

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

**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 нанoeлектроника (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.
<b>Модуль 1. Тема 1, 2 и 3.</b>	<b>18</b>			<b>18</b>	
Тест текущего контроля по разделу	10			10	
Защита лабораторных работ	4			4	
Выполнение индивидуальных задач по практике	4			4	
<b>Модуль 2. Тема 4, 5, 6, 7 и 8</b>		<b>22</b>		<b>22</b>	
Тест текущего контроля по разделу		10		10	
Защита лабораторных работ		6		5	
Выполнение индивидуальных задач по практике		6		6	
<b>Модуль 3 Тема 9, 10. 11.</b>			<b>22</b>	<b>22</b>	
Тест текущего контроля по разделу			10	10	
Защита лабораторных работ			6	6	
Выполнение индивидуальных задач по практике			6	6	
<b>Промежуточная аттестация (экзамен):</b>					<b>38</b>
– 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:

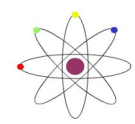
1. преобразование энергии (преобразование энергии света в электрическую энергию или преобразование переменного тока в постоянный) – силовая электроника;
2. преобразование информации (сигналов – (усиление, генерация, хранение, преобразование к удобному виду, и т. д.) – информационная электроника.

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:

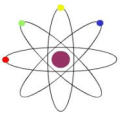
1. электровакуумные;
2. газонаполненные;
3. полупроводниковые или твердотельные
4. хемотронные - электролит.

## 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.

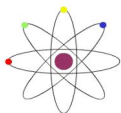


**В зависимости от диапазона рабочих частот** – низкочастотные (НЧ), среднечастотные (СЧ), высокочастотные (ВЧ), сверхвысокочастотные (СВЧ).

- **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.**

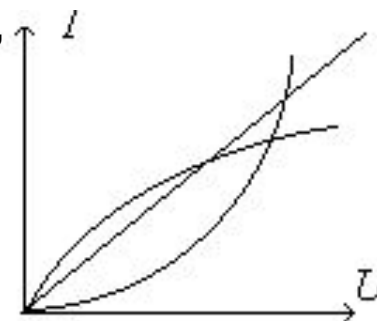
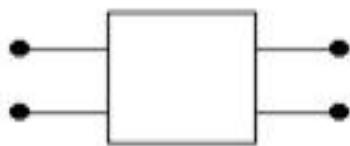
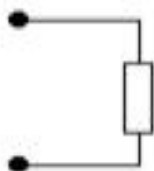


## 2.2 Характеристики, параметры, эквивалентные схемы ЭП

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.



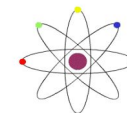
Для сравнения ЭП между собой, описания их свойств и особенностей ЭП характеризуют: 1. характеристиками; 2. параметрами, 3. эквивалентными схемами.

### 1. Характеристика ЭП.

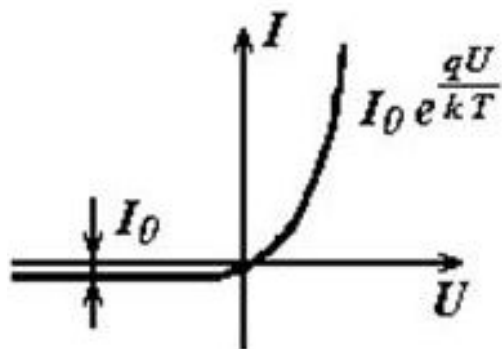
Характеристика это зависимость между напряжением и током на выводах ЭП. Обычно их называют вольт-амперная характеристика (ВАХ). Характеристика задается аналитически или графически. Для большинства ЭП она имеет нелинейный характер.

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.

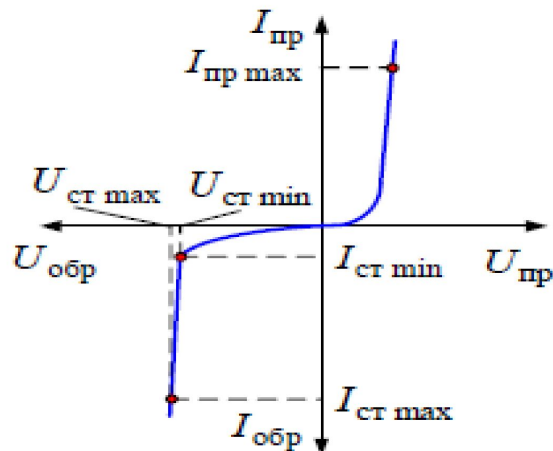
# Примеры ВАХ электронных приборов



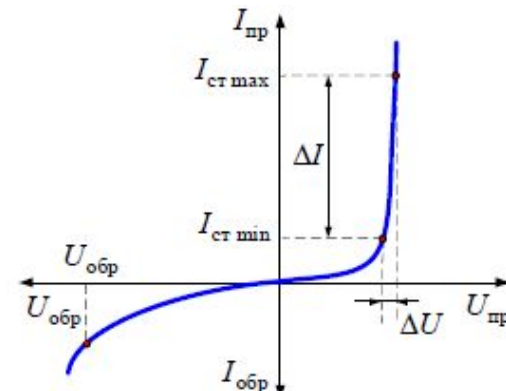
**Выпрямительный диод-  
односторонняя  
проводимость**



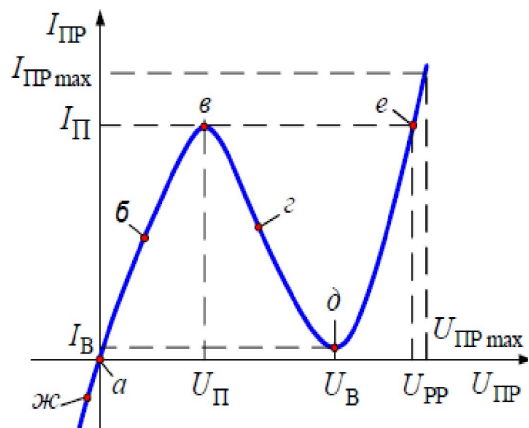
**Стабилитрон –  
стабилизация напряжения**



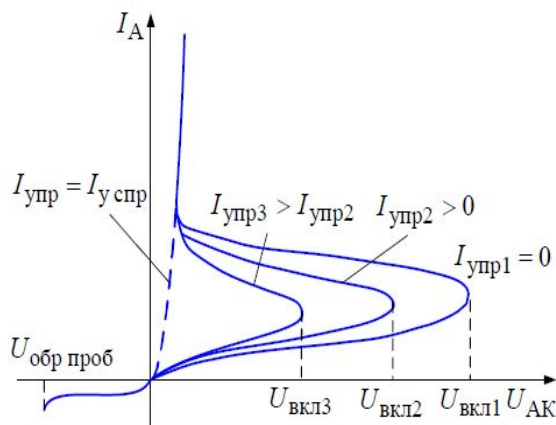
**Стабистор**



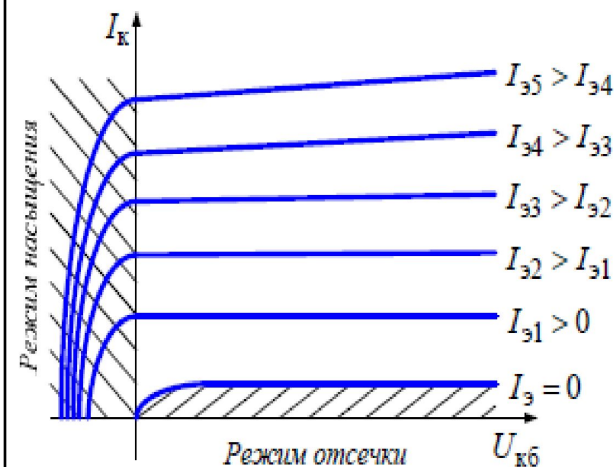
**Тунельный диод-  
участок с отрицательным  
сопротивлением**



**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.

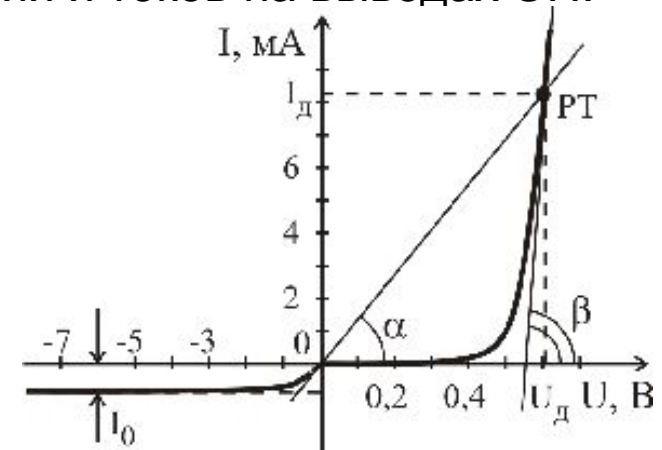
**Рабочая точка ЭП** это совокупность постоянных напряжений и токов на выводах ЭП.

**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 ( $U_0, I_0$ ):

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

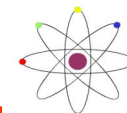
2. **Дифференциальный параметр** (диф. сопротивление)

– 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



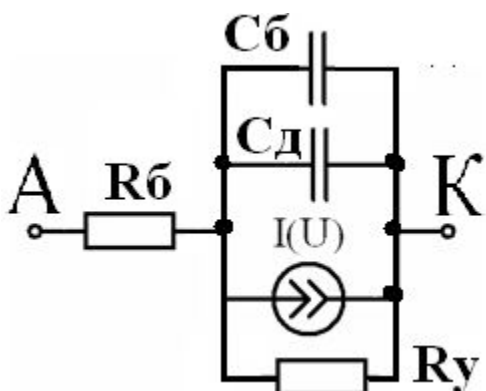
Свойства ЭП можно оценивать с помощью эквивалентных схем ЭП.

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

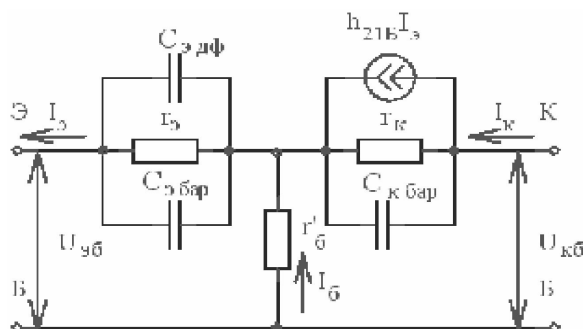
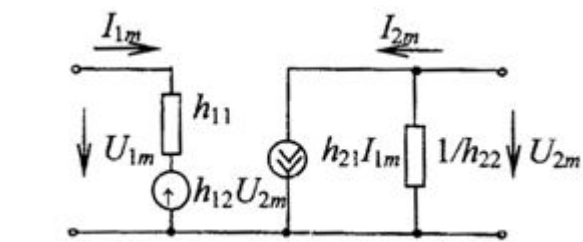
Эквивалентной принято называть схему, которую составляют из идеализированных элементов, реакция которой на входное воздействие одинакова (с определенной точности) с реакцией самого ЭП.

Можно выделить два подхода к построению эквивалентной схемы ЭП.

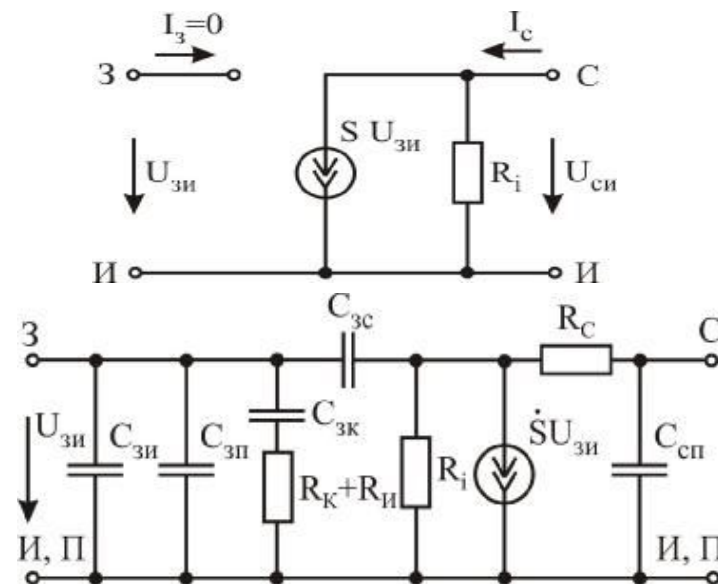
1. Формальная схема замещения.
2. Физическая схема замещения.



Диод



Биполярный транзистор

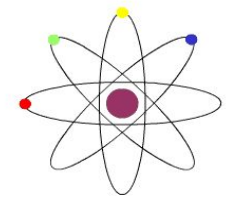


Полевой транзистор



# 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  $\rho$  (**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;

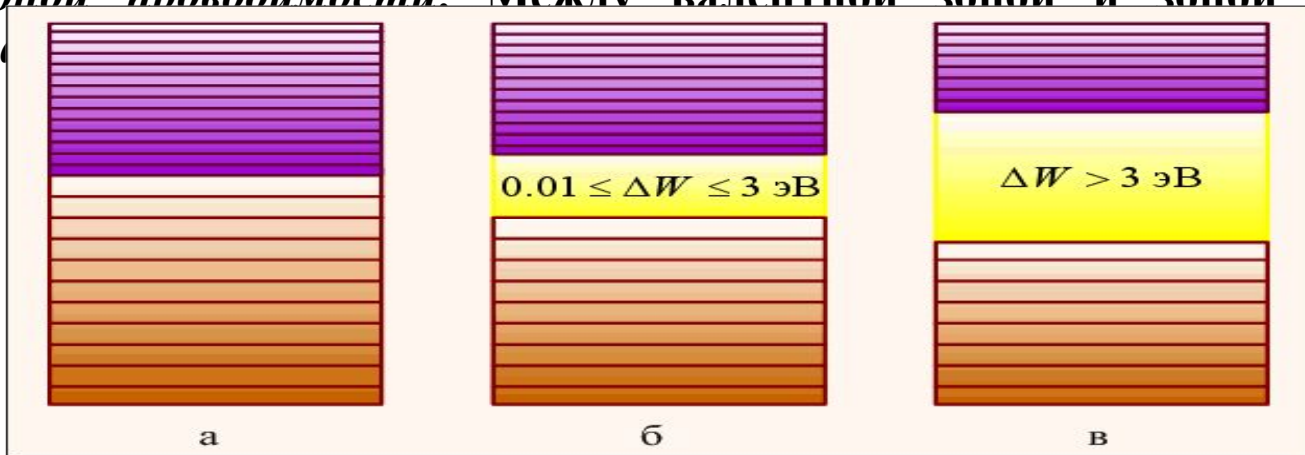
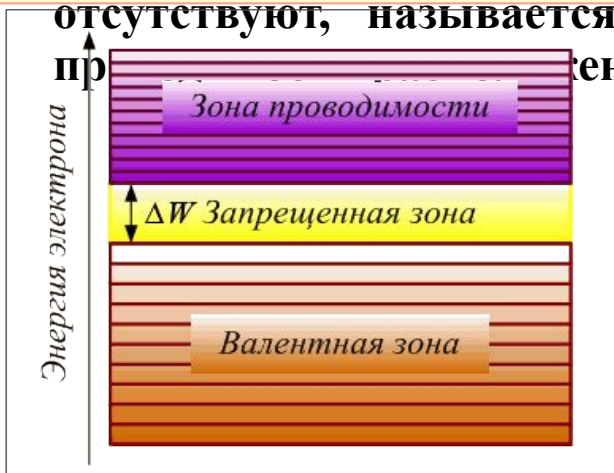
• **примесные или легированные** – в них часть атомов собственного ПП заменяется на атомы ПП





# Энергетические уровни и зоны

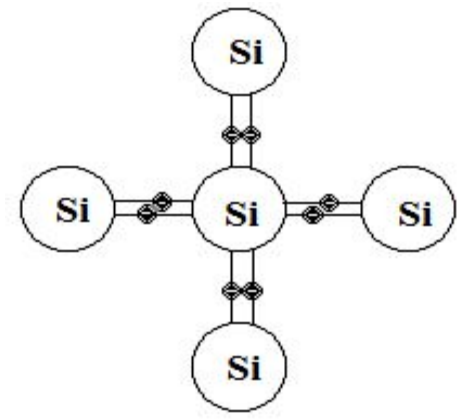
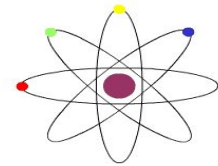
- Электропроводность веществ удобно объяснять зонной теорией.
- В соответствии с квантовой теорией энергия электрона, вращающегося по своей орбите вокруг ядра, не может принимать произвольных значений энергии..
- Согласно *принципу Паули* на одном энергетическом уровне не может находиться более двух 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



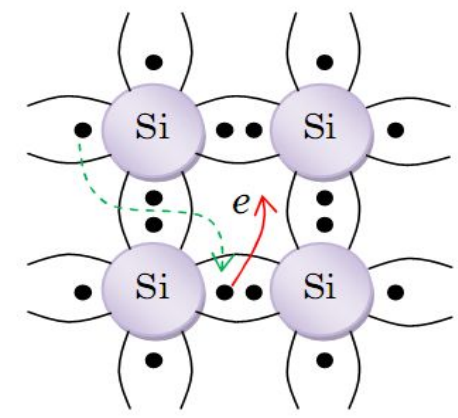
Расщепление энергетических уровней электронов в твердых телах

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

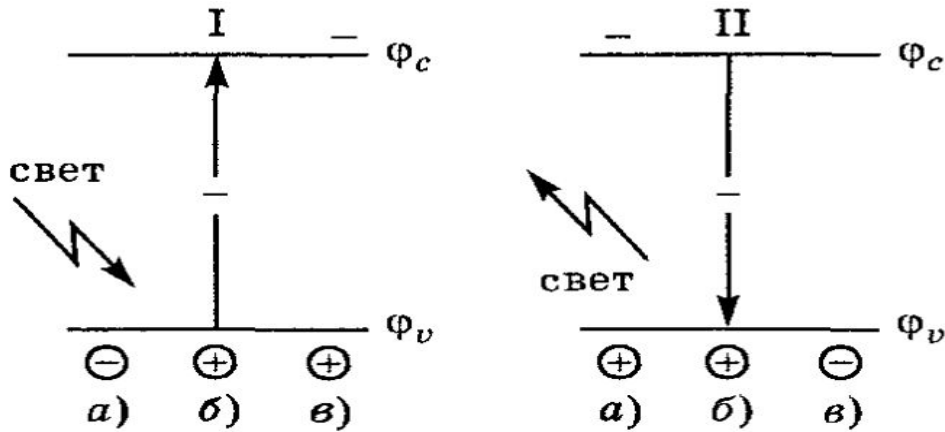
$$np = AT^3 e^{-\left(\frac{\Delta W}{kT}\right)}$$

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

- $A$  - постоянный коэффициент;  $T$  - температура по шкале Кельвина;
- $\Delta W$  - 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**

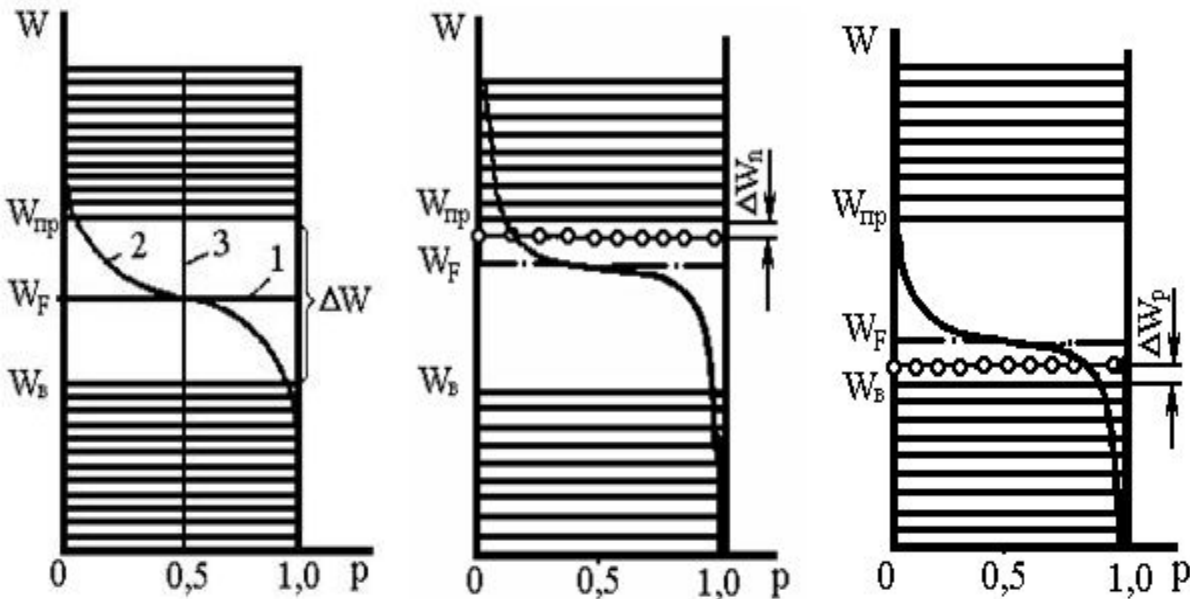


Рис. 2.3. Зонная модель и функция вероятности заполнения электронами энергетических уровней:

- а) в собственном полупроводнике;
- б) в полупроводнике n-типа;
- в) в полупроводнике p-типа

Ширина запрещенной зоны для образования электронов в чистом полупроводнике -  $\Delta W$

В полупроводнике n-типа -  $\Delta W_n$   
 Дырок в полупроводнике p-типа -  $\Delta W_p$

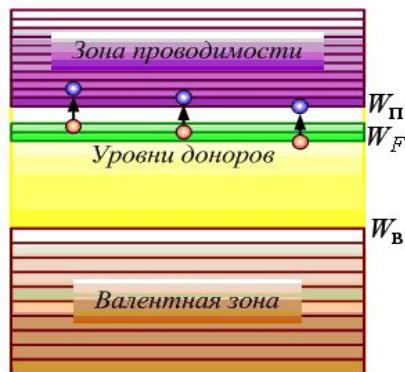
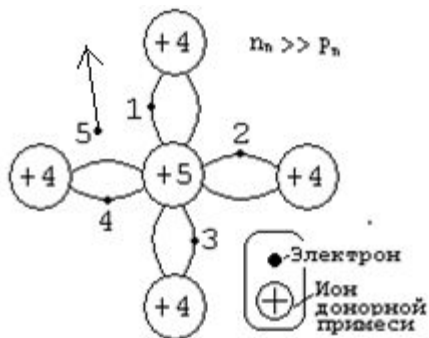
**I а. – захват электрона, I б. отдача электрона,**

**II а. захват дырки, II б. отдача дырки.**

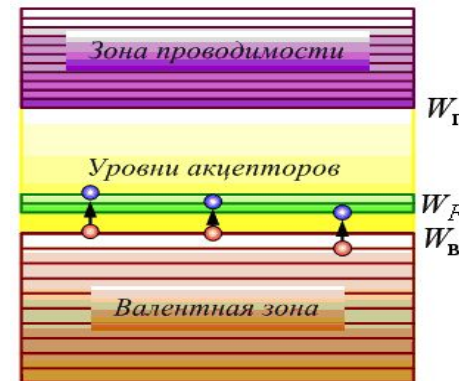
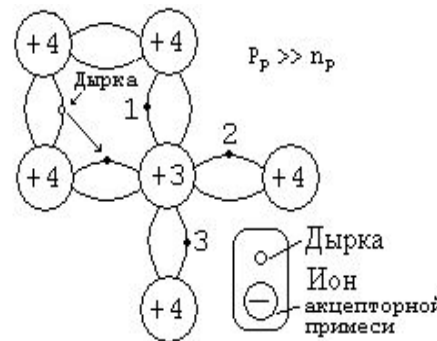
# 1.1.3. Примесные полупроводники



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 создаёт 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,

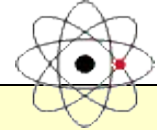
• Полупроводники *n*-типа называют электронными. Для них справедливо соотношение:  $n_n p_n = n_i p_i = n_i^2$ .

**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  $\phi$ , то градиент потенциала  $E = d\phi/dx$  называется напряженностью поля. Электроны движутся от меньшего потенциала к большему, а дырки навстречу.

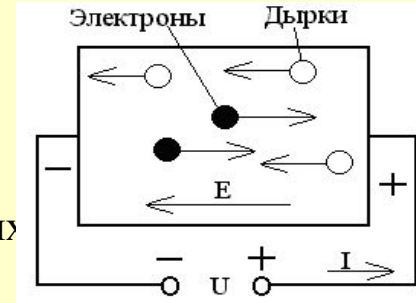
• Плотность полного дрейфового тока состоит из электронной и дырочной составляющих

$$I_{др} = I_{ndр} + I_{pдр} \quad I_{ndр} = q_e V_n, \quad q_e = -ne, \quad V_n = -n E \quad I_{pдр} = q_p V_p$$

где:  $I_{др}$  - плотность полного дрейфового тока;  $I_{ndр}$  и  $I_{pдр}$  - 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;  $\mu_n, \mu_p$  - подвижности электронов и дырок ( $\mu = V/E$ );  $E$  - напряжённость электрического поля. Отсюда ток равен:

где  $\sigma$  - 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. :

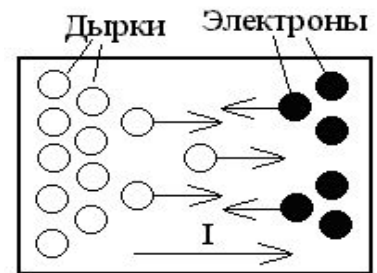
$$I_{диф} = I_{ndиф} + I_{pдиф}, \quad I_{ndиф} = -eD_n \left( -\frac{\Delta n}{\Delta x} \right) = eD_n \frac{dn}{dx}$$

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

Подвижности и коэффициенты диффузии связаны соотношением Эйнштейна:  $D_p = \phi_T \mu_n$ ,  $D_n = \phi_T \mu_p$ , где  $\phi_T$  - 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.

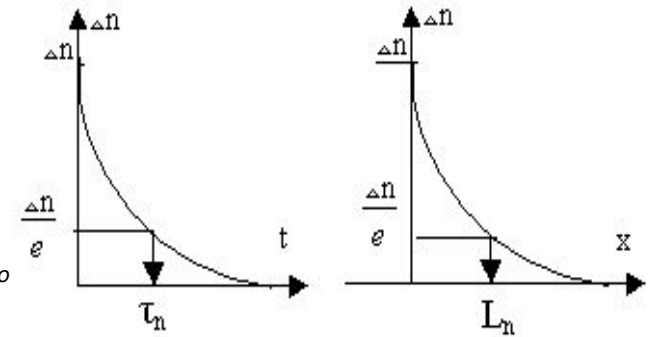
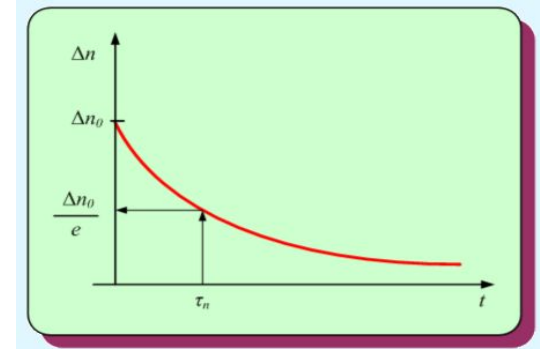
Диффузия характеризуется:

## а) Временем жизни неравновесных (избыточных) носителей заряда $\tau_n$ .

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  $\tau$ , в течение, которого избыточная концентрация  $\Delta n$  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.

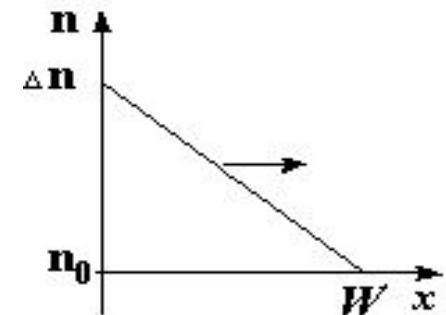


## в) Диффузионная длина и время жизни неравновесных носителей заряда связаны соотношением

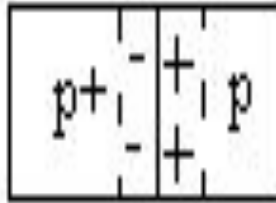
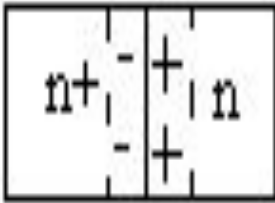
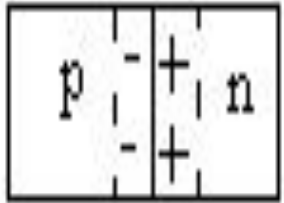
$$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2},$$

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 различным 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

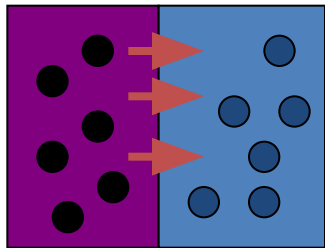




# Переход Шоттки -

переход на основе контакта металл-полупроводник.

**М** полупроводник р-типа

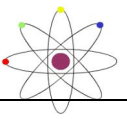


Свободные электроны из металла переходят в полупроводник, часть электронов рекомбинируют с дырками и в приграничном слое возникает эл. поле, препятствующее дальнейшему переходу электронов. Обедненный основными носителями (дырками) приконтактный слой полупроводника обладает *большим* сопротивлением.

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.**

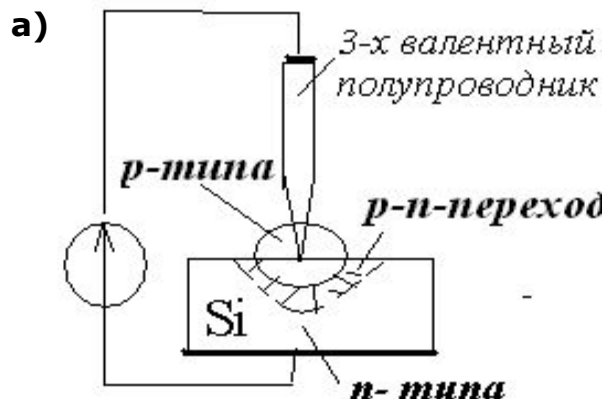
**а) Метод сплавления – рис.1.**

**б) Диффузионный метод – рис.2.**

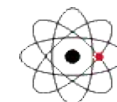
**в) ионная имплантация.**

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

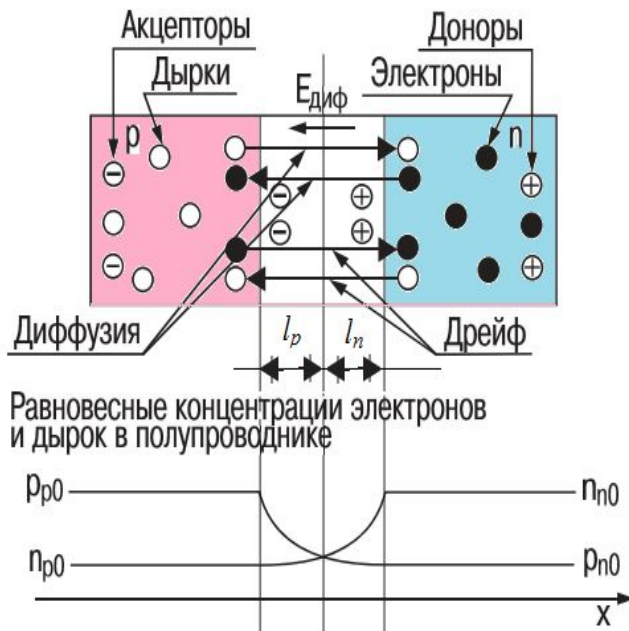
1. Тонкая пластина подвергается термообработке, в результате чего появляется слой диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ -изолятор.
2. Используя методы фотолитографии, удаляют определённые участки в слое  $\text{SiO}_2$ , создавая окна и насыщая туда акцепторную примесь.
3. В результате диффузии атомов примеси 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  $\varphi_k$ , оно препятствует диффузии основных носителей заряда, и является ускоряющим для неосновных.**



***P-n-переход* характеризуют двумя основными параметрами:**

- 1. контактная разность потенциалов  $\varphi_k$** , 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;  $N_A, N_D$  - 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**  $l_{p-n} = l_p + l_n$ :

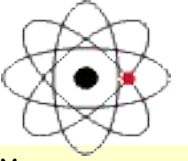
где  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;  
 $\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная свободного пространства.

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

**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.**



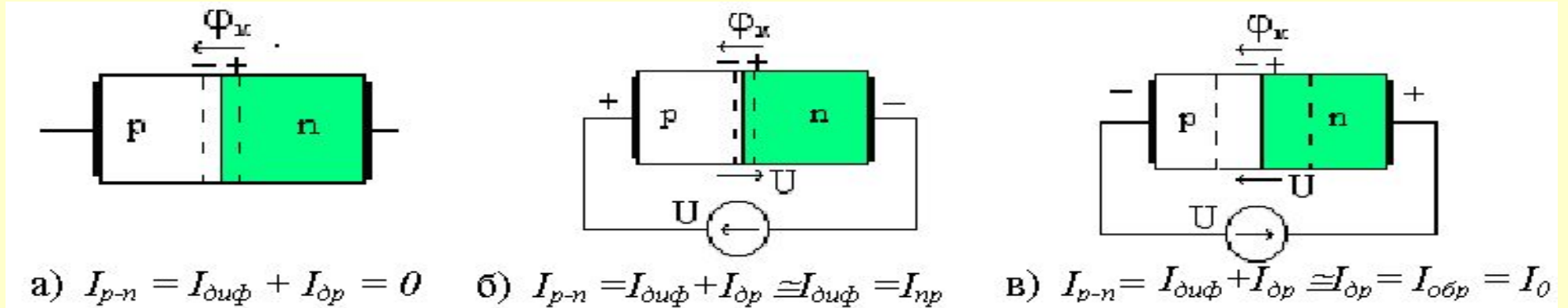
# Режимы работы и токи p-n перехода

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

1). *P-n переход в равновесном состоянии*:  $U_{p-n} = \varphi_k$  (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*:  $U_{p-n} = \varphi_k - U$ , (рис. б).  $I_{p-n} = I_{пр}$

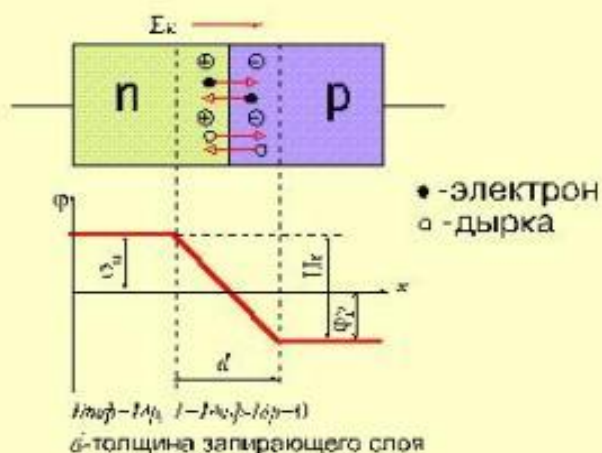
• **Инжекция** – процесс преобразования основных носителей заряда в неосновные при протекании прямого тока. Ширина p-n- переходе уменьшается:  $l_{p-n} \sim (\varphi_k - U)^{1/2}$ .

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

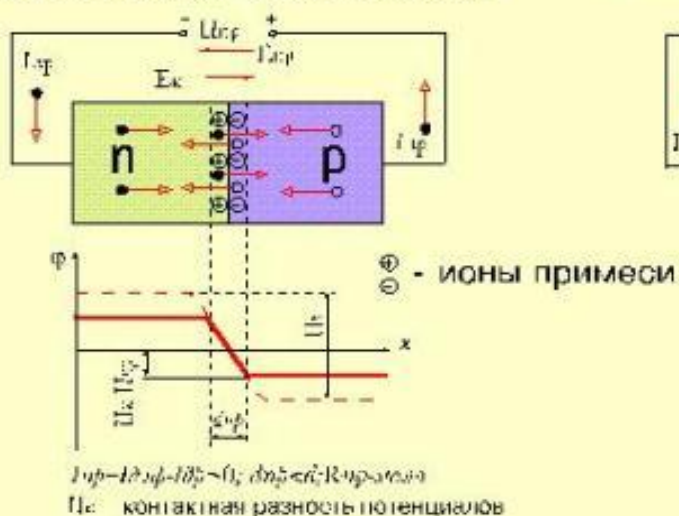
• **Экстракция** – процесс преобразования неосновных носителей заряда в основные при протекании обратного тока. Ширина p-n- переходе увеличивается:  $l_{p-n} \sim (\varphi_k + U)^{1/2}$ .

# ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

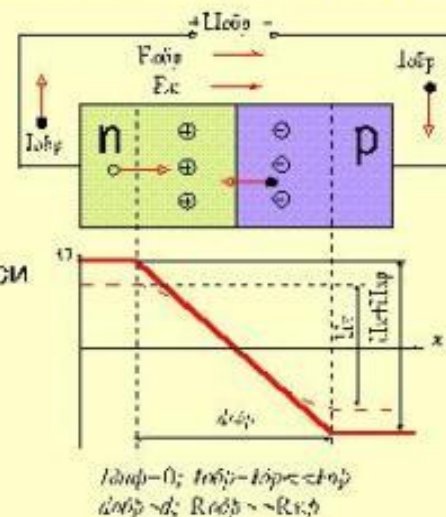
ПРИ ОТСУТСТВИИ ВНЕШНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ



ПРИ ПРЯМОМ НАПРЯЖЕНИИ

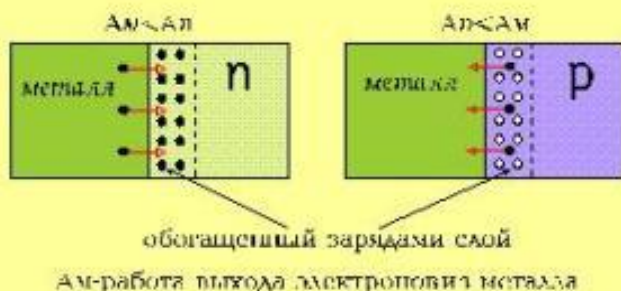


ПРИ ОБРАТНОМ НАПРЯЖЕНИИ

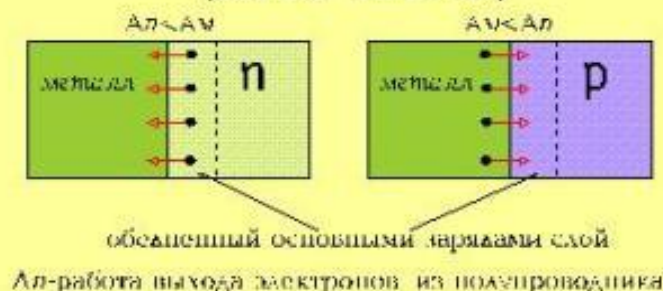


# ПЕРЕХОД МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК

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.

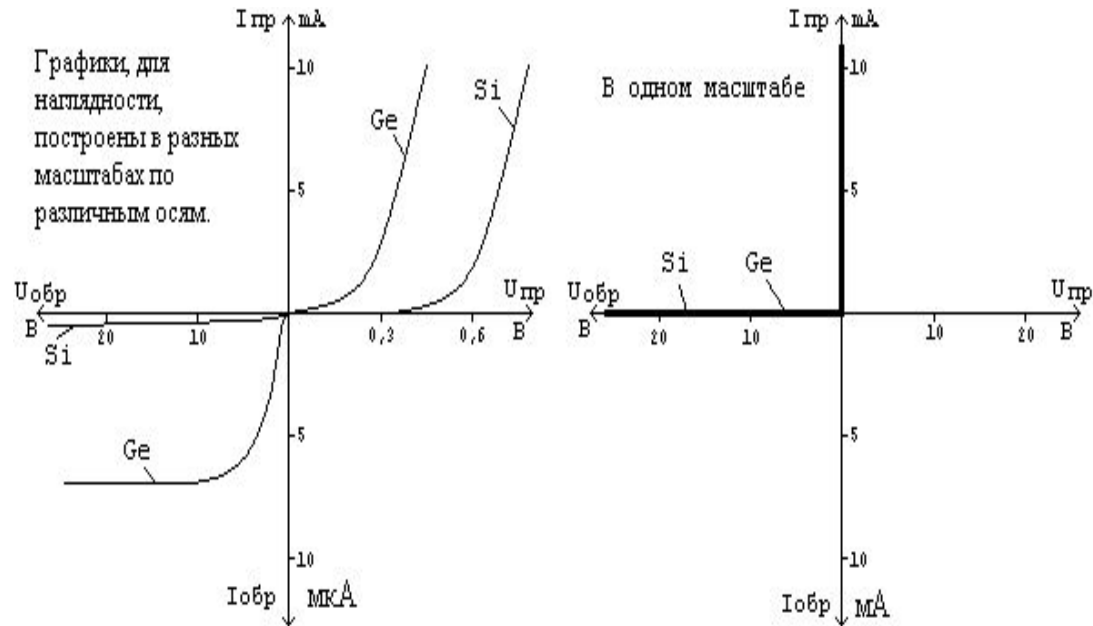
Дифференциальное сопротивление p-n перехода при прямом смещении определяется из соотношения

$$r_{диф} = \phi_T / (I + I_0).$$

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:

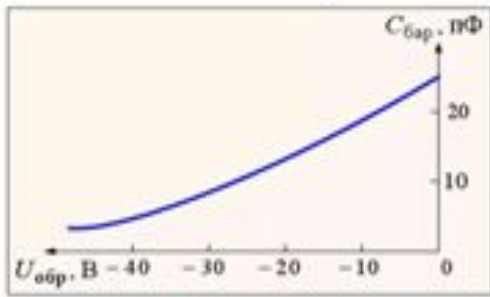
$$I = I_0 \left( e^{\frac{U}{\phi_T}} - 1 \right) = \begin{cases} I_{пр} = I_0 e^{\frac{U}{\phi_T}} & \text{если } U > 0 - \text{ прямое смещение} \\ I_{обр} & \text{если } U < 0 - \text{ обратное смещение} \end{cases}$$



**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<sub>диф</sub> - диффузионная емкости.

**а) При обратном смещении преобладает барьерная ёмкость C<sub>бар</sub> > C<sub>диф</sub>.**

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 -C<sub>0</sub> 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.

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

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

$$C_{бар} < 200 \text{ pF}$$

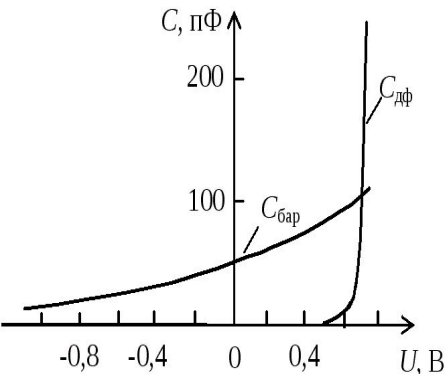


Рис. 4.9. Вольтфарадные характеристики p-n перехода

**б) Диффузионная ёмкость, преобладает (C<sub>диф</sub> >> C<sub>бар</sub>) при прямом смещении p-n-перехода.** Она связана с накоплением неосновных носителей

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

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

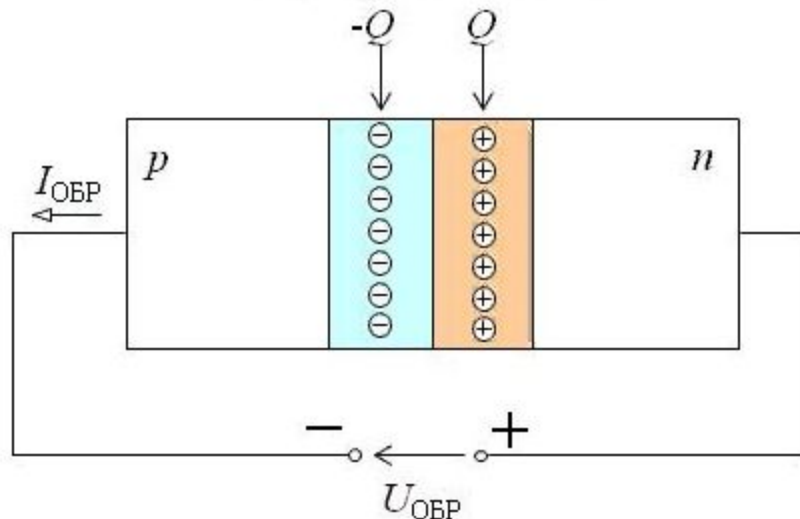
Где: τ<sub>p</sub> =- время жизни неосновных носителей заряда, t- время, в течение которого протекает прямой ток I<sub>пр</sub>. Значения диффузионной ёмкости могут иметь порядок от сотен до тысяч пикофарад.

**В целом если сравнивать диффузионную и барьерную ёмкости C<sub>диф</sub> >> C<sub>бар</sub>.**

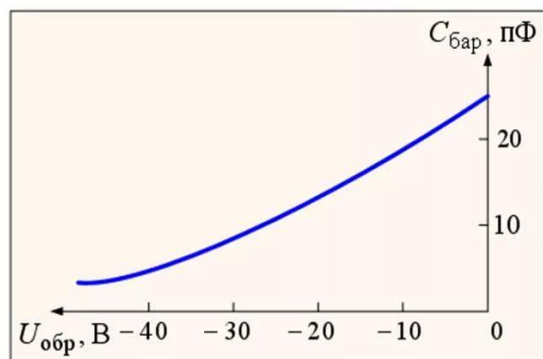
На практика используется барьерная ёмкость, т.к. диффузионная ёмкость обладает малой добротностью, поскольку параллельно этой ёмкости включён p-n переход, смещённый в прямом направлении с малым прямым сопротивлением

# Механизмы создания барьерной и диффузионной емкости

## Барьерная ёмкость



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



Зависимость барьерной емкости от обратного напряжения

## Диффузионная ёмкость

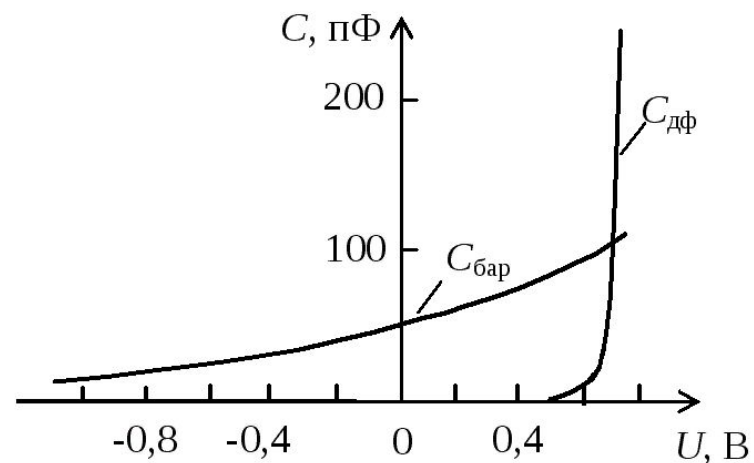
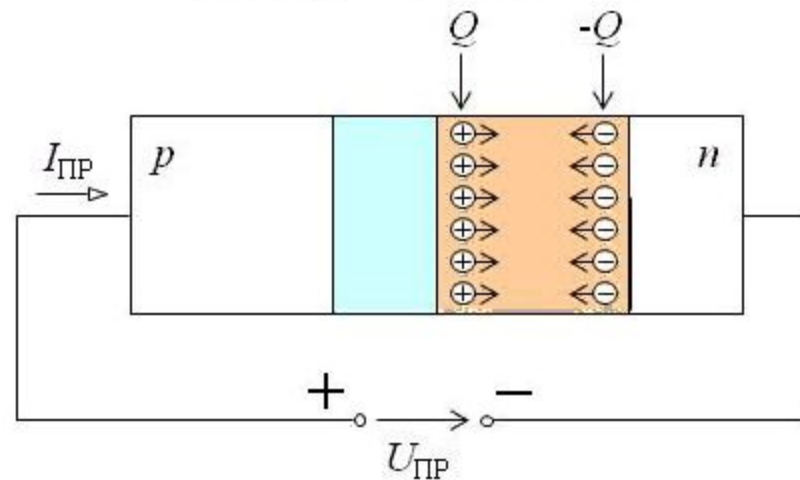


Рис. 4.9. Вольтфарадные характеристики p-n перехода

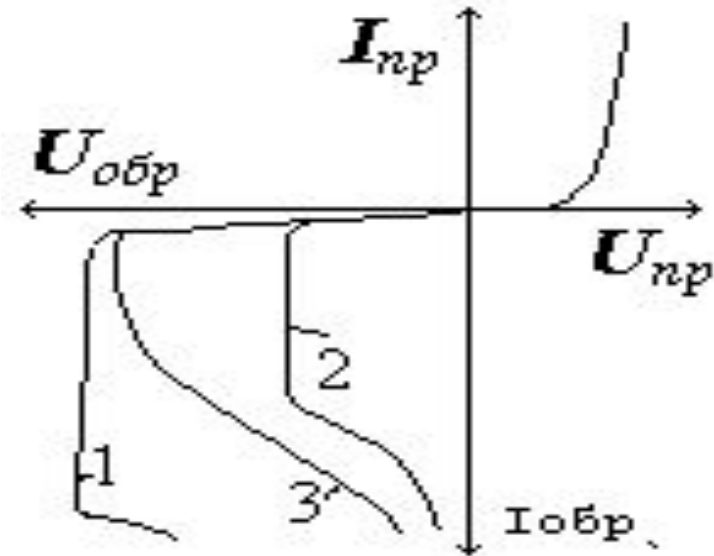
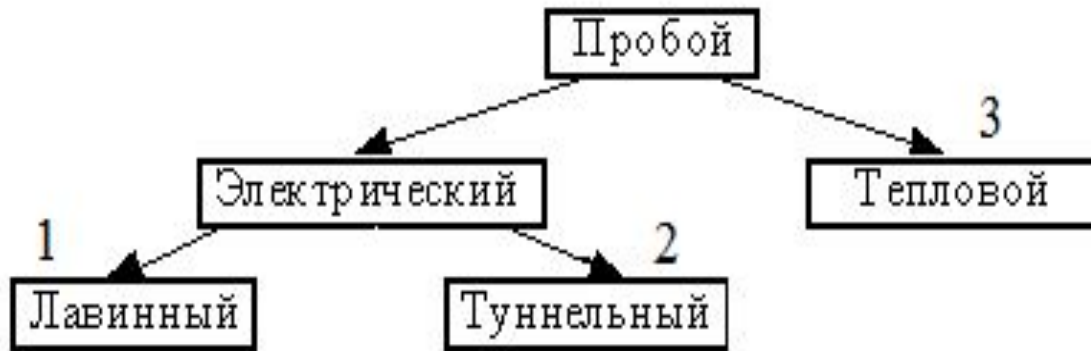




# Пробой p-n- перехода



- 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.

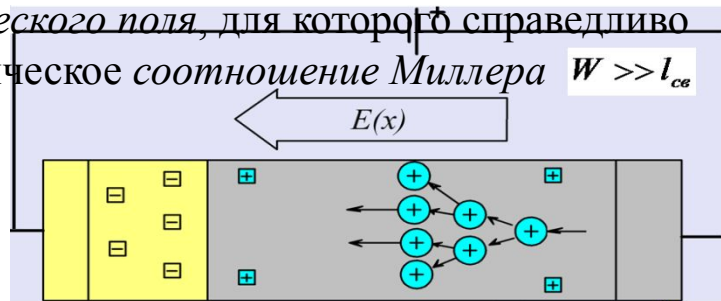
# Механизмы лавинного, туннельного и теплового пробоя

**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  $W \gg l_{cs}$

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



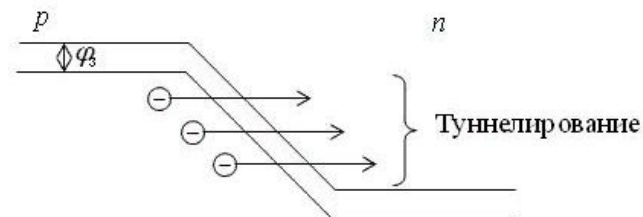
**Напряжение лавинного пробоя составляет десятки ÷ сотни вольт**

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

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