

Дисциплина: **ЭЛЕКТРОНИКА**



39/17

98177

Лектор: Погодин Дмитрий Вадимович
Кандидат технических наук,
доцент кафедры РИИТ
(кафедра Радиоэлектроники и
информационно-измерительной техники)

Объем учебной дисциплины (с указанием трудоемкости всех видов учебной работы).

Таблица 1. Объем дисциплины для очной формы обучения

Виды учебной работы	Общая трудоемкость		Семестр 4	
	в 3Е	в час	в 3Е	в час
Общая трудоемкость дисциплины	5	180	5	180
<i>Аудиторные занятия</i>	2,5	90	2,5	90
Лекции	1	36	1	36
Лабораторные работы	1	36	1	36
Практические занятия	0,5	18	0,5	18
<i>Самостоятельная работа студента</i>	2,5	90	2,5	90
Проработка учебного материала	1,5	54	1,5	54
Курсовой проект	-	-	-	-
Курсовая работа	-	-	-	-
Подготовка к промежуточной аттестации	1	36	1	36
Промежуточная аттестация:	экзамен			

Часть 1. Основные электронные приборы

Модуль 1.

Тема 1. Общие сведения об электронных приборах. P-n – переход и его свойства (1л)

Тема 2. Полупроводниковые диоды (2 л)

Тема 3. Биполярные транзисторы (3 л).

Модуль 2.

Тема 4. Полевые транзисторы (2 л)

Тема 5. Тиристоры. (1л)

Тема 6. Электровакуумные приборы (1л).

Тема 7. Интегральные микросхемы. Общие сведения. Элементы ИС (1 л).

Часть 2. Основы схемотехники

Тема 8. Основы аналоговой схемотехники.

Усилительные каскады на дискретных элементах. (1 л).

Модуль 3.

Особенности схемотехники аналоговых ИС. Узлы аналоговых ИС. (1л)

Аналоговые интегральные схемы (2л).

Тема 9. Основы цифровой схемотехники. (3л).

Ключи на биполярных и полевых транзисторах.(1л)

Узлы цифровых ИС. ЦИС.

Тема 10. Перспективы развития электроники. Функциональная электроника и наноэлектроника (1л).

Регламент дисциплины

- 1. Распределение баллов на дисциплину в семестре:** Учебный семестр подразделяется на 3 учебных модуля, каждый модуль заканчивается **текущей** аттестацией. Первый модуль: 1-6 неделя, второй: 7-12 неделя и третий 13-18. Итог по аттестациям в семестре - 62 балла. Учебный цикл заканчивается **итоговой** аттестацией – экзаменом (письменный ответ по билетам) - 38 балла.

Наименование контрольного мероприятия	Рейтинговые показатели				
	1-ая аттест.	2-ая аттест.	3-ая аттест.	Промеж. аттест.	Итоговая аттест.
Модуль 1. Тема 1, 2 и 3.	18			18	
Тест текущего контроля по разделу	10			10	
Защита лабораторных работ	4			4	
Выполнение индивидуальных задач по практике	4			4	
Модуль 2. Тема 4, 5, 6, 7 и 8		22		22	
Тест текущего контроля по разделу		10		10	
Защита лабораторных работ		6		5	
Выполнение индивидуальных задач по практике		6		6	
Модуль 3 Тема 9, 10. 11.			22	22	
Тест текущего контроля по разделу			10	10	
Защита лабораторных работ			6	6	
Выполнение индивидуальных задач по практике			6	6	
Промежуточная аттестация (экзамен):					38
– тест промежуточной аттестации по дисциплине					0
– в письменной форме по билетам					38

- 2 Бальная шкала.** В университете действует следующая шкала БРС оценки для дисциплины: 86 - 100 баллов – «отлично», 76 – 85 баллов – «хорошо», 51 – 75 баллов – «удовлетворительно».

ПРАВИЛА АТТЕСТАЦИИ СТУДЕНТОВ ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ В СООТВЕТСТВИИ С МОДУЛЬНО –БАЛЬНО- РЕЙТИНГОВОЙ СИСТЕМОЙ ОЦЕНОК

- **Учебный семестр подразделяется на 3 учебных модуля.**
Первого модуль: 1-6 неделя, второй:7-12 и третий 13-18 неделя.
Каждый модуль заканчивается промежуточной аттестацией которая включает:
 1. компьютерное тестирования - 10 баллов,
 2. своевременное и успешное выполнение и защиту лабораторных работ – $2 \cdot 8 = 16$ б,
 3. результаты расчета домашних заданий к практическим занятиям – $2 \cdot 8 = 16$ б.**Итого за семестр $-22+20+20=62$ баллов.**
Учебный цикл заканчивается итоговой аттестацией –экзаменом.
Форма экзамена – письменно-устная -38 б.
На экзамене 10 заданий: 2 – теоретических вопроса и 8 задач по темам курса.
Стоимость в баллах вопросов в билете на экзамене (зачете), устанавливается преподавателем индивидуально – в среднем по 3-4 балла.

Электроника

- **Бальная шкала.** В университете действует следующая шкала балльно-рейтинговой оценки

Рекомендуемая литература

- 1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: Учебник для вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 2004. - 790 с.
- 2. . Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. Учебное пособие для вузов . 2004 – 499с.
- 3. Погодин Д.В., Физические основы электроника: Учебное пособие по дисциплине «Электроника». Казань -в электронном виде.
- 4. Электроника: Бакалавр. Базовый курс./ Г. Г. Шишкин, А. Г. Шишкин. - М. : Юрайт, 2014. - 703с.

Лабораторные работы (4-ЧАСА)

- **Методические указания к лабораторным работам:**
- **1. Исследование полупроводниковых диодов.**
- **2. Исследование статических характеристик и параметров биполярных транзисторов.**
- **3. Исследование статических характеристик и параметров полевых транзисторов.**
- **4. Исследование элементов оптоэлектроники.**
- **5. Исследование усилительного каскада на биполярных транзисторах.**
- **6. Исследование устройств содержащих ОУ.**
- **7. Исследование транзисторного ключа.**
- **8. Цифровые интегральные схемы (Логические элементы)**
- **9. Итоговое занятие**

1. Учебное пособие для самоподготовки к тестированию по Электронике для 210400.62 Погодин Д.В., 2019 в электронном виде

Темы практических занятий.

- 1. Р-переход и его основные параметры. Расчет схем на полупроводниковых диодах. Выпрямители.**
- 2. Расчет схем на полупроводниковых диодах. Стабилитрон. Формирователи импульсов.**
- 3. Режим покоя транзистора, схемотехнические способы его обеспечения. Расчет h -параметры биполярного транзистора. Схемы замещения.**
- 4. Расчет схемы на биполярном транзисторе в режиме усиления малого сигнала и большого сигнала.**
- 5. Расчет схемы на полевом транзисторе. Режим усиления. Y -параметры. Схемы замещения.**
- 6. Расчет параметров элементов АИС. Составной транзистор. Диф каскад, Токовое зеркало. Каскад сдвига уровня.**
- 7. Расчет линейных схем содержащих ОУ. Компараторы напряжения.**
- 8. Расчет параметров транзисторного ключа.**
- 9. Расчет импульсных схем на логических элементах**

1. Общие сведения об электронных приборах (ЭП)



Электроника включает три аспекта:

1. изучает явления связанные с протеканием электрического тока в вакууме, газе, твердом теле или жидкости,
2. занимается разработкой и изготовлением электронных приборов,
3. занимается практическим использованием электронных приборов для создания различных электронных систем.

Основные задачи электроники:

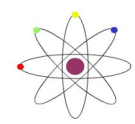
1. преобразование энергии (преобразование энергии света в электрическую энергию или преобразование переменного тока в постоянный) – силовая электроника;
2. преобразование информации (сигналов – (усиление, генерация, хранение, преобразование к удобному виду, и т. д.) – информационная электроника.

Все блоки и узлы радиоэлектронной аппаратуры состоят из элементов и компонентов - это **элементная база электроники. Она состоит из:**

Компонентов – это конструктивно законченные изделия. К ним относятся как дискретные радиоэлементы, а также интегральные микросхемы.

Элементов – это неделимая часть компоненты, которая выполняет роль какого либо радиоэлемента. Элементы могут быть пассивными (резисторы, конденсаторы) или активными. Активные элементы называют электронными приборами.

Элементы, использующие электронные явления, называются **электронными приборами**. В электронике электронные приборы называют активными элементами.



Классификация электронных приборов

По рабочей среде,

в которой протекает электрический ток:

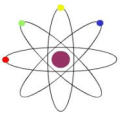
1. электровакуумные;
2. газонаполненные;
3. полупроводниковые или твердотельные
4. хемотронные - электролит.

В зависимости от назначения и выполняемых функций:

1. выпрямительные,
2. усилительные,
3. генераторные, переключательные, индикаторные и другие.

По характеру энергии на входе и выходе ЭП:

- **электропреобразовательные**, в них энергия источников постоянного тока преобразуется в энергию электрических колебаний той или иной формы и частоты;
- **фотоэлектрические** - в них, энергия электромагнитных волн оптического диапазона преобразуется в электрический ток;
- **электронно-световые приборы** - в них энергия электрического тока преобразуется в энергию оптического потока;
- **термоэлектрические** - в них тепловой сигнал преобразуется в электрический,
- **акустоэлектронные приборы** - в них происходит взаимодействие акустической и электрической энергии.

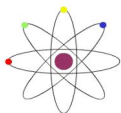


В зависимости от диапазона рабочих частот – низкочастотные (НЧ), среднечастотные (СЧ), высокочастотные (ВЧ), сверхвысокочастотные (СВЧ).

- **По мощности** создаваемой или потребляемой – малой, средней и большой мощности.
- **По технологии изготовления:** дискретные и ИС
- Первые ЭП были дискретными. Они состояли из простых элементов и выполняли простые функции. Успехи полупроводниково-вой технологии привели к созданию нового класса ЭП – интегральных микросхем (ИМС).

ИС – это микроэлектронное изделие, которое выполняет определенную (законченную) функцию преобразования и обработки сигналов и имеет высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов и кристаллов.

- **Таким образом, электроника включает в себя три равнозначных аспекта: физический, технологический и схемотехнический.**

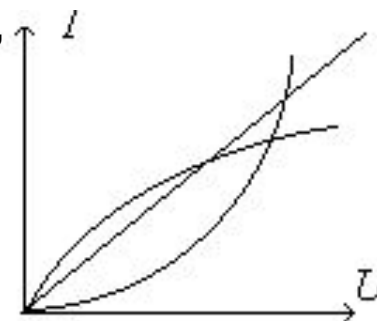
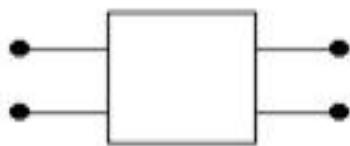
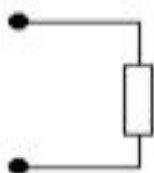


2.2 Характеристики, параметры, эквивалентные схемы ЭП

В общем случае ЭП служит для преобразования входного сигнала $x(t)$ (воздействия) в выходной сигнал $y(t) = F(x(t))$ (отклик).



В зависимости от числа выводов ЭП бывают: двухполюсниками, трехполюсниками, четырехполюсниками и многополюсниками.



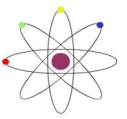
Для сравнения ЭП между собой, описания их свойств и особенностей ЭП характеризуют: 1. характеристиками; 2. параметрами, 3. эквивалентными схемами.

1. Характеристика ЭП.

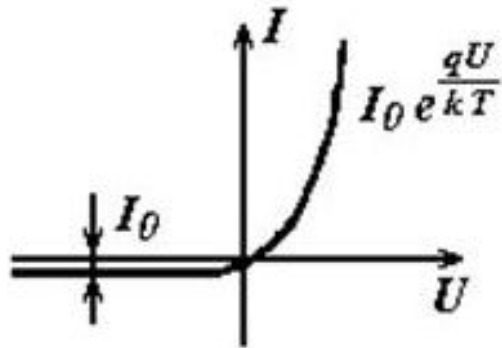
Характеристика это зависимость между напряжением и током на выводах ЭП. Обычно их называют вольт-амперная характеристика (ВАХ). Характеристика задается аналитически или графически. Для большинства ЭП она имеет нелинейный характер.

ВАХ отражает физические явления, которые протекают в электронном приборе, наглядно характеризует взаимосвязь токов и напряжений, и позволяет судить о возможностях прибора даже не зная его принципа работы.

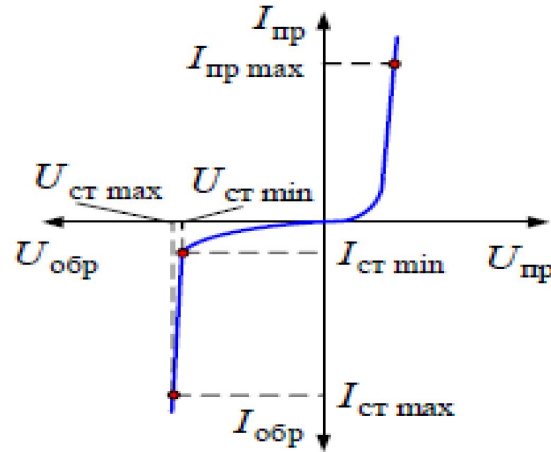
Примеры ВАХ электронных приборов



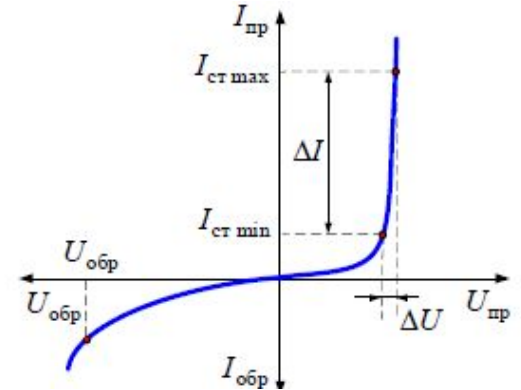
**Выпрямительный диод-
односторонняя
проводимость**



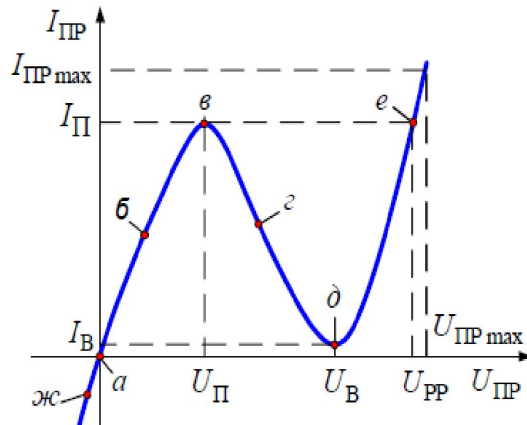
**Стабилитрон –
стабилизация напряжения**



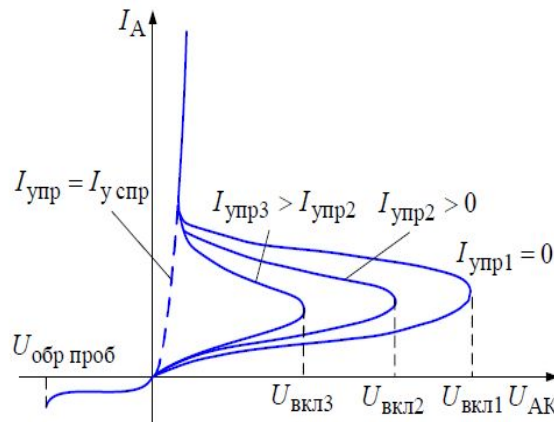
Стабистор



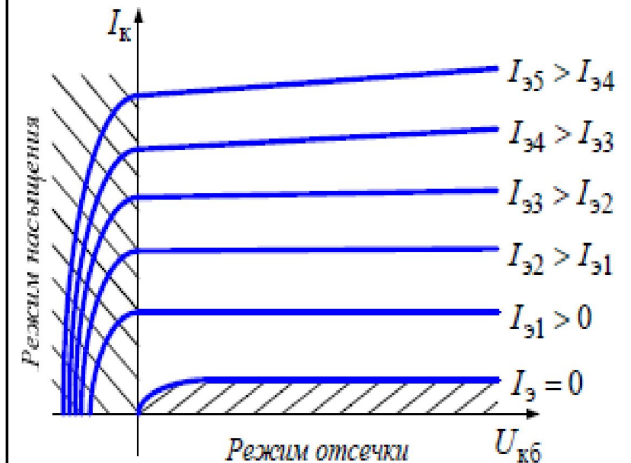
**Тунельный диод-
участок с отрицательным
сопротивлением**



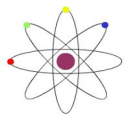
Тиристор



**Выходная ВАХ БТ –
стабилизация тока**



2 Параметры ЭП



2. Часто информация о ВАХ оказывается избыточной, и свойства ЭП оценивают с помощью параметров. Параметр характеризует поведение ВАХ в области рабочей точки.

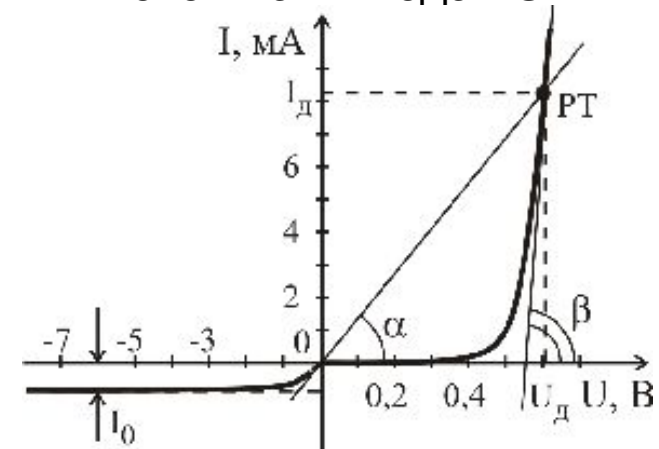
Рабочая точка ЭП это совокупность постоянных напряжений и токов на выводах ЭП.

Параметр элемента, определяется как отношение отклика к воздействию,

$$\text{Параметр} = \frac{\text{Отклик}}{\text{Воздействие}}$$

например $R = \frac{U}{I}$

где воздействие – электрическая величина, которая воздействует на элемент; отклик появляется в результате воздействия.



В зависимости от характера входного сигнала различают три вида параметров: **статические, дифференциальные и комплексные.**

1. статический параметр (статический сопротивление) –

это сопротивление постоянному току в заданной рабочей точке (U_0, I_0):

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0}$$

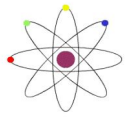
2. Дифференциальный параметр (диф. сопротивление)

– это сопротивление переменному току малой амплитуды в РТ (U_0, I_0):

$$R_{\text{диф}} = \frac{du}{dI} \approx \frac{\Delta u}{\Delta i}$$

3. Комплексный параметр - это отношение комплексной амплитуды отклика к комплексной амплитуде воздействия $Z(j\omega) = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m}$

3. Схемы замещения ЭП



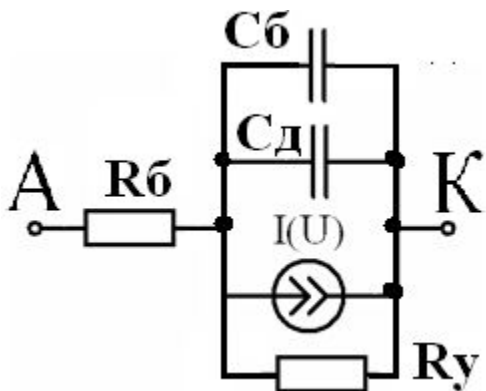
Свойства ЭП можно оценивать с помощью эквивалентных схем ЭП.

Вместо термина «эквивалентная схема» используется термин «схема замещения».

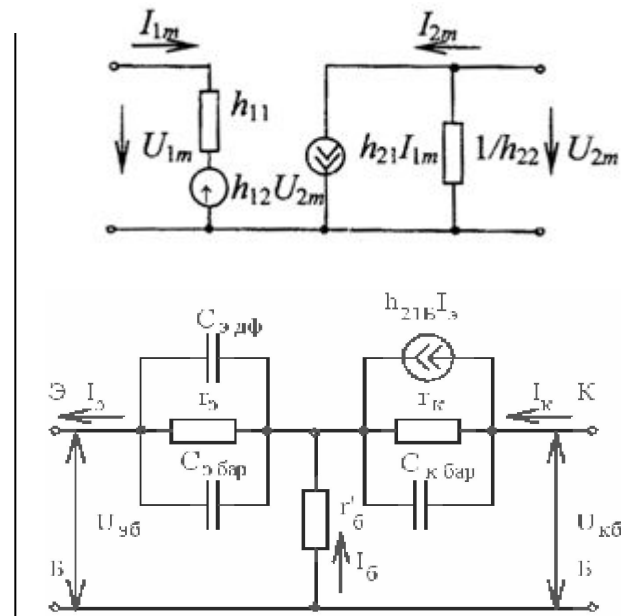
Эквивалентной принято называть схему, которую составляют из идеализированных элементов, реакция которой на входное воздействие одинакова (с определенной точности) с реакцией самого ЭП.

Можно выделить два подхода к построению эквивалентной схемы ЭП.

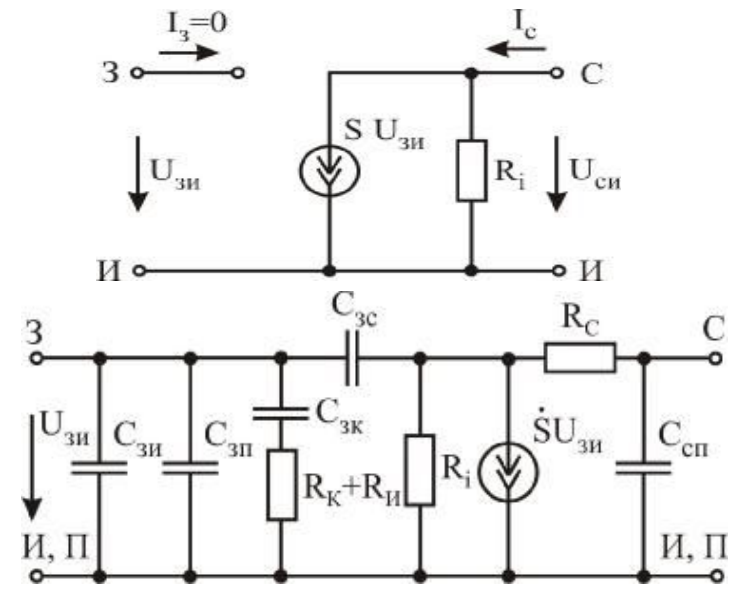
1. Формальная схема замещения.
2. Физическая схема замещения.



Диод



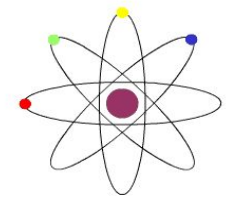
Биполярный транзистор



Полевой транзистор

Глава 1. Раздел 1. Полупроводниковые приборы (ПП)

Физические основы полупроводниковых приборов



1.1. Электропроводимость полупроводников

- **Электропроводность** – это свойство веществ проводить электрический ток.
- **Электрический ток** – это направленное движение свободных носителей заряда.
- **Количественно электропроводность характеризуется:**
- 1. удельным **электрическим** сопротивлением ρ (**Ом·см**); 2. электрической удельной проводимостью $\sigma = 1/\rho$; 3. концентрацией носителей заряда n

В зависимости от способности проводить электрический ток, все вещества делятся на три группы: проводники (металлы), полупроводники и диэлектрики.



• Важнейшим признаком полупроводников является сильная зависимость их электр. сопротивления, от температуры, степени освещенности, уровня ионизирующего излучения, количества примесей. В настоящее время для изготовления ПП в основном используются следующие полупроводники:

• **четырехвалентные** - германий (Ge), кремний (Si) и арсенид галлия (AsGa);

• **трехвалентные** - алюминий (Al), индий (In), бор (B);

• **пятивалентные** – фосфор (P), сурьма (Sb), мышьяк (As).

• Валентность вещества - это число электронов на внешней оболочке атома.

• Все полупроводники можно разбить на две группы:

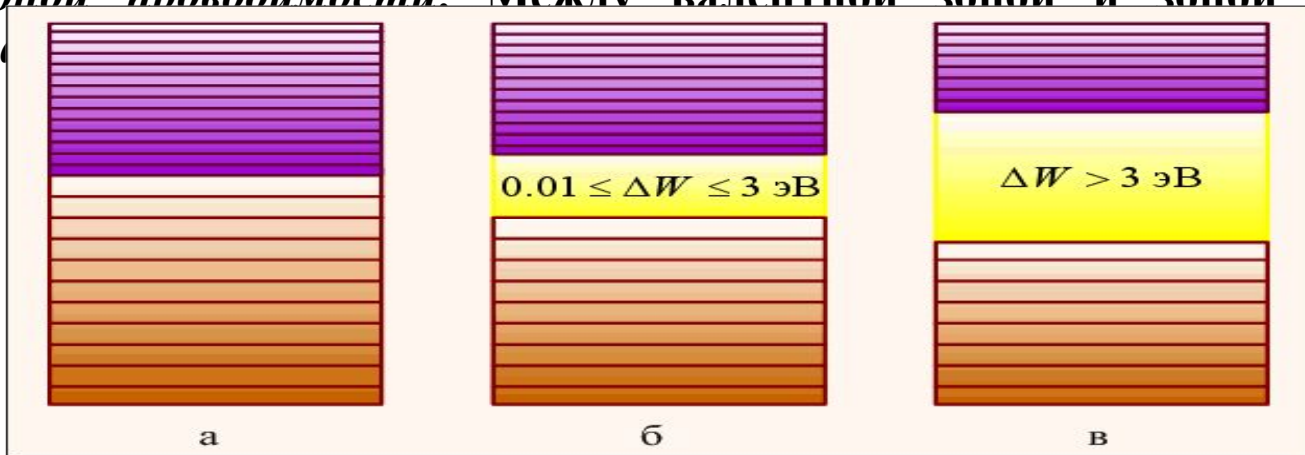
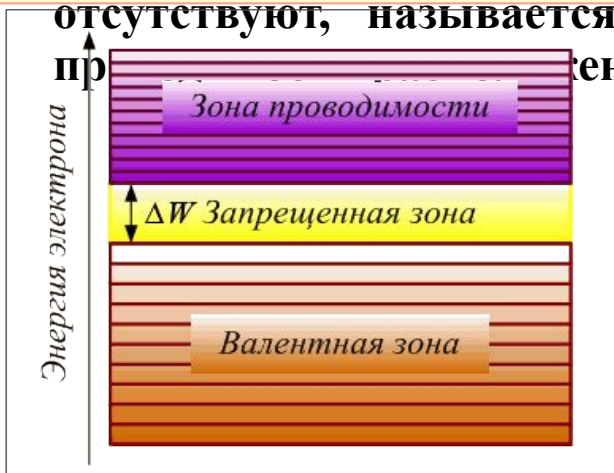
• **чистые или собственные, беспримесные или ПП i-типа** – они состоят из атомов одного сорта;

• **примесные или легированные** – в них часть атомов собственного ПП заменяется на атомы ПП



Энергетические уровни и зоны

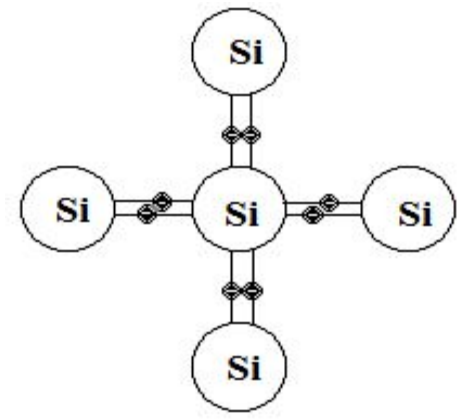
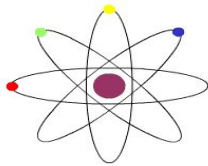
- Электропроводность веществ удобно объяснять зонной теорией.
- В соответствии с квантовой теорией энергия электрона, вращающегося по своей орбите вокруг ядра, не может принимать произвольных значений энергии..
- Согласно *принципу Паули* на одном энергетическом уровне не может находиться более двух электронов, причем спины этих электронов должны быть противоположны.
- В результате этого в твердых телах происходит расщепление энергетических уровней электронов, на большое количество почти сливающихся подуровней (рис. 1.3), образующих *энергетические зоны*.
- Разрешенная зона, в которой при температуре абсолютного нуля все энергетические зоны заняты электронами, называется *валентной*.
- Разрешенная зона, в которой при температуре абсолютного нуля электроны отсутствуют, называется *зоной проводимости*. Между валентной зоной и зоной



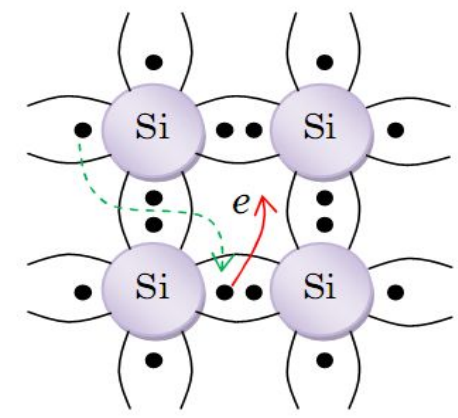
Расщепление энергетических уровней электронов в твердых телах

Зонные энергетические диаграммы различных твердых веществ: а – проводник; б – полупроводник; в – диэлектрик

1.1.2. Собственные полупроводники (*i* – типа)



Плоская модель кристаллической решётки собственного четырехвалентного полупроводника приведена на рис.2.1.



- Атомы собственного полупроводника располагаются в пространстве в строго определённом порядке, образуя кристаллическую решётку. Она возникает за счёт обобществления валентных электронов соседними атомами и называется **ковалентной**. Плоская модель кристаллической решётки собс. 4-х валентного полупроводника приведена на рис.1.
- В **собственных полупроводниках при $T=0^{\circ}\text{K}$** свободных носителей заряда нет. Все электроны участвуют в образовании ковалентной связи, и полупроводник – диэлектрик.
- С **повышением температуры** электроны приобретают дополнительную энергию, и некоторые из них покидают ковалентные связи, становясь свободными. При этом образуется два свободных носителя заряда: электрон и дырка (вакансия) - свободный положительный носитель заряда рис. 2..
- Процесс образования свободного электрона и дырки называется **генерацией свободной электронно-дырочной пары**.
- Свободные электроны, двигаясь по объёму полупроводника, теряют часть своей энергии и могут занимать место дырки электрон и дырка перестают существовать.

~~Процесс взаимного исчезновения электрона и дырки называется рекомбинацией.~~

В чистом беспримесном полупроводнике (их называют полупроводниками *i* – типа) всегда выполняется условие $n_i = p_i$, причем

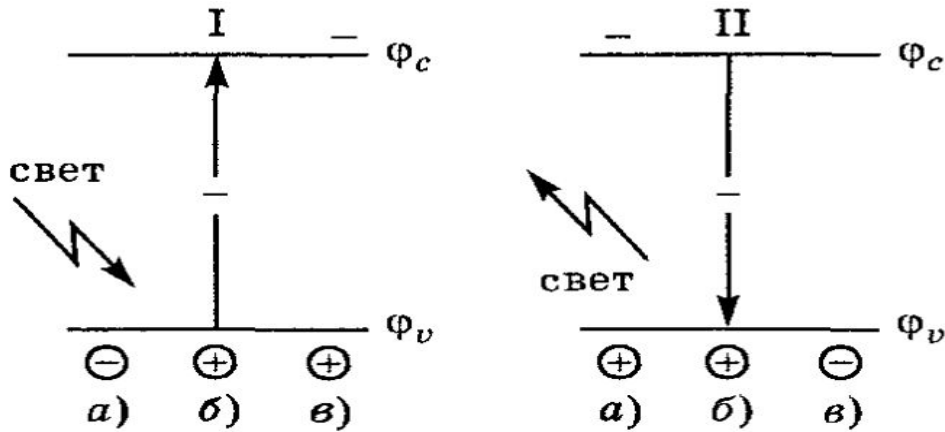
$$np = AT^3 e^{-\left(\frac{\Delta W}{kT}\right)}$$

где: n_i и p_i – соответственно концентрация электронов и дырок в полупроводнике;

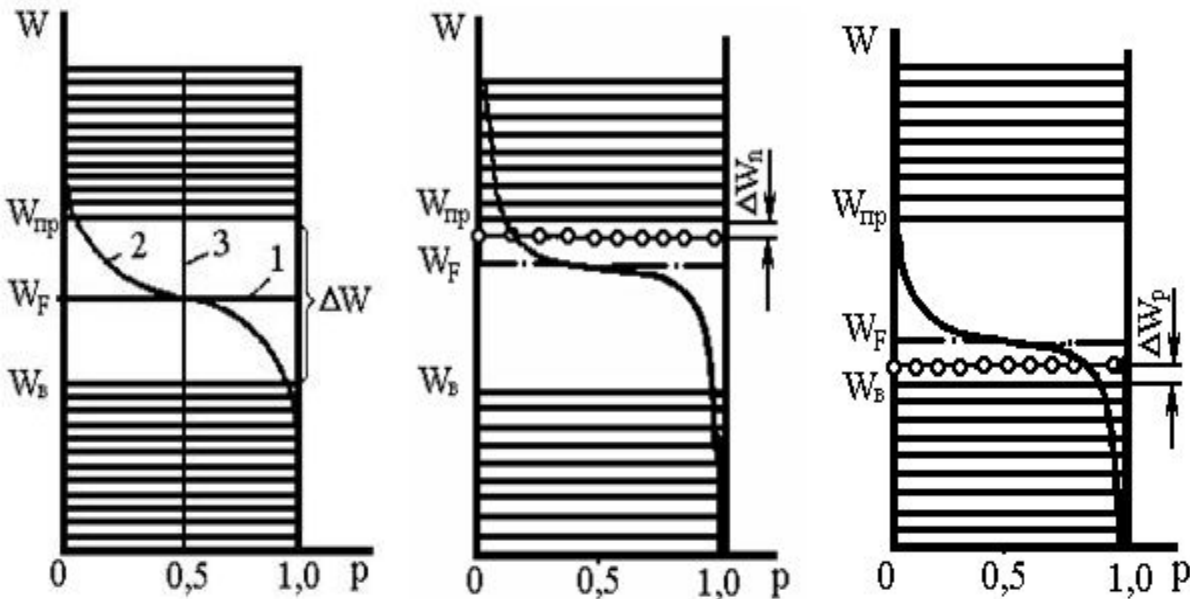
- A - постоянный коэффициент; T - температура по шкале Кельвина;
- ΔW - ширина запрещённой зоны (это энергия, которую должен приобрести электрон, чтобы разорвать ковалентную связь и стать свободным, она зависит от материала полупроводника). Она составляет 0,67 эВ для Ge, для Si - 1,12эВ, а для GaAs - 1,43эВ; k – постоянная Больцмана.

- Чистые полупроводники при создании полупроводниковых приборов практически не используются, так как их свойства сильно зависят от температуры и других внешних факторов

Рекомбинация и генерация носителей заряда



I – генерация, II – рекомбинация;
а. – начальное состояние;
б. – переход;
в. – конечное состояние



I а. – захват электрона, I б. отдача электрона,
II а. захват дырки, II б. отдача дырки.

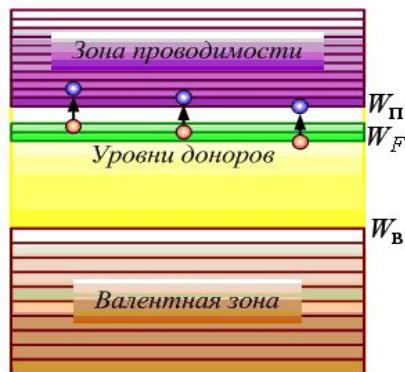
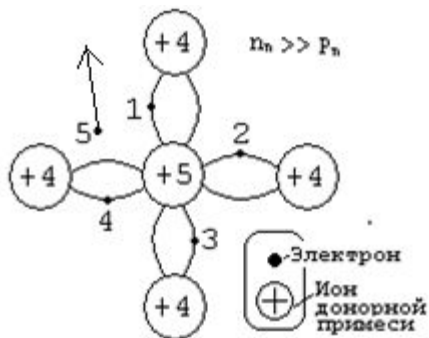
Рис. 2.3. Зонная модель и функция вероятности заполнения электронами энергетических уровней:

- а) в собственном полупроводнике;
 - б) в полупроводнике n-типа;
 - в) в полупроводнике p-типа
- Ширина запрещенной зоны для образования электронов в чистом полупроводнике - ΔW
 В полупроводнике n-типа - ΔW_n
 Дырок в полупроводнике p-типа - ΔW_p

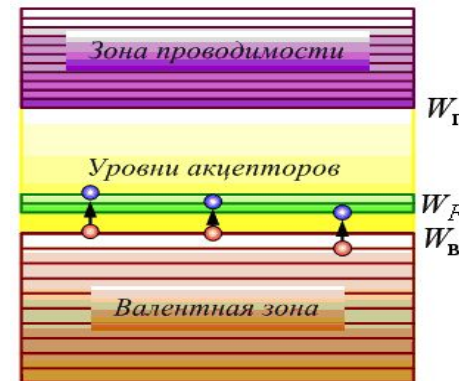
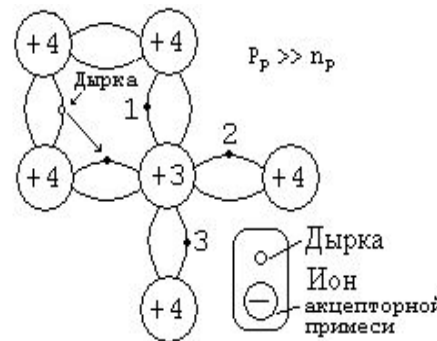
1.1.3. Примесные полупроводники



В зависимости от валентности введенной примеси получают два типа примесных полупроводников: *p* и *n*- типа.



$n_n = N_D + n_i \approx N_D \gg n_i$ основные
 $p_n = p_i$ и неосновные носители заряда



$p_p = N_A + p_i \approx N_A \gg p_i$ основные
 $n_p = n_i$ и неосновные носители заряда

1. Полупроводники n-типа получают путём введения в собственный 4-х валентный полупроводник, атомов 5-ти валентной примеси. Плоская модель кристаллической решётки полупроводника с донорной примесью (см. рис.).

Каждый атом примеси отдаёт электрон и создает свободный электрон и неподвижный положительно заряженный ион атома донорной примеси. Примесь, создающая свободные электроны, называется **донорной**.

В целом, примесный полупроводник электрически нейтральный.

• В полупроводнике *n*-типа **основными свободными** носителями заряда (их больше, чем дырок) являются электроны, с концентрацией n_n , а дырки - неосновными носителями (их много меньше) p_n .

здесь: N_D - концентрация атомов донорной примеси; n_i - концентрация электронов в собственном полупроводнике, они возникают за счет термогенерации; n_n - концентрация электронов в полупроводнике *n*-типа,

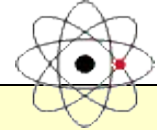
• Полупроводники *n*-типа называют электронными. Для них справедливо соотношение: $n_n p_n = n_i p_i = n_i^2$.

2. Полупроводники p-типа получают путем введения в собственный 4-х валентный атомов 3-х валентные примеси. Плоская модель кристаллической решётки полупроводника с акцепторной примесью (см. рис.).

Каждый атом примеси отбирает (присваивает) электрон близлежащего атома собственного полупроводника. В результате образуется свободная дырка и неподвижный отрицательно заряженный ион атома акцепторной примеси. Примесь создающая свободные дырки называется **акцепторной**.

В полупроводнике *p*-типа **основными свободными** носителями заряда являются дырки, их концентрация p_p , а электроны - неосновными носителями заряда, их концентрация n_p где: p_p - концентрация дырок в полупроводнике *p*-типа N_A - концентрация атом акцепторной примеси, p_i - концентрация дырок в собственном полупроводнике.

Полупроводники *p*-типа называют дырочными. Для них справедливо соотношение: $n_p p_p = n_i p_i = n_i^2$.



• В полупроводнике возможны два механизма движения зарядов (два - тока): дрейф и диффузия.

• 1. Дрейф- это движение носителей заряда под влиянием электрического поля.

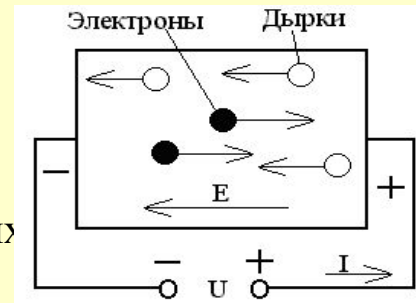
Если между двумя точками есть разность потенциалов ϕ , то градиент потенциала $E = d\phi/dx$ называется напряженностью поля. Электроны движутся от меньшего потенциала к большему, а дырки навстречу.

• Плотность полного дрейфового тока состоит из электронной и дырочной составляющих

$$I_{др} = I_{ндр} + I_{рдр} \quad I_{ндр} = q_e V_n, \quad q_e = -ne, \quad V_n = -\mu_n E \quad I_{рдр} = q_p V_p$$

где: $I_{др}$ - плотность полного дрейфового тока; $I_{ндр}$ и $I_{рдр}$ - электронная и дырочная составляющая; V_n, V_p - средняя скорость электронов и дырок; q_e, q_p - заряд электронов и дырок в единице объема полупроводника; n, p - концентрация электронов и дырок в полупроводнике; e и $-e$ - заряд дырки и электрона; μ_n, μ_p - подвижности электронов и дырок ($\mu = V/E$); E - напряжённость электрического поля. Отсюда ток равен:

где σ - удельная электропроводность полупроводника. Это выражение называют - закон Ома в дифференциальной форме.

$$I_{др} = \sigma E = e n \mu_n E + e p \mu_p E = (e n \mu_n + e p \mu_p) E = \sigma E$$


• 2. Диффузия - это движение носителей под действием градиента концентрации.

• Диффузия всегда происходит из области с большей в область с меньшей концентрации.

• Плотность тока диффузии дырок и электронов пропорциональна градиенту концентрации т.е. :

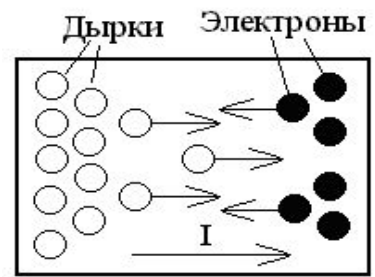
$$I_{диф} = I_{ндиф} + I_{рдиф}, \quad I_{ндиф} = -e D_n \left(-\frac{\Delta n}{\Delta x} \right) = e D_n \frac{dn}{dx}$$

где q - заряд электрона, D_p и D_n - коэффициенты диффузии электронов и дырок.

Подвижности и коэффициенты диффузии связаны соотношением Эйнштейна: $D_p = \phi_T \mu_p, D_n = \phi_T \mu_n$, где ϕ_T - температурный потенциал. Если электроны и дырки движутся в одну сторону, то это токи встречные, поэтому и появляется знак минус в одной из формул

• В общем случае могут присутствовать все четыре составляющих, тогда плотность полного тока равна векторной сумме:

$$I_n \cdot \mu_p + I_p \cdot \mu_p + I_n \cdot \mu_n + I_p \cdot \mu_n = 0 \quad (2.16)$$



Основные параметры процесса диффузии.

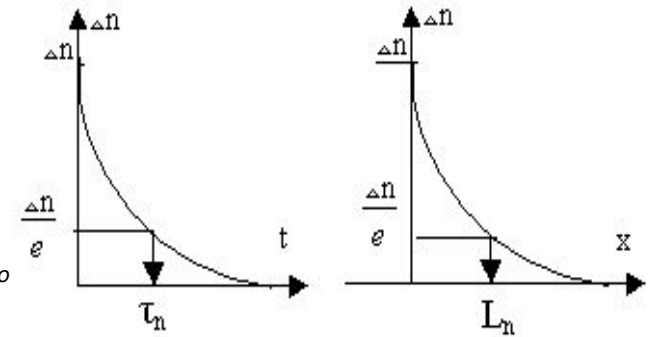
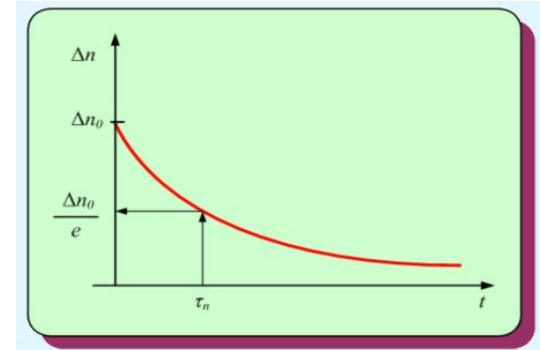
Диффузия характеризуется:

а) Временем жизни неравновесных (избыточных) носителей заряда τ_n .

Если, за счёт какого-либо внешнего воздействия, в одной из областей полупроводника создается неравновесная концентрация носителей заряда n , превышающая равновесную концентрацию n_0 , (разность $\Delta n = n - n_0$ называется избыточной концентрацией), то после отключения этого воздействия, за счет диффузии и рекомбинация, избыточный заряд будет убывать по закону $n(t) = n_0 + (n - n_0)e^{-t/\tau}$. Это приводит к выравниванию концентраций по всему объёму проводника. Время τ , в течение, которого избыточная концентрация Δn уменьшится в $e = 2,72$ раза (e - основание натуральных логарифмов), называется временем жизни неравновесных носителей.

б) Диффузионная длина – L_n .

Если в объёме полупроводника левее $x < 0$ создать и поддерживать избыточную концентрацию $\Delta n = n - n_0$, то за счет диффузии она начнет проникать в область $x > 0$, одновременно рекомбинируя, а следовательно убывая, по закону $n(x) = n_0 + \Delta n e^{-x/L_n}$. Расстояние, L_n на котором избыточная концентрация $\Delta n = n - n_0$ убывает от своего начального значения в e раз называется диффузионной длиной.

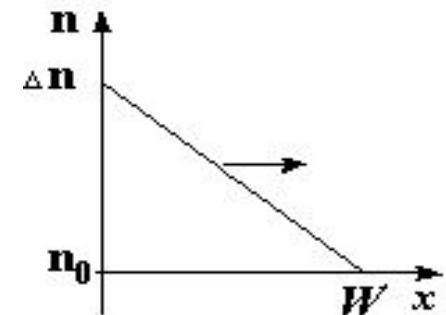


в) Диффузионная длина и время жизни неравновесных носителей заряда связаны соотношением

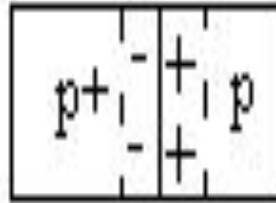
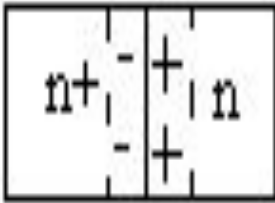
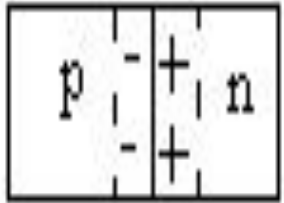
$$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2},$$

где D_n - коэффициент диффузии.

В полупроводниковых приборах размеры кристалла конечны, и на его границе ($x=W$) нерекombинировавшие носители удаляются. Тогда граничные условия имеют вид $n(x=0) = n_0 + \Delta n$, $n(x=W) = n_0$, где W — длина кристалла. Если $W \ll L_n$, то решение уравнения (2.7) записывается в виде



1.2. Электрические переходы



- **Электрический переход в полупроводнике** – это переходной (приграничный) слой между двумя областями полупроводника с различными физическими свойствами. Различают переходы:

- **1. Электронно-дырочный или p-n переход** - возникает на границе между двумя областями полупроводника с разным типом проводимости.
- **2. Электронно – электронный (n+-n) и дырочно – дырочный переходы (p+-p) переходы** - возникают между областями полупроводника с различной удельной проводимостью. Знаком + - обозначена область, где концентрация свободных носителей заряда выше.

3. Переход на границе металл-полупроводник. Если ($A_{p/n} < A_m$), то, такой переход обладает выпрямительными свойствами (односторонней проводимостью) и используется в диодах Шоттки.

Если $A_{p/n} > A_m$, то сопротивление перехода оказывается малым независимо от полярности напряжения на нем. Такой переход называется омический контакт, он используется для создания металлических контактов к областям полупроводника.

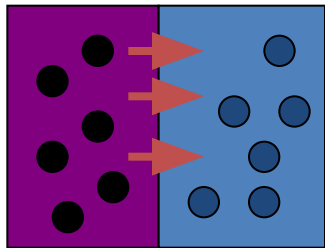
4. Гетеропереход - возникает между двумя полупроводниками, с различной шириной запрещенной зоны.

- **5. Переход на границе металл- диэлектрик- полупроводник (МДП).** Процессы, протекающие в системе МДП, связаны с эффектом электрического поля. (Эффект поля состоит в изменении концентрации носителей заряда, а следовательно и

Переход Шоттки -

переход на основе контакта металл-полупроводник.

М полупроводник р-типа

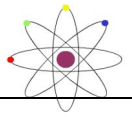


Свободные электроны из металла переходят в полупроводник, часть электронов рекомбинируют с дырками и в приграничном слое возникает эл. поле, препятствующее дальнейшему переходу электронов. Обедненный основными носителями (дырками) приконтактный слой полупроводника обладает *большим* сопротивлением.

Если к переходу приложить прямое напряжение (минус к металлу), то обедненный слой уменьшается и течет прямой ток (прямое напряжение в 3 раза меньше чем в обычном р-п переходе).

При обратном напряжении в цепи существует обратный ток (10^{-8} - 10^{-9} А), обусловленный неосновными носителями полупроводника (электронами).

Время восстановления высокого сопротивления перехода при смене полярности приложенного напряжения, значительно меньше чем в обычном р-п переходе (доли наносекунд). Переход М-П используется для создания быстродействующих и экономичных полупроводниковых приборов



Создание $p-n$ перехода

Основным элементом большинства полупроводниковых приборов, является электронно-дырочный переход ($p-n$ -переход).

Механическим контактом двух полупроводников с различным типом проводимости $p-n$ переход получить невозможно, так как:

- а) поверхности полупроводников покрыты слоем окислом, который является диэлектриком.
- б) всегда существует воздушный зазор, превышающий межатомное расстояние.

Наиболее распространены три способа получения $p-n$ перехода.

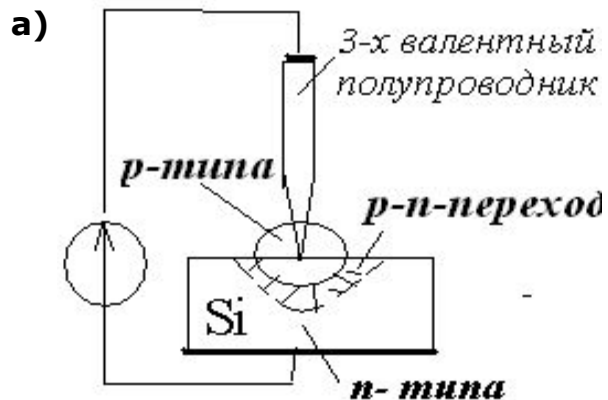
а) Метод сплавления –рис.1.

б) Диффузионный метод – рис.2.

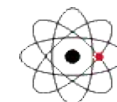
в) ионная имплантация.

Рассмотрим способ (б). Наиболее распространена планарная конструкция $p-n$ переходов, при которой $p-n$ переход создаётся путём диффузии на одну из сторон пластины полупроводника.

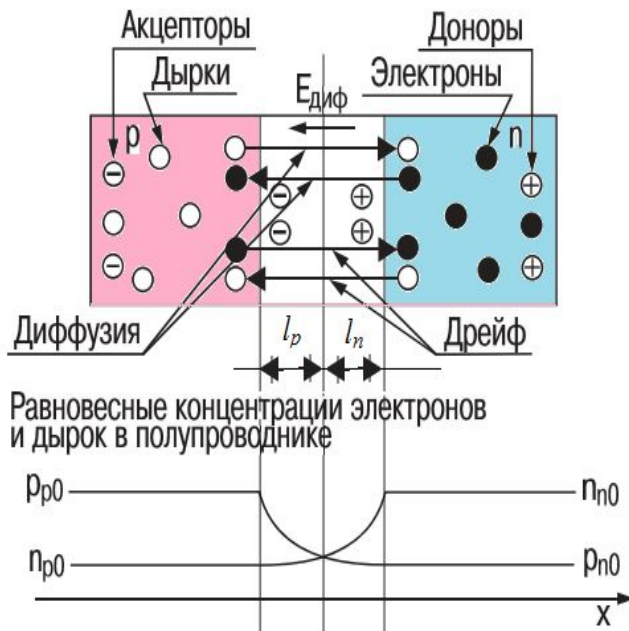
- 1.Тонкая пластина подвергается термообработке, в результате чего появляется слой диоксида кремния SiO_2 -изолятор.
- 2.Используя методы фотолитографии, удаляют определённые участки в слое SiO_2 , создавая окна и напыляя туда акцепторную примесь.
3. В результате диффузии атомов примеси в полупроводнике n -типа образуется p -область, а между ними возникает $p-n$ переход. а) б)



Образование и основные параметры p-n-перехода



P-n переход - это переходный слой, между двумя областями полупроводника с разным типом электропроводности, обеднённый свободными носителями заряда со своим, диффузионным, электрическим полем $E_{диф}$, которое возникает за счет контактной разности потенциалов φ_k , оно препятствует диффузии основных носителей заряда, и является ускоряющим для неосновных.



P-n-переход характеризуют двумя основными параметрами:

- 1. контактная разность потенциалов φ_k , ее называют высотой потенциального барьера. Это энергия, которой должен обладать свободный заряд, чтобы преодолеть потенциальный барьер:***

$$\varphi_k = \varphi_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$\varphi_T = kT/e$ - температурный потенциал.

При температуре $T=27^\circ\text{C}$ $\varphi_T=0.025\text{В}$,

а $\varphi_k=0,1 - 0,3 \text{ В}$ для Ge, $\varphi_k=0,6 - 0,8 \text{ В}$ для Si.

где N_A, N_D - концентрация акцепторной и донорной примеси; k - постоянная Больцмана; e - заряд электрона; T - температура; N_A и N_D - концентрации акцепторов и доноров в дырочной и электронной областях соответственно; p_p и p_n - концентрации дырок в p- и n-областях соответственно; n_i - собственная концентрация носителей заряда в нелегированном полупроводнике,

2. ширина p-n-перехода $l_{p-n} = l_p + l_n$:

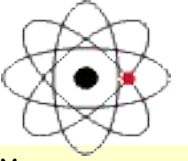
где ε - относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;
 ε_0 - диэлектрическая постоянная свободного пространства.

$$l_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon \varphi_k}{e} \frac{1}{N_A}} \quad l_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon \varphi_k}{e} \frac{1}{N_D}} \quad l_{p-n} = \sqrt{\frac{2\varepsilon \varphi_k}{e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$

Толщина электронно-дырочных переходов имеет порядок $l_{p-n}=(0,1-10)\mu\text{м}$,

она пропорциональна напряжению на p-n-переходе и обратно пропорциональна концентрации примесей в p и n областях.

Если, $l_p \approx l_n$ то и p-n переход называется симметричным, если $l_p \ll l_n$, то - несимметричным, причём он в основном располагается в области полупроводника с меньшей концентрацией примеси.



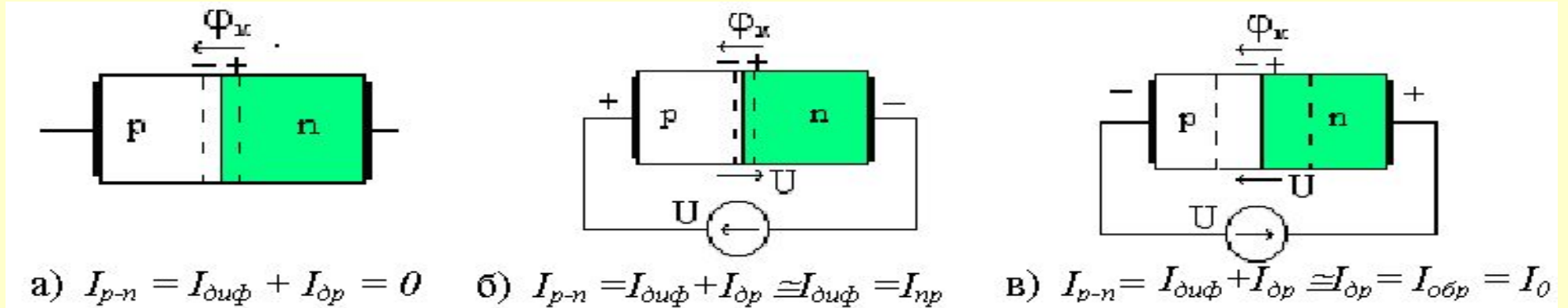
Режимы работы и токи p-n перехода

• Различают три режима работы p-n-перехода в зависимости от приложенных напряжений:

1). *P-n переход в равновесном состоянии*: $U_{p-n} = \varphi_{\kappa}$ (рис. а)

• Без внешнего напряжения на p и n областях через p-n-переход течет два тока: дрейфовый $I_{др}$ и диффузионный $I_{диф}$. Диффузионный ток создается основными носителями заряда, а дрейфовый ток – неосновными. В равновесном состоянии: $I_{p-n} = I_{диф} + I_{др} = 0$

• Это соотношение называют условием динамического равновесия процессов диффузии и дрейфа в изолированном (равновесном) p-n- переходе.



• 2) *P-n переход смещён в прямом направлении*: $U_{p-n} = \varphi_{\kappa} - U$, (рис. б). $I_{p-n} = I_{np}$

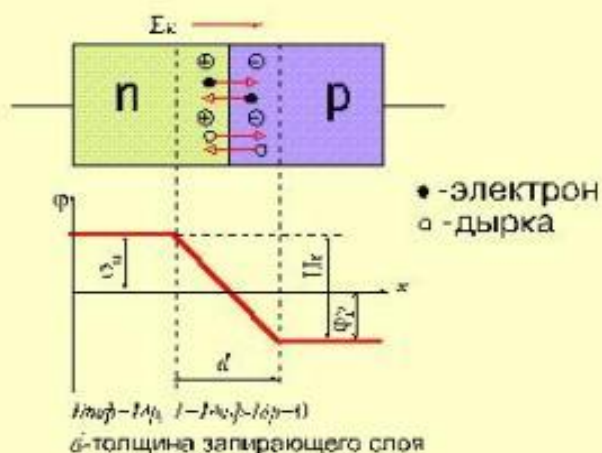
• **Инжекция** – процесс преобразования основных носителей заряда в неосновные при протекании прямого тока. Ширина p-n- переходе уменьшается: $l_{p-n} \sim (\varphi_{\kappa} - U)^{1/2}$.

• 3) *P-n переход смещён в обратном направлении*: $U_{p-n} = \varphi_{\kappa} + U$, (рис. в). $I_{p-n} = I_{обр}$

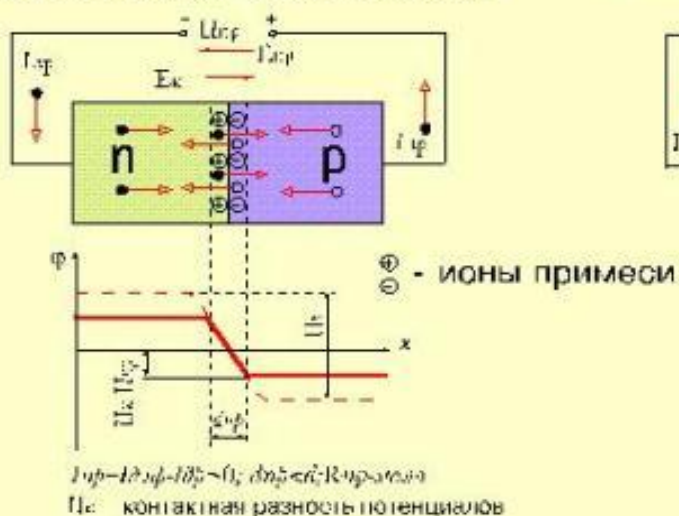
• **Экстракция** – процесс преобразования неосновных носителей заряда в основные при протекании обратного тока. Ширина p-n- переходе увеличивается: $l_{p-n} \sim (\varphi_{\kappa} + U)^{1/2}$.

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

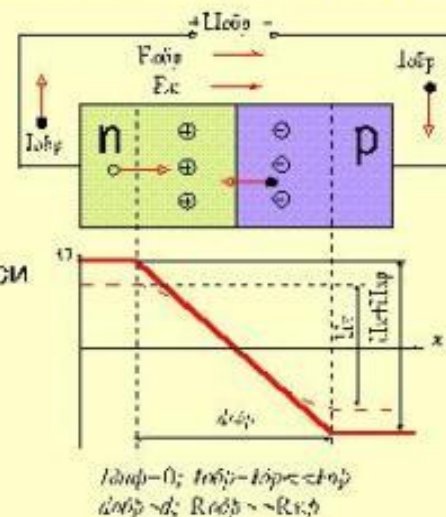
ПРИ ОТСУТСТВИИ ВНЕШНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ



ПРИ ПРЯМОМ НАПРЯЖЕНИИ

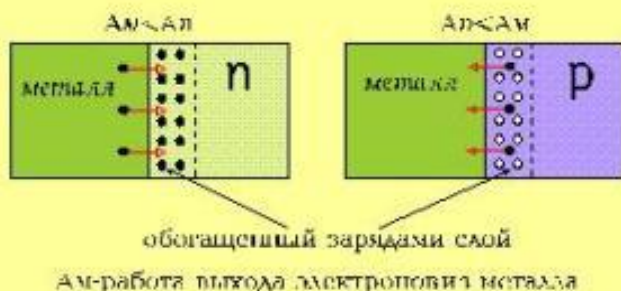


ПРИ ОБРАТНОМ НАПРЯЖЕНИИ

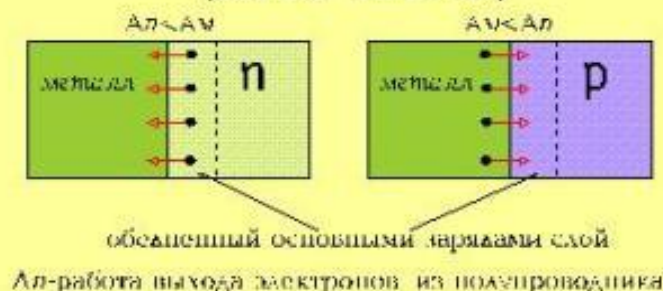


ПЕРЕХОД МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК

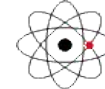
НЕВЫПРЯМЛЯЮЩИЙ КОНТАКТ



С ВЫПРЯМЛЯЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ (БАРЬЕР ШОТКИ)



Вольтамперная характеристика (ВАХ) p-n перехода



ВАХ p-n-перехода –

это зависимость тока перехода от приложенного к нему напряжения $i=f(u)$.

2. Для наглядности ВАХ представляют в виде графика (см.рис.)

а) прямая и обратная ветви -- в одном масштабе, (рис.справа). Из рисунка четко видно, что p-n переход обладает **односторонней проводимостью**, т. е. $I_{пр} \gg I_{обр}$ или $R_{пр} \ll R_{обр}$.

б) для определения особенностей прямой и обратной ветви ВАХ их строят в разных масштабах,.

Прямая ветвь ВАХ диода на основе кремния смещена вправо, а его обратная ветвь имеет ток много меньше, чем ток диода из германия.

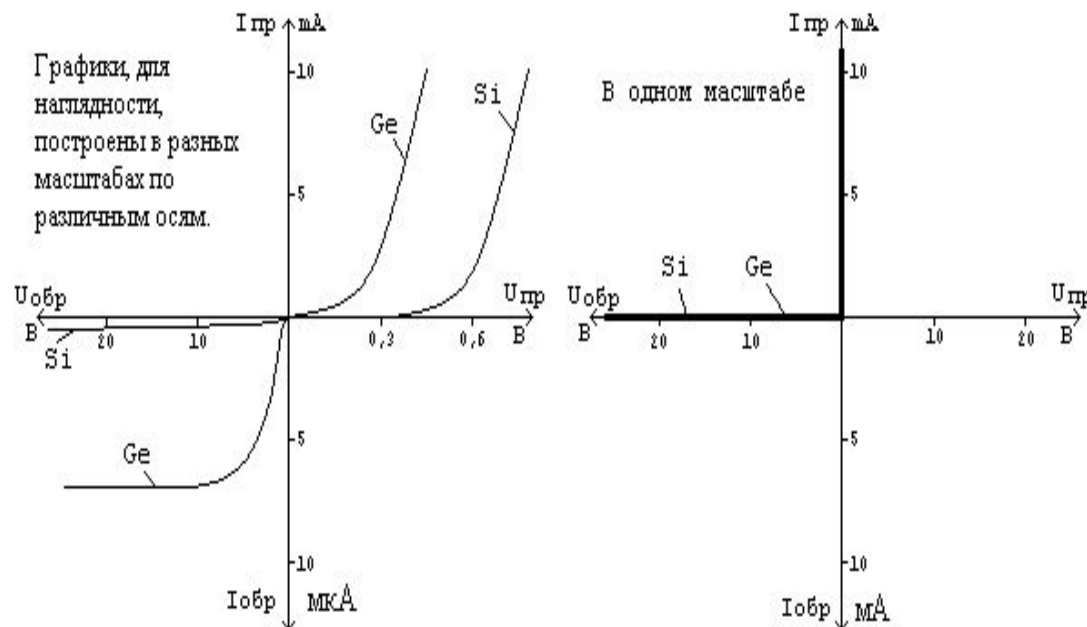
Дифференциальное сопротивление p-n перехода при прямом смещении определяется из соотношения

$$r_{диф} = \phi_T / (I + I_0).$$

Например, при $I=1\text{mA}$ и $\phi_T=25\text{mV}$ $r_{диф}=25\text{Om}$.

1. Аналитически, при прямом и обратном смещении ВАХ записывают в виде:

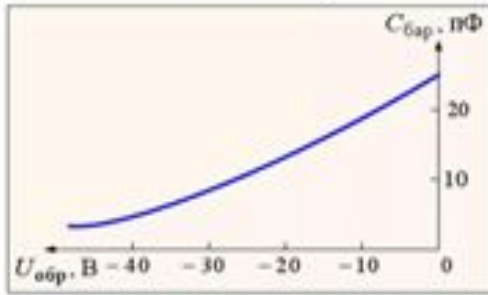
$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\phi_T}} - 1 \right) = \begin{cases} I_{пр} = I_0 e^{\frac{U}{\phi_T}} & \text{если } U > 0 - \text{ прямое смещение} \\ I_{обр} & \text{если } U < 0 - \text{ обратное смещение} \end{cases}$$



Условие односторонней проводимости:

$I_{пр} \gg I_{обр}$ или $R_{пр} \ll R_{обр}$

1.2.6. Ёмкости p-n - перехода



Зависимость барьерной ёмкости от обратного напряжения

Тот факт, что вблизи p-n-перехода имеются нескомпенсированные электрические заряд свидетельствует о том, что он обладает ёмкостью.

$$C_{p-n} = C_{диф} + \begin{cases} \text{обратное смещение} \\ \text{прямое смещение} \end{cases}$$

где - Cбар - барьерная и C_{диф} - диффузионная емкости.

а) При обратном смещении преобладает барьерная ёмкость $C_{бар} > C_{диф}$.

Она связана с зарядами неподвижных ионов примеси. Величина этой ёмкости зависит от величины напряжения U на p-n переходе, от площади перехода П, а также от концентрации примесей.

где -C₀ ёмкость, при 0- обратное напряжение. Она зависит от типа p-n перехода (v=1/2 – для резкого, v=1/3 – для плавного перехода), ε — диэлектрическая проницаемость

полупроводникового материала; П — площадь p-n-перехода.

Модельным аналогом барьерной ёмкости может служить ёмкость плоского конденсатора, обкладками которого являются p- и n-области, а диэлектриком служит p-n-переход, практически не имеющий подвижных зарядов.

$$C_{(U)} = C_0 \left(\frac{\Phi_k}{\Phi_k + U} \right)^v$$

$$C_0 = \Pi \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon N_D}{2(\Phi_k)}}$$

$$C_{бар} < 200 \text{ pF}$$

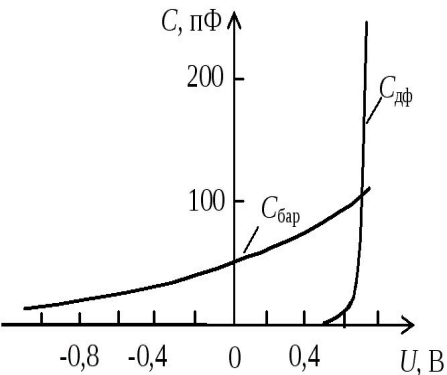


Рис. 4.9. Вольтфарадные характеристики p-n перехода

б) Диффузионная ёмкость, преобладает ($C_{диф} \gg C_{бар}$) при прямом смещении p-n-перехода. Она связана с накоплением неосновных носителей

зарядов вблизи p-n-перехода при протекании прямого диффузионного тока (тока инжекции)

$$C_{диф} = \frac{e I_{пр} \tau_p}{kT} \left(1 - e^{-\frac{t_U}{\tau_p}} \right)$$

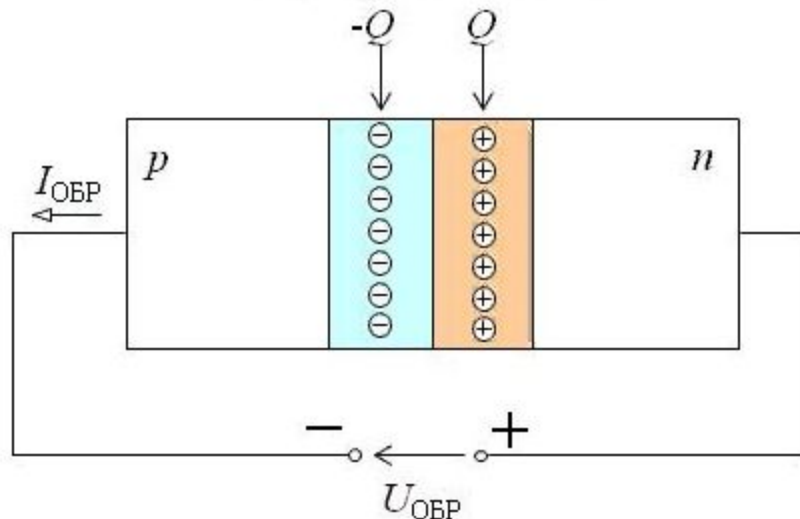
Где: τ_p =- время жизни неосновных носителей заряда, t- время, в течение которого протекает прямой ток I_{пр}. Значения диффузионной ёмкости могут иметь порядок от сотен до тысяч пикофарад.

В целом если сравнивать диффузионную и барьерную ёмкости $C_{диф} \gg C_{бар}$.

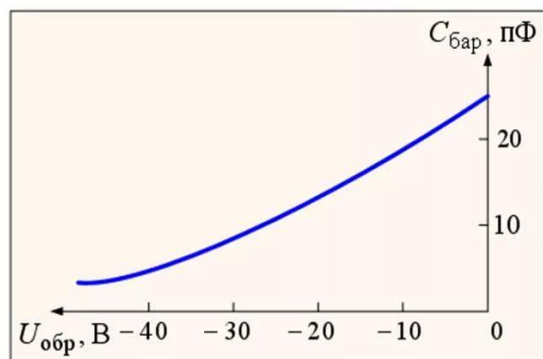
На практика используется барьерная ёмкость, т.к. диффузионная ёмкость обладает малой добротностью, поскольку параллельно этой ёмкости включён p-n переход, смещённый в прямом направлении с малым прямым сопротивлением

Механизмы создания барьерной и диффузионной емкости

Барьерная ёмкость



$$C_{бар} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{\delta}$$



Зависимость барьерной емкости от обратного напряжения

Диффузионная ёмкость

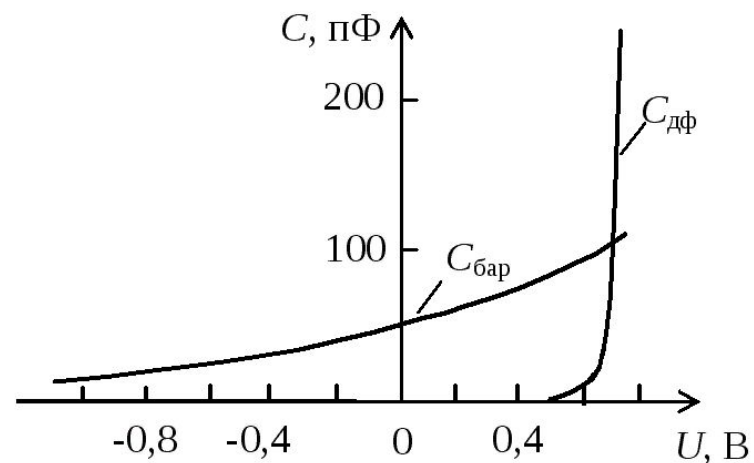
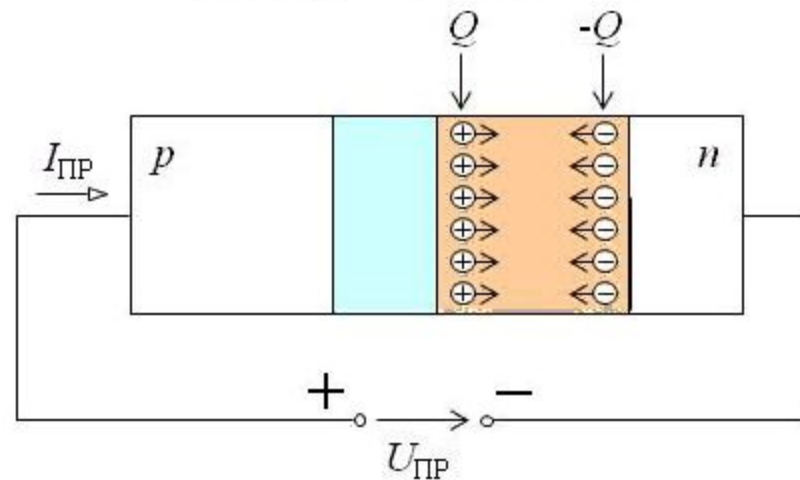


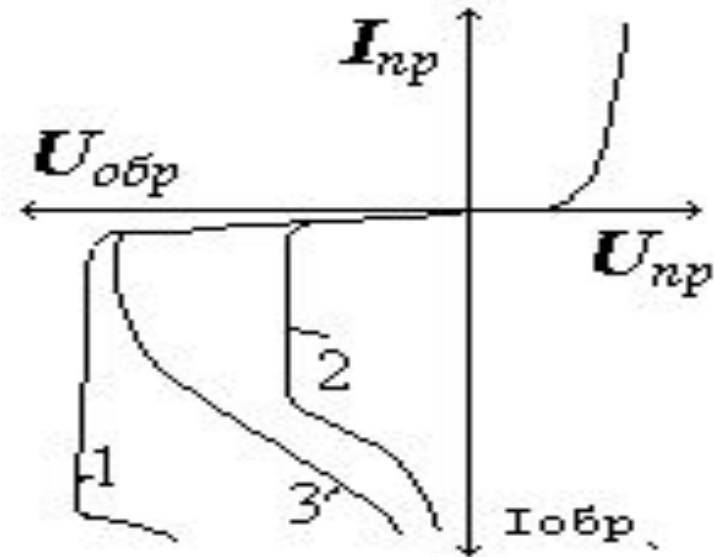
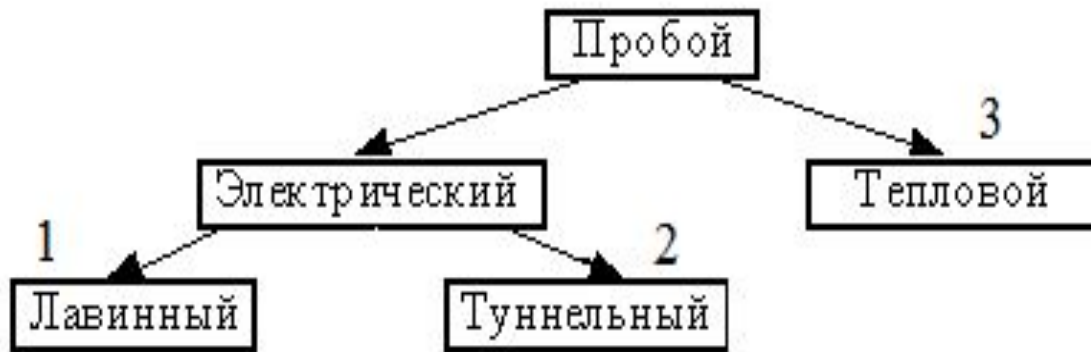
Рис. 4.9. Вольтфарадные характеристики p-n перехода



Пробой p-n- перехода



- Пробоем p-n-перехода называют резкое возрастание тока при обратном смещении p-n перехода, а напряжение при котором это происходит – напряжением пробоя.



1. Электрический пробой – обратимый, т.е. он не приводит к разрушению p-n-перехода, при снижении обратного напряжения p-n-переход восстанавливает свои свойства. Различают два вида: лавинным – кривая 1 или туннельным – кривая 2.

Лавинный пробой – возникает за счет лавинного размножения неосновных носителей заряда возникающих при ударной ионизации, в широких p-n - переходах.

Туннельный пробой – возникает за счет перехода электронов из связанного состояния в свободное без сообщения им дополнительной энергии, в узких p-n - переходах..

2. Тепловой пробой – необратимый. Он приводит к разрушению p-n-перехода (кривая 3) вследствие лавинного нарастания неосновных носителей и, следовательно, обратного тока при плохом отводе тепла от перехода.

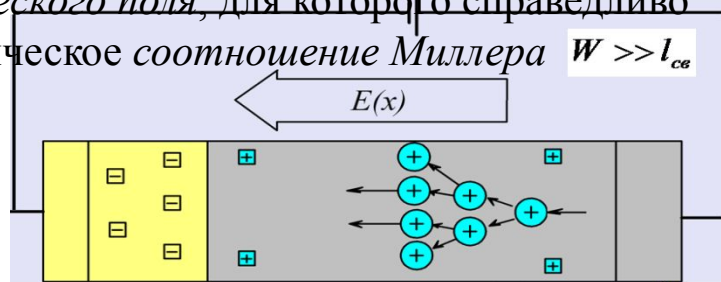
Механизмы лавинного, туннельного и теплового пробоя

1. Лавинный пробой. При высоком обратном напряжении электроны приобретают большую скорость и, сталкиваясь с атомами кристаллической решетки, выбивают из них новые электроны, которые также разгоняются электрическим полем и также выбивают из атома электроны.

С повышением $U_{обр}$ данный процесс усиливается.

Коэффициент лавинного умножения M , определяемый как количество актов лавинного умножения в области сильного электрического поля, для которого справедливо следующее эмпирическое соотношение Миллера $W \gg l_{cs}$

$$M = \frac{J}{J_0} \approx \left[1 - \left(\frac{V_{см}}{V_{проб}} \right)^n \right]^{-1}$$



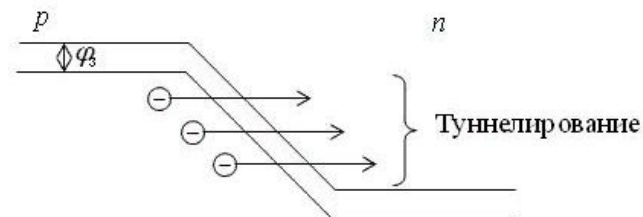
Напряжение лавинного пробоя составляет десятки ÷ сотни вольт

3. . Механизм теплового пробоя:

$$t_{pn}^{\circ} \uparrow \Rightarrow I_{обр} \uparrow = P \uparrow = I_{обр} \uparrow \cdot U_{обр} \Rightarrow t_{pn}^{\circ} \uparrow \Rightarrow \text{перегрев}$$

2. Туннельный пробой объясняется явлением *туннельного эффекта*, который заключается в переходе электронов через потенциальный барьер с уровнем энергии меньше высоты потенциального барьера, при этом электроны своей энергии не теряют.

Туннельный пробой



Напряжение туннельного пробоя – не более единиц вольт.

Условные графические обозначения в схемах

<p>Резистор постоянный</p>	<p>Резистор постоянный</p>	<p>Резистор переменный</p>	<p>Резистор переменный двоянный</p>
<p>Резистор подстроечный</p>	<p>Резисторы нелинейные: терморезистор и варистор</p>	<p>Конденсатор постоянной емкости</p>	<p>Конденсаторы оксидные полярный и неполярный</p>
<p>Конденсатор подстроечный</p>	<p>Конденсатор переменной емкости (КПЕ)</p>	<p>Катушка индуктивности, дроссель (L3 – с отводами)</p>	<p>Катушка, дроссель с магнитопроводом (L7 – с медным)</p>
<p>Трансформатор с тремя обмотками и электростатическим экраном</p>	<p>Диод, диодный мост</p>	<p>Стабилитрон (VD8 – двуханодный)</p>	<p>Диод Шоттки (VD9), ограничительный (VD10), варикап (VD11)</p>
<p>Династор (VS1), триностор (VS2, VS3), симистор (VS4)</p>	<p>Транзистор p-n-p</p>	<p>Транзистор n-p-n</p>	<p>Транзистор однопереходный</p>

<p>Транзистор полевой с p-каналом</p>	<p>Транзистор полевой с изолированным затвором и p-каналом</p>	<p>Транзистор полевой с двумя изолированными затворами и n-каналом</p>	<p>Фоторезистор</p>
<p>Фото- и светодиод</p>	<p>Фототранзистор</p>	<p>Оптрон резисторный</p>	<p>Оптрон диодный</p>
<p>Оптрон тиристорный</p>	<p>Оптрон транзисторный</p>	<p>Усилитель операционный</p>	<p>Элементы логические</p>
<p>Элементы логические</p>	<p>D-триггер</p>	<p>Штырь и гнездо разъёмного соединителя (XW1-XW4 – коаксиального)</p>	<p>Вилка и розетка разъёмного соединителя</p>
<p>Контакты разборного и неразборного соединений</p>	<p>Ответвления линий электрической связи</p>	<p>Элемент гальванический, аккумуляторный, батарея элементов</p>	<p>Соединение с общим проводом (корпусом), заземление</p>