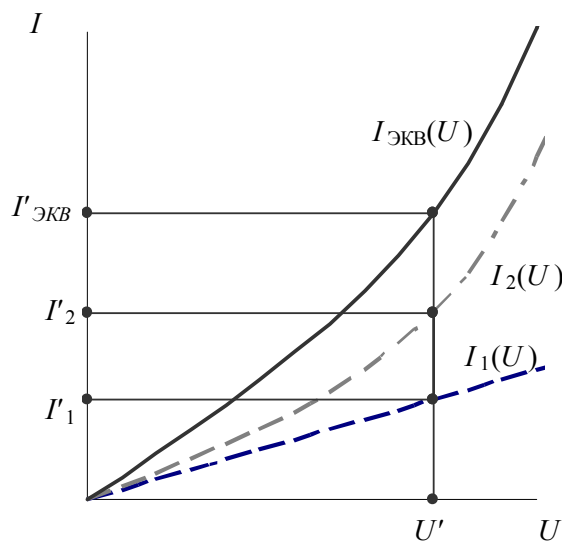


Рис. 2.3

Подобный подход был использован при построении ВАХ идеального  $p$ - $n$ -перехода с учетом сопротивления базовой области в предыдущем занятии: разд. 1.1, формула (1.4), рис. 1.5, 1.6.

Также графически можно построить эквивалентную ВАХ цепи  $I_{\text{ЭКВ}}(U)$  при параллельном соединении путем суммирования абсцисс характеристик для отдельных элементов. Такое построение для случая соединения двух нелинейных элементов с характеристиками  $I_1(U)$  и  $I_2(U)$  представлено на рис. 2.3. Оно соответствует соотношениям

$$U = U_1 = U_2, \quad (2.3)$$

$$I_{\text{ЭКВ}}(U) = I_1(U) + I_2(U). \quad (2.4)$$

По полученной ВАХ эквивалентного элемента  $I_{\text{ЭКВ}}(U)$  (рис. 2.3) также можно определить напряжение  $U'$  на входе цепи для любого заданного тока  $I'$ , после чего не представляет труда найти соответствующие ему токи  $I'_1$ ,  $I'_2$  через рассматриваемые элементы цепи. Метод эквивалентных преобразований целесообразно применять только для неуправляемых нелинейных элементов и фиксированных значений параметров линейных элементов. Если же нелинейный элемент электрической цепи является управляемым или требуется провести анализ режима цепи при дискретном изменении параметра линейного элемента, то данный метод оказывается слишком громоздким из-за необходимости многократных построений.

## Метод пересечения характеристик

Метод пересечения характеристик (метод опрокинутой характеристики) используется для анализа цепей, которые методами эквивалентных преобразований могут быть сведены к последовательному включению двух элементов. При этом характеристики элементов в общем случае могут иметь произвольный характер. В основном методе предполагается предположение о том, что суммарное напряжение на последовательно включенных элементах определяется внешним источником и не зависит от тока, протекающего в цепи, в соответствии с выражениями (2.1), (2.2).

При известных ВАХ элементов  $I_1(U)$ ,  $I_2(U)$  (рис. 2.4) ток  $I'$ , удовлетворяющий выражению (2.1), для приложенного к схеме напряжения  $U_{\Pi}$ , соответствующего (2.2), может быть легко найден графически. Для этого исходную характеристику одного из элементов  $I_2(U)$  зеркально отражают относительно оси токов (опрокидывают) и ее начало сдвигают по оси напряжений на величину, равную входному напряжению  $U_{\Pi}$  цепи, и получают *опрокинутую* характеристику с ВАХ  $I_2(U_{\Pi} - U)$  (рис. 2.5). Перечисленные построения и определяют название метода как *метода пересечения характеристик* (*метода опрокинутой характеристики*). Точка пересечения исходной характеристики первого  $I_1(U)$  и преобразованной характеристики второго  $I_2(U_{\Pi} - U)$  элементов даст искомые ток  $I'$  и падения напряжений на элементах  $U'_1$  и  $U'_2 = U_{\Pi} - U'_1$ .

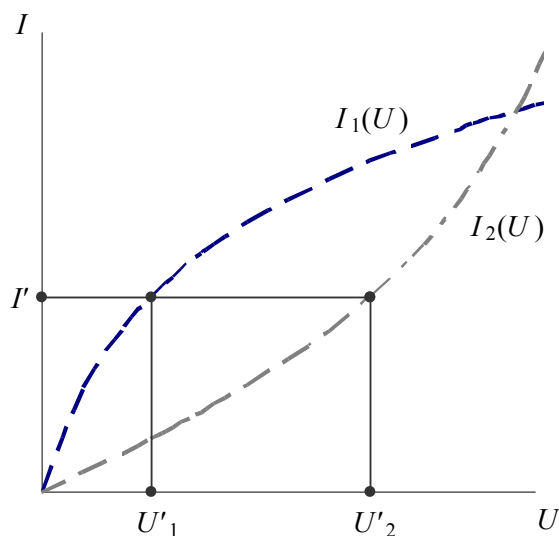


Рис. 2.4

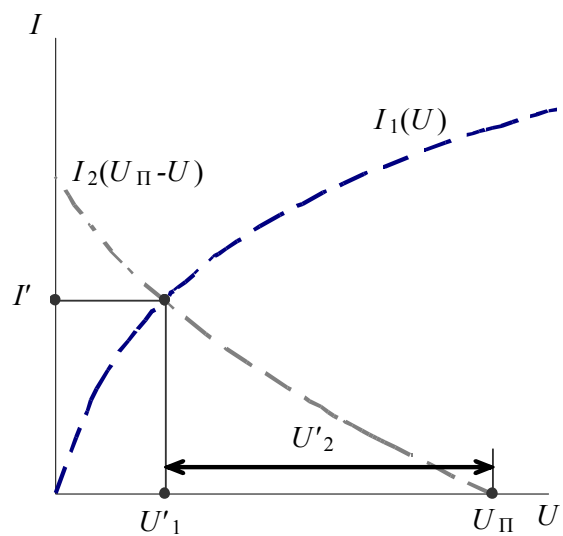


Рис. 2.5

Рассмотрим случай расчета цепи, состоящей из соединенных последовательно диода  $VD$  и резистора  $R$ , к которой приложено напряжение питания  $U_{\text{пит}}$  (рис. 2.6).

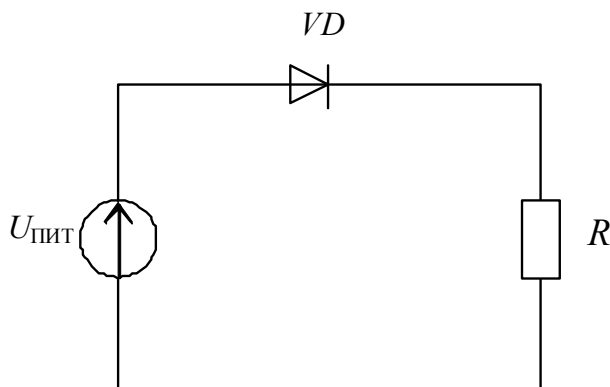


Рис. 2.6

Зависимость тока через резистор  $R$  от падения напряжения  $U$  на нем является линейной

$$I = U/R. \quad (2.5)$$

Если данное выражение преобразовать в опрокинутую вольт-амперную характеристику, то получится следующее выражение

$$I = \frac{U_{\text{пит}} - U}{R}. \quad (2.6)$$

График зависимости (2.6), также как и (2.5), представляет собой прямую линию. В подобной схеме резистор  $R$  обычно играет роль нагрузки, поэтому такая прямая носит название *линии нагрузки* или *нагрузочной прямой*. Линию нагрузки можно построить по двум точкам, соответствующим режимам холостого хода и короткого замыкания на диоде. В режиме холостого хода ток  $I$  для выражения (2.6) будет равен нулю, а нагрузочная прямая пересечет ось напряжений в точке, в которой выполняются условия

$$I = 0, U = U_{\text{х.х.}} = U_{\text{пит}}. \quad (2.7)$$

Короткое замыкание соответствует случаю, когда ток  $I$  через элемент, согласно (2.6), будет максимальным при минимальном падении напряжений  $U$ , т.е. она характеризуется точкой с координатами  $I_{\text{к.з.}} = U_{\text{пит}}/R$ .

$$(2.8)$$

Подобным образом можно рассчитать координаты точек линии нагрузки при подаче обратного напряжения  $U_{\text{пит}}$  на анализируемую схему. В этом случае значения координат точек для режимов короткого замыкания и холостого хода будут отрицательными.



### 2.2.2. Метод линеаризации

*Метод линеаризации* заключается в замещении нелинейного элемента эквивалентной линейной схемой, справедливой для ограниченного диапазона изменений тока и напряжения. Такое замещение нелинейного элемента позволяет описывать электрическое состояние нелинейной цепи с помощью системы линейных уравнений. Практически воплощением метода линеаризации является метод *кусочно-линейной аппроксимации*, заключающейся в замене заданной нелинейной характеристики ломанной прямой с одной или несколькими точками излома.

Наиболее просто эта задача решается в частном случае, когда нелинейность характеристики мала или участок характеристики, в пределах которого работает нелинейный элемент, известен и может быть аппроксимирован прямой без излома. В этом случае нелинейный элемент заменяется источником постоянной ЭДС и линейным сопротивлением, равным его дифференциальному сопротивлению. Рассмотрим это для полупроводникового диода, ВАХ которого представлена на рис. 2.7.

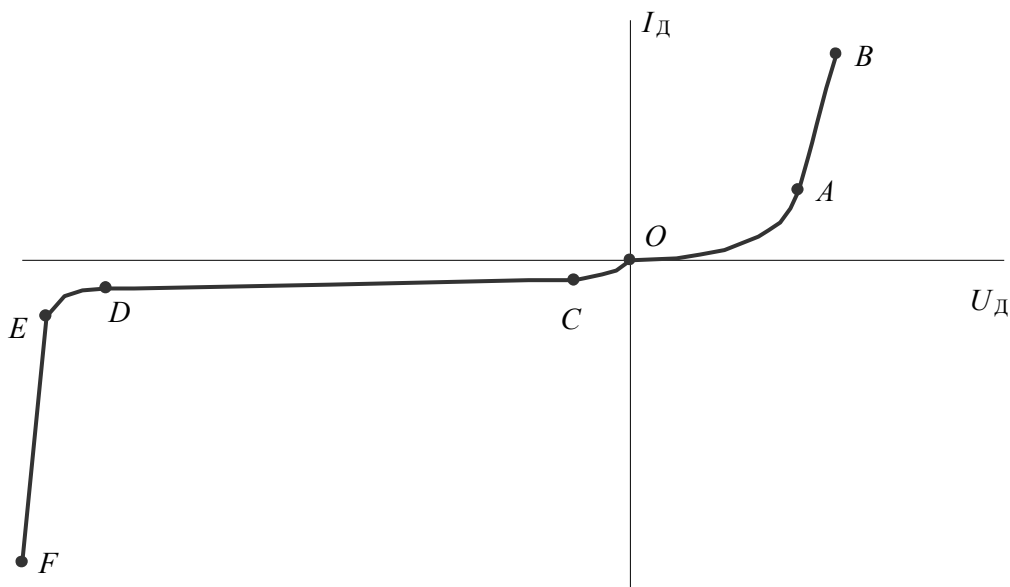


Рис. 2.7

На ВАХ диода имеются линейные участки  $AB$ ,  $CD$ ,  $EF$ . Продолжим эти отрезки до пересечения с осями напряжения  $OU$  и тока  $OI$  (рис. 2.8). Точками пересечений будут  $A'$ ,  $C'$ ,  $E'$ . Точке  $A'$  будет соответствовать напряжение  $U_{\text{пор}}$ , точке  $C'$  – ток  $I_{\text{обр}0}$ , а точке  $E'$  – напряжение пробоя  $U_{\text{проб}}$ .

Напряжение  $U_{\text{пор}}$  представляет собой «остаточное напряжение» диода (напряжение отсечки диода при прямом его смещении) и носит название *порогового напряжения диода*.

Прямая ветвь ВАХ диода (прямая  $BA$ ) может быть аппроксимирована линейной зависимостью напряжения  $U$  от тока  $I$

$$U = U_{\text{пор}} + IR_{\text{диф}}, \quad (2.9)$$

где  $R_{\text{диф}}$  – значение дифференциального сопротивления диода для прямой ветви ВАХ.

Отрезок  $BA'$  может быть получен из отрезка  $OB'$ , учитывающего зависимость для падения напряжения на дифференциальном сопротивлении  $R_{\text{диф}}$  диода, путем параллельного переноса относительно оси тока на величину  $U_{\text{пор}}$ . Вольт-амперная зависимость для отрезка  $OB'$  соответствует выражению

$$U_{R_{\text{диф}}} = IR_{\text{диф}}. \quad (2.10)$$

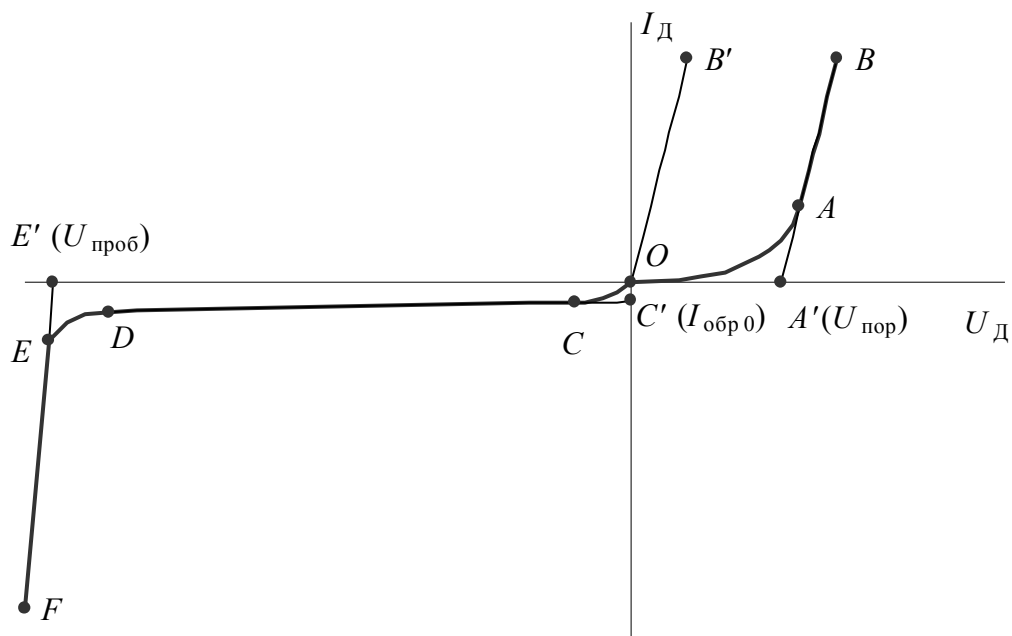


Рис. 2.8

Диод при прямом смещении для участка  $AB$  может быть заменен эквивалентной линейной схемой, приведенной на рис. 2.9.

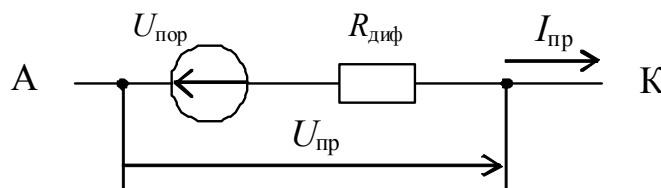


Рис. 2.9

Аналогично могут быть аппроксимированы линейными функциями области обратного смещения диода (участок  $CD$  вольт-амперной характеристики диода). Выражение, описывающее зависимость тока от напряжения на обратной ветви, можно представить как  $U_{обр}$

$$I = I_{обр0} + \frac{U_{обр}}{R_{диф\ обр}}, \quad (2.11)$$

где  $R_{диф\ обр}$  – значение дифференциального сопротивления диода на обратной ветви ВАХ;

$I_{обр0}$  – значение тока соответствующее точке  $C'$ , пересечения участка  $CD'$  ВАХ диода с осью напряжения  $OU$ .

Зависимость (2.11) можно представить через связь напряжения  $U$  от тока  $I$  на обратной ветви ВАХ в виде

$$U_{обр} = (I_{обр0} + I)R_{диф\ обр}. \quad (2.12)$$

Выражению (2.11) соответствует эквивалентная схема, показанная на рис. 2.10.

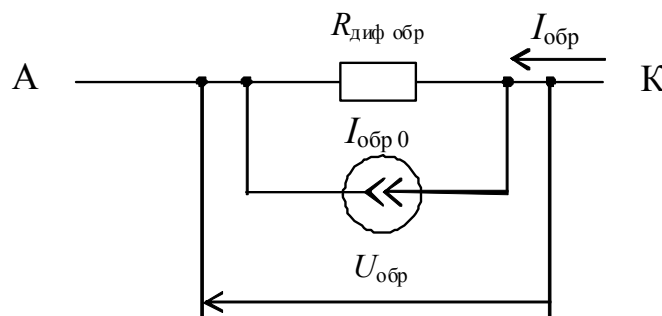


Рис. 2.10

Для области пробоя ВАХ диода (участок  $EF$ ) зависимость обратного напряжения на диоде можно описать выражением

$$U_{обр} = U_{проб} + IR_{диф\ проб}, \quad (2.13)$$

где  $U_{проб}$  – значение напряжения пробоя диода;

$R_{диф\ проб}$  – значение дифференциального сопротивления диода на участке пробоя.

Формуле (2.13) соответствует схема, которая представлена на рис. 2.11.

Рассмотренные эквивалентные схема применимы для расчета статического (в случае постоянных значений токов и напряжений на диоде) и квазистатического режимов работы (в случае, когда период изменения сигнала намного больше времени пролета носителей через рабочее пространство диода). Для анализа прибора при средних и

высоких частотах сигнала необходимо включить в эквивалентную схему реактивные параметры, связанные с наличием дифференциальных емкостей  $p$ - $n$ -перехода диода (барьерную  $C_b$  и диффузионную  $C_{дф}$ ).

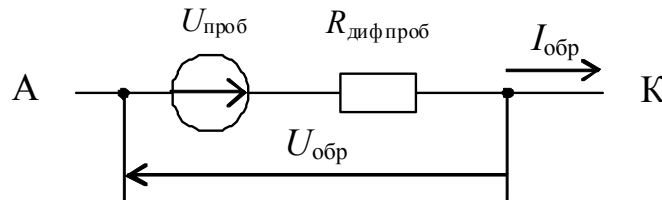


Рис. 2.11

В случае прямого смещения диода (для участка  $AB$  на рис. 2.8) схему приведенной на рис. 2.6 можно рассчитать методом линеаризации. После нахождения параметров эквивалентной схемы ( $U_{пор}$  и  $R_{диф}$ ) значение тока через цепь можно найти путем расчета для схемы, представленной на рис. 2.12.

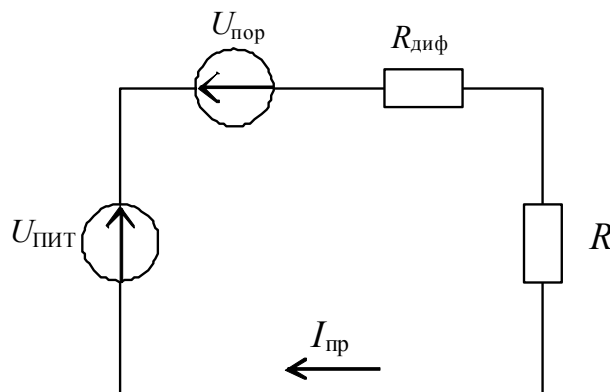


Рис. 2.12

Для данной цепи, учитывая значения протекающего через нее тока  $I_{пр}$ , согласно второму закону Кирхгофа можно записать

$$U_{пит} = U_{пор} + I_{пр} R_{диф} + I_{пр} R. \quad (2.14)$$

Отсюда можно найти величину тока  $I_{пр}$  согласно выражению

$$I_{пр} = \frac{U_{пит} - U_{пор}}{R + R_{диф}}. \quad (2.15)$$

В случае подачи обратного напряжения питания  $U_{пит}$  на диод расчет рассмотренной схемы можно провести, используя эквивалентные схемы (схемы замещения) диода для обратной ветви ВАХ диода или для области его пробоя.

### 3. Вопросы для подготовки

1. В чем состоит основная идея расчета нелинейных цепей методом эквивалентных преобразований?
2. Какие соотношения учитываются при построении эквивалентной ВАХ цепи, включающей нелинейный элемент, при последовательном соединении элементов?
3. Приведите соотношения для построения эквивалентной ВАХ цепи, включающей нелинейный элемент, при параллельном соединении элементов.
4. Приведите пример построения эквивалентной ВАХ цепи, включающей нелинейный элемент, при последовательном соединении элементов.
5. Приведите пример построения эквивалентной ВАХ цепи, включающей нелинейный элемент, при параллельном соединении элементов.
6. Приведите пример расчета эквивалентной ВАХ цепи, включающей нелинейный элемент, при последовательном соединении элементов.
7. Приведите пример расчета эквивалентной ВАХ цепи, включающей нелинейный элемент, при параллельном соединении элементов.
8. Какие преобразования характеристики элемента проводят при расчете нелинейных цепей методом пересечения характеристик (методом опрокинутой характеристики)?
9. Приведите зависимость для линии нагрузки.
10. По каким точкам можно построить линию нагрузки, каким режимам они соответствуют?
11. В чем заключается метод линеаризации характеристики нелинейного элемента?
12. Приведите эквивалентную схему для полупроводникового диода при прямом смещении.
13. Приведите эквивалентные схемы для полупроводникового диода при обратном смещении.
14. Приведите эквивалентную схему для стабилитрона.
15. Приведите формулу для расчета прямого тока через цепь, содержащую полупроводниковый диод.
16. Приведите формулу для расчета тока через цепь, содержащую полупроводниковый диод, для обратного смещения диода.

## 4. Практическая часть

### 4.1. Расчет графическим методом цепи, содержащей полупроводниковый диод

Рассчитаем ток  $I_D$  через диод и напряжение  $U_D$  на диоде, входящем в цепь, которая показана на рис. 2.6. Значение сопротивления резистора  $R$  равно 50 Ом. Расчет провести для напряжения питания  $U_{\text{пит}}$  равного 5 В и для значения равного  $U_{\text{пит1}} = U_{\text{пит}}/2$ . ВАХ диода приведена на рис. 2.13. ВАХ, приведенная на рис. 2.13, соответствует характеристике представленной на рис. 1.7

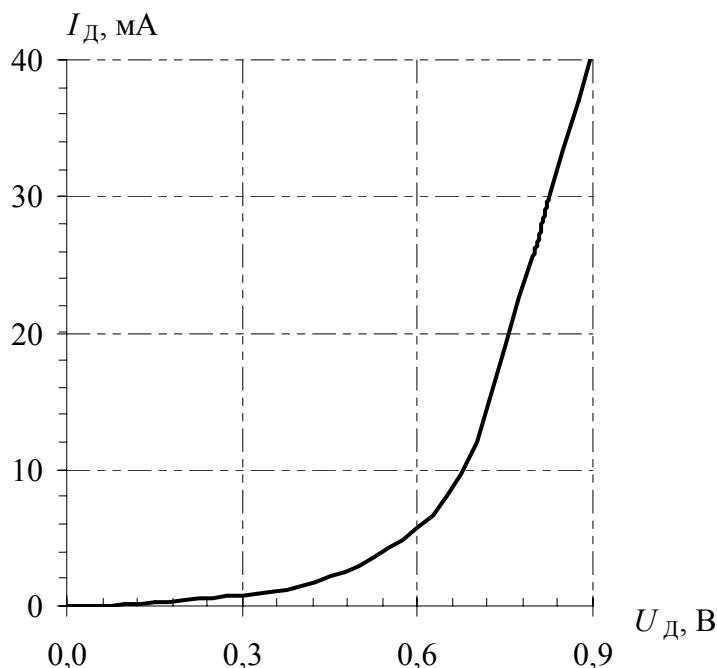


Рис. 2.13

Построим линию нагрузки по двум точкам, соответствующим режимам холостого хода и короткого замыкания на диоде, согласно (2.7) и (2.8). Напряжение холостого хода равняется

$$U = U_{\text{х.х.}} = U_{\text{пит}} = 5 \text{ В.} \quad (2.7)$$

Значение тока короткого замыкания будет равно

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\text{пит}}}{R} = \frac{5 \text{ В}}{150 \text{ Ом}} = 33,3 \text{ мА.}$$

Графики с ВАХ диода и нагрузочной характеристикой представлены на рис. 2.14. Координаты точки П пересечения нагрузочной прямой с ВАХ диода являются решением системы (2.1), (2.2.) и представляет собой рабочую точку схемы. Проекция этой точки на оси координат определяют рабочий режим цепи, т. е.

значение

тока

$I_D = I_\Pi$  и соответствующие ему падения напряжений на диоде  $U_D$  и  $U_R$ . В рассматриваемом примере получим  $I_D = I_\Pi = 28 \text{ мА}$ ,  $U_D = 0,8 \text{ В}$ ,  $U_R = 4,2 \text{ В}$ .

Рассмотрим случай, когда значение напряжения источника питания будет в 2 раза меньше исходного, т.е.  $U_{\text{пит}1} = U_{\text{пит}}/2 = 2,5 \text{ В}$ . Тогда новое значение тока короткого замыкания, необходимое для построения нагрузочной прямой, также будет в 2 раза меньше предыдущего значения, т.е.

$$I_{\text{к.з.1}} = \frac{U_{\text{пит}}}{2R} = \frac{5 \text{ В}}{2 \cdot 150 \text{ Ом}} = 16,67 \text{ мА}.$$

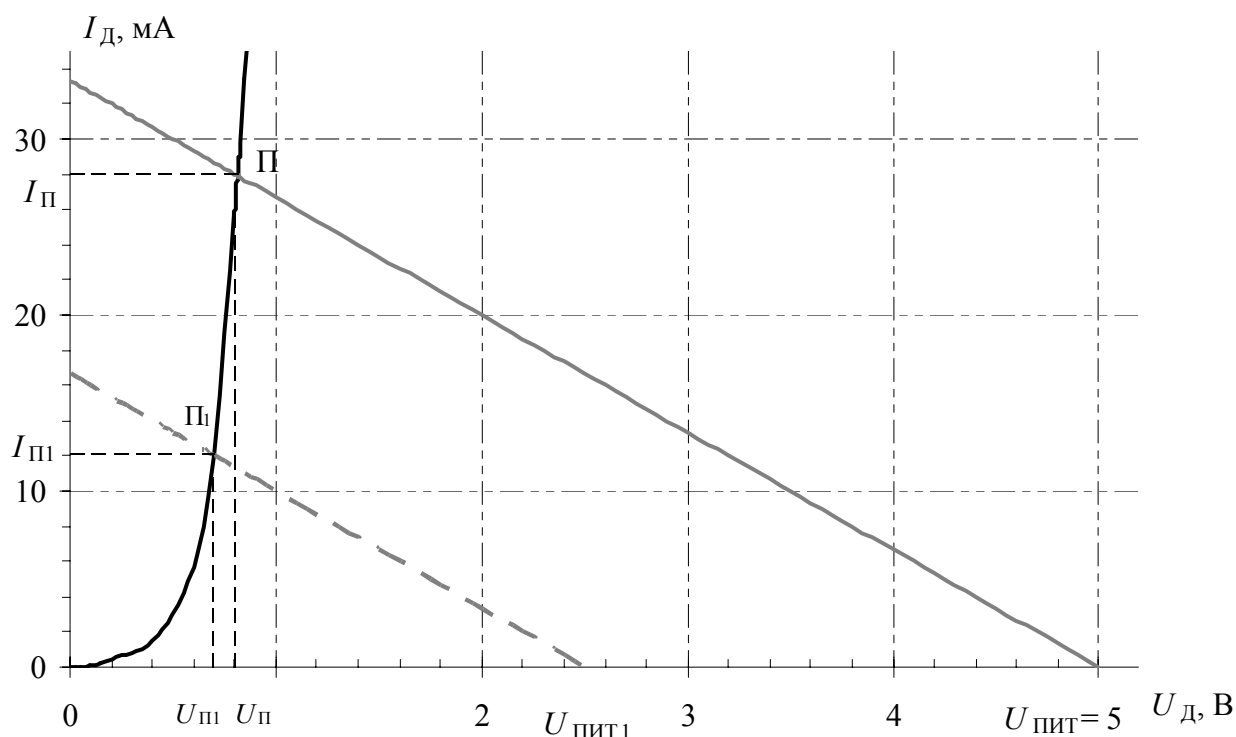


Рис. 2.14

Координаты точки пересечения  $\Pi_1$  новой нагрузочной прямой с ВАХ диода будут являться новым решением системы уравнений (2.1), (2.2). Полученные значения токов и напряжений будут равны:  $I_D = I_{\Pi 1} = 12 \text{ мА}$ ,  $U_D = 0,7 \text{ В}$ ,  $U_R = 4,3 \text{ В}$ . Как видно изменение значения напряжения питания  $U_{\text{пит}}$  при неизменном значении сопротивления резистора  $R$  приводит к параллельному смещению нагрузочной прямой.

## 4.2. Расчет аналитическим методом цепи, содержащей полупроводниковый диод

Проведем аналитический расчет цепи, содержащей полупроводниковый диод рассчитанной ранее графическим методом (рис. 2.14) прямого смещения диода зависимость аппроксимирующая ВАХ описывается выражением (2.9), а эквивалентная схема диода будет соответствовать рис. 2.9. Найдем по ВАХ диода значения порогового напряжения  $U_{\text{пор}}$  диода для прямой ветви, необходимое построение представлено на рис. 2.15. Значение порогового напряжения  $U_{\text{пор}}$  диода равно примерно 0,62 В.

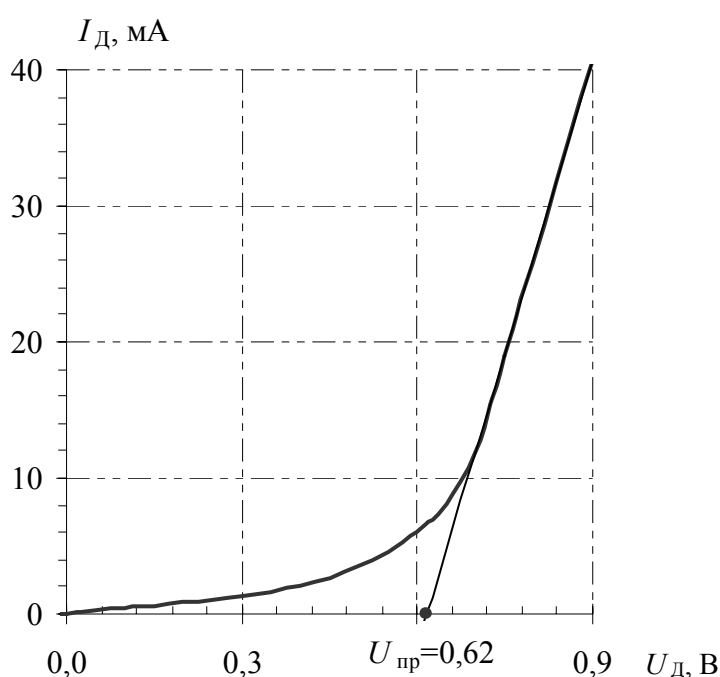


Рис. 2.15

Т.к. ВАХ, приведенная на рис. 2.13 (2.15), подобна характеристике представленной на рис. 1.7. Воспользуемся расчетами дифференциального сопротивления  $R_{\text{диф}}$  диода, выполненными в предыдущем практическом занятии (рис. 1.8). Найденное значение дифференциального сопротивления  $R_{\text{диф}}$  было примерно равно 7 Ом.

Исходную схему (рис. 2.6) для случая замены диода эквивалентной моделью можно привести к виду, представленному на рис. 2.9. Согласно выражению (2.15) для значения напряжения источника питания  $U_{\text{пит}}$  равного 5 В будет значение тока  $I$  в цепи равно



$$I_{\Pi} \approx \frac{5 - 0,62}{150 + 7} \approx \frac{4,38\text{В}}{157\text{Ом}} \approx 0,028\text{А} = 28\text{мА}.$$

Для значения напряжения источника питания  $U_{\text{пит}}$  равного 2,5 В будет значение тока  $I$  в цепи равно

$$I_{\Pi} \approx \frac{2,5 - 0,62}{150 + 7} \approx \frac{1,88\text{В}}{157\text{Ом}} \approx 0,012\text{А} = 12\text{мА}.$$

Полученные значения равны тем, которые были получены графическим методом решения.

#### 4.3. Расчет графическим методом рабочего режима схемы, содержащей стабилитрон

Пользуясь вольт-амперной характеристикой полупроводникового стабилитрона (рис. 1.6), графически определим рабочий режим стабилитрона ( $I_{\text{СТ Р}}$ ,  $U_{\text{СТ Р}}$ ), включенного последовательно с ограничительным резистором  $R_{\text{огр}} = 500\text{ Ом}$  к источнику питающего напряжения  $U_{\text{пит}} = 13\text{ В}$  при  $T = 20^\circ\text{C}$ .

Исследуемая схема будет иметь вид:

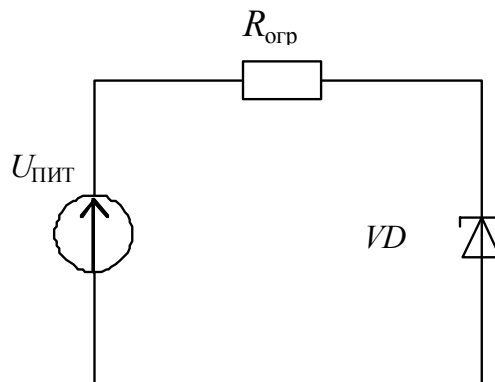


Рис. 2.16

Построим линию нагрузки для исследуемой схемы. Найдём её координаты.

Для режима холостого хода напряжение на стабилитроне будет равно  $U_{\text{СТ}} = U_{\text{пит}} = 13\text{ В}$ .

При коротком замыкании ток стабилитрона будет равен

$$I_{\text{СТ}} = I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{огр}}} = \frac{13\text{В}}{500\text{Ом}} = 26\text{мА}.$$

Графики ВАХ стабилитрона и нагрузочной характеристики для заданных значений напряжения питания и ограничительного резистора представлены на рис. 2.17. Координаты точки А

пересечения ВАХ стабилитрона с нагрузочной характеристикой определяют параметры искомого рабочего режима со значениями напряжения  $U_{СТР} = 8,2\text{ В}$  и тока  $I_{СТР} = 9,5\text{ мА}$ .

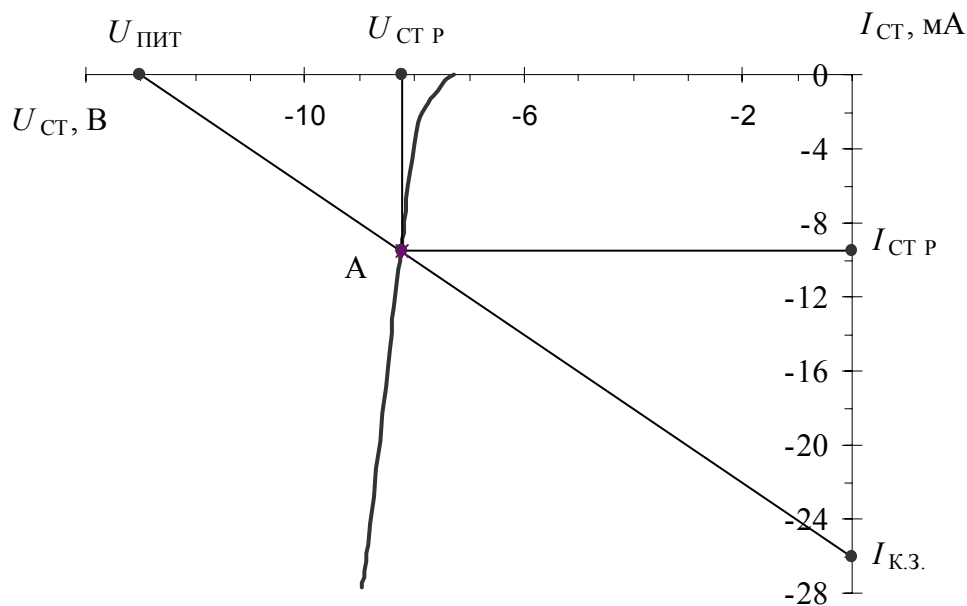


Рис. 2.17

#### 4.4. Расчета аналитическим методом рабочего режима схемы, содержащей стабилитрон

Проведем расчет цепи, рассмотренной в предыдущей задаче, аналитическим методом.

Рассчитаем значение дифференциального сопротивления. Для этого на ВАХ стабилитрона через рабочую точку  $A$ , найденную в предыдущей задаче, проведем касательную. Потом отметим на участке ВАХ, совпадающей с касательной, точку  $B$ . Указанное построение представлено на рис. 2.18.

Используя координаты точки  $A$  ( $U_{СТР} = 8,2\text{ В}$ ,  $I_{СТР} = 9,5\text{ мА}$ ) и точки  $B$  ( $U_{СТР2} = 8,5\text{ В}$ ,  $I_{СТР2} = 15,8\text{ мА}$ ) рассчитаем приращения для напряжения

$$\Delta U_{СТР} = U_{СТР2} - U_{СТР} = 8,5\text{ В} - 8,2\text{ В} = 0,3\text{ В}$$

и для тока

$$\Delta I_{СТР} = I_{СТР2} - I_{СТР} = 15,8\text{ мА} - 9,5\text{ мА} = 6,3\text{ мА}.$$

Соответствующее им значение дифференциального сопротивления будет равно

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_{\text{СТ}}}{\Delta I_{\text{СТ}}} \approx \frac{0,3 \text{ В}}{6,3 \text{ мА}} \approx 48 \text{ Ом}.$$

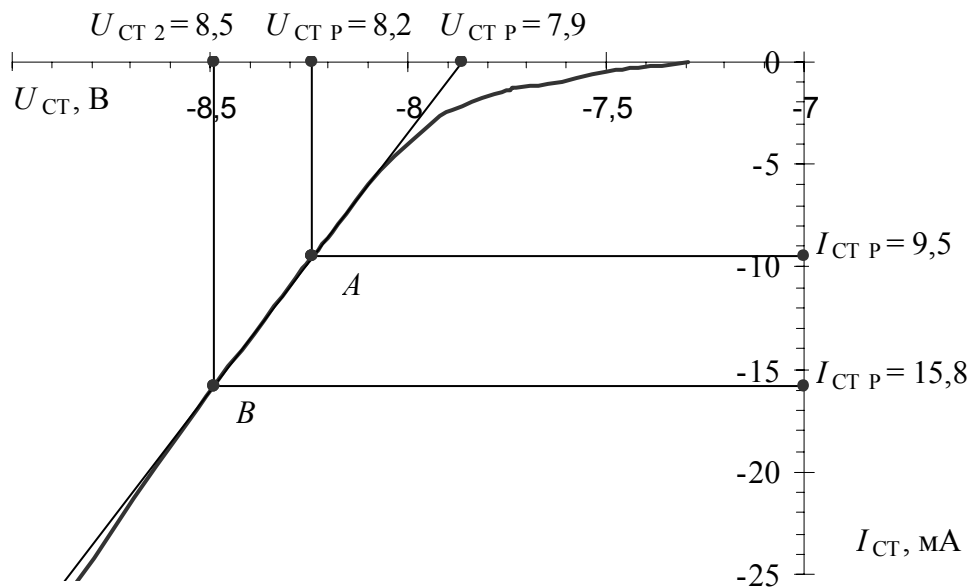


Рис. 2.18

Значение тока стабилитрона в соответствии с выражением (2.15) будет равно

$$I_{\text{СТ}} = \frac{U_{\text{ПИТ}} - U_{\text{СТ проб}}}{R_{\text{СТ}} + R_{\text{диф}}} \approx \frac{13 \text{ В} - 7,9 \text{ В}}{500 \text{ Ом} + 48 \text{ Ом}} \approx 9,3 \text{ мА}.$$

Расчетное значение напряжения на стабилитроне рассчитаем согласно формуле (2.13)

$$U_{\text{СТ}} = U_{\text{СТ проб}} + I_{\text{СТ}} R_{\text{диф}} \approx 7,9 \text{ В} + 9,3 \text{ мА} \cdot 48 \text{ Ом} \approx 8,3 \text{ В}.$$

Как видно из результатов расчета, полученные значения тока  $I_{\text{СТ}}$  и напряжения  $U_{\text{СТ}}$  стабилитрона приближенно равны соответствующим значениям, найденным графическим способом.

## **Задания для самостоятельной работы**

Задания выполняются по вариантам. Исходные данные для различных вариантов представлены в приложении на с.45.

### **Задание 1**

#### **Расчет и построение вольт–амперной характеристики идеального $p$ - $n$ -перехода**

Рассчитать и построить вольт–амперную характеристику идеального  $p$ - $n$ -перехода (полупроводникового диода)  $I(U)$  при заданном значении температуры  $T$  и значении теплового тока (обратного тока насыщения) перехода  $I_0$ :

1) Без учета сопротивления базовой области  $R_B$ .

2) С учетом сопротивления базовой области  $R_B$ .

Обе характеристики построить на одном графике.

### **Задание 2**

#### **Расчет графическим методом цепи, содержащей полупроводниковый диод**

Цепь состоит из последовательно соединенного диода  $VD$ , резистора  $R$  и источника напряжения питания  $U_{\text{пит}}$ , (рис. 2.6). Рассчитать ток  $I$  через цепь и напряжение на элементах цепи: на диоде  $U_D$ , на резисторе  $U_R$ . ВАХ диода взять из справочника.

### **Задание 3**

#### **Расчет параметров полупроводникового диода**

Рассчитать температурный коэффициент напряжения диода ТКН используя вольт-амперные характеристики  $I_D(U_D)$  при различных температурах  $T$ , используя справочные данные.

Для рассмотренного в предыдущем задании режима диода рассчитать дифференциальное сопротивление диода  $R_{\text{диф}}$  по ВАХ. Привести график ВАХ диода и выполнить построения необходимые для нахождения дифференциального сопротивления  $R_{\text{диф}}$ .

## **Задание 4**

### **Расчет параметров полупроводникового диода**

Для диода, рассмотренного в предыдущем задании, привести линеаризованные эквивалентные схемы, указать параметры этих схем. Для определения параметров эквивалентной схемы провести дополнительные построения (расчеты). На ВАХ диода необходимо изобразить проведенные построения, отметить участок, для которого выполняется условие линеаризации.

## **Задание 5**

### **Расчет аналитическим методом цепи, содержащей полупроводниковый диод**

Провести аналитический расчет для цепи, рассмотренной в предыдущем задании, используя кусочно-линейную аппроксимацию ВАХ диода  $I_{\bar{A}}(U_{\bar{A}})$ . Сравнить результаты со значениями, полученными графическим методом.

## **Задание 6**

### **Расчет графическим методом рабочего режима схемы, содержащей стабилитрон**

Для цепи содержащей стабилитрон  $VD$ , последовательно включенный с ограничительным резистором  $R_{огр}$  к источнику питающего напряжения  $U_{пит}$  (рис. 2.16), при заданной температуре  $T$  графическим методом определить рабочий режим стабилитрона ( $I_{СТР}$ ,  $U_{СТР}$ ). ВАХ стабилитрона  $VD$   $I_{\bar{N}0}(U_{\bar{N}0})$  взять из справочника.

## **Задание 7**

### **Расчет аналитическим методом цепи, содержащей стабилитрон**

Определить параметры  $R_{диф}$ ,  $R_{СТ}$ , ТКНС для рабочего режима стабилитрона, рассмотренного в предыдущей задаче.

Привести эквивалентную схему стабилитрона, полученную методом кусочно-линейной аппроксимации. Провести аналитический расчет рассмотренной цепи со стабилитроном. Представить проведенные расчеты и построения.

## Список литературы

1. А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев, В.В. Мокряков и др. Полупроводниковые приборы. Диоды высокочастотные, импульсные, оптоэлектронные приборы. Справочник – 2-е изд., стереотип. /Под ред. А.В. Голомедова. – М.: КУБК, 1994. – 592 с.
2. А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев и др. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник. 3-е изд., перераб. /Под ред. Н.Н. Горюнов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 744 с.
3. Бобровский Ю.Л., Корнилов С.А., Кратиров И.А. и др. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учебное пособие для вузов /Под ред. проф. Н.Д. Федорова. – М.: Радио и связь, 1998. – 560 с.
4. Валенко В.С. Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств /Под ред. А.А. Ровдо. – М.: Издательский дом «Додека-XXI», 2001. – 368 с.
5. Голомедов А.В. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: Справочник. – М.: КубК – а, 1996. – 592 с.
6. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника. – М.: Высшая школа, 2004. – 790 с.
7. Кудаяров Р.А. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Твердотельная электроника» по теме «Электрофизические свойства электронно-дырочного перехода и параметры полупроводниковых диодов». – Уфа: УГАТУ, 2004. – 4 с.
8. Жавриненко В.Ю. Справочник по полупроводниковым приборам. Изд. 8-е перераб. – Киев: «Техника», 1977. – 376 с.
9. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров И.А. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс): Учебник для вузов /Под ред. О.П. Глудкина – М.: Горячая Линия – Телеком, 1999. – 768 с.
10. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. 5-е изд., исправленное. – СПб.: Издательство «Лань», 2001. – 480 с.
11. Терехов В.А. Задачник по электронным приборам: Учебное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2003. – 280 с.
12. Федоров Н.Д., Федоров Д.Н. Толковый словарь по электронике. – М.: Радио и связь, 2001. – 240 с.

## Приложения

### Варианты исходных данных для самостоятельной работы

№ вар.	Расчет ВАХ идеального диода			Расчет параметров и схемы с диодом			Расчет схемы со стабилитроном			
	$T, ^\circ\text{C}$	$I_0, \text{мкА}$	$R_b$	Диод	$R$	$U_{\text{пит}}, \text{В}$	$T, ^\circ\text{C}$	$U_{\text{пит}}, \text{В}$	$R_{\text{огр}}, \text{Ом}$	Стаби- литрон
1	290	1	10	Д219А	100	3	20	11	500	Д808
2	300	2	15	Д220	100	4		12	500	Д814Д
3	310	3	20	Д312	100	5		13	500	Д810
4	320	4	25	Д313	125	3		11	550	Д811
5	330	5	30	Д206	125	4		12	550	Д813
6	290	6	35	Д219А	125	5		13	550	Д814А
7	300	7	10	Д220	150	3		11	600	Д814Б
8	310	8	15	Д312	150	4		12	600	Д814Г
9	320	9	20	Д313	150	5		12	500	Д809
10	330	10	25	Д206	200	3		12	550	Д814В
11	290	1	30	Д219А	200	4	-55	11	500	Д808
12	300	2	35	Д223	200	5		12	500	Д814Д
13	310	3	10	Д312	200	5		13	500	Д810
14	320	4	15	Д223А	250	6		11	550	Д811
15	330	5	20	ГД107	350	7		12	550	Д813
16	290	6	25	МД226	100	3		13	550	Д814А
17	300	7	30	2Д102А	100	4		11	600	Д814Б
18	310	8	35	2Д103А	100	5		12	600	Д814Г
19	320	9	10	2Д201	125	3		12	500	Д809
20	330	10	15	2Д104А	125	4		12	550	Д814В
21	290	1	20	МД226	125	5	110	11	500	Д808
22	300	2	25	Д223	150	3		12	500	Д814Д
23	310	3	30	2Д103А	150	4		13	500	Д810
24	320	4	35	2Д201	150	5		11	550	Д811
25	330	5	10	2Д104А	200	3		12	550	Д813
26	290	6	15	МД226	200	4		13	550	Д814А
27	300	7	20	2Д102А	200	5		11	600	Д814Б
28	310	8	25	2Д103А	200	5		12	600	Д814Г
29	320	9	30	2Д201	250	6		12	500	Д809
30	330	10	35	2Д104А	300	7		12	550	Д814В

## Основные электрофизические параметры германия, кремния и арсенида галлия (при температуре 300°K)

Название параметра, единица измерения	Значения параметра для		
	Германия	Кремния	Арсенида галлия
Число атомов в 1 см <sup>3</sup>	$4,42 \cdot 10^{22}$	$5,0 \cdot 10^{22}$	$4,42 \cdot 10^{22}$
Атомный вес	72,60	28,09	144,63
Плотность, г/см <sup>3</sup>	5,327	2,328	5,32
Относительная диэлектрическая проницаемость	16	11,9	13,1
Электрическая напряженность поля пробоя, В/см	$10^5$	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$
Ширина запрещенной зоны, эВ	0,66	1,12	1,424
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости, см <sup>-3</sup>	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$
Эффективная плотность состояний в валентной зоне, см <sup>-3</sup>	$6 \cdot 10^{18}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$7 \cdot 10^{17}$
Собственная концентрация носителей, см <sup>-3</sup>	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,45 \cdot 10^{10}$	$1,79 \cdot 10^6$
Собственное удельное сопротивление, Ом·см	47	$2,3 \cdot 10^5$	$10^8$
Температура плавления, °C	937	1415	1238
Подвижность, см <sup>2</sup> /(В·с): электронов дырок	3900 1900	1500 450	8500 400
Коэффициент диффузии, см <sup>2</sup> /с: электронов дырок	100 45	36 13	290 12
Дрейфовая скорость насыщения, см/с: электронов дырок	$6 \cdot 10^6$ $6 \cdot 10^6$	$10^7$ $8 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$ -



### Физические постоянные

Название	Значение, ед. изм.
Постоянная Больцмана	$k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К $8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К
Постоянная Планка	$h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Заряд электрона	$q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса электрона	$m_0=0,91 \cdot 10^{-30}$ кг
Масса протона	$M=1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Скорость света в вакууме	$c=3 \cdot 10^{10}$ см/с
Электрическая постоянная	$\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см
Магнитная постоянная	$\mu_0=1,36 \cdot 10^{-8}$ Гн/см
Электрон-вольт	$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
Температурный потенциал ( $T=300$ К)	$\varphi_T = kT/q = 0,026$ В
Длина волны фотона с энергией 1 эВ	$\lambda = 1,24$ мкм

Составитель: КУДАЯРОВ Рустем Ахкамутдинович

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Практикум по дисциплине «Твердотельная электроника»

Часть I

Подписано в печать \*\*.06.2008. Формат 60x84 1/16 .

Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 3,1. Усл.-кр.-отт. 3,1. Уч.-изд. л. 3,0

Тираж 150 экз. Заказ №

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет

Центр оперативной полиграфии УГАТУ

450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12