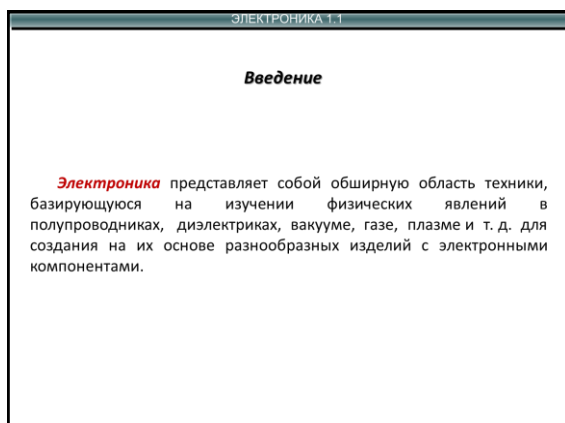
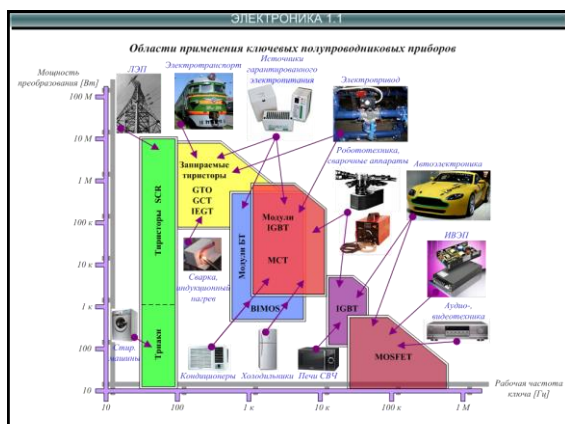






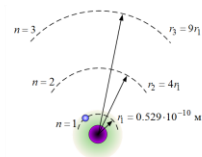


ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

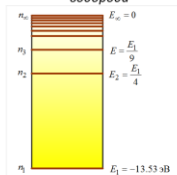
Физические основы работы полупроводниковых приборов

Энергетические уровни и зоны

Разрешенные орбиты электрона в атоме водорода



Энергетические уровни атома водорода



Полная энергия электрона, равная сумме его кинетической (движения по орбите) и потенциальной (притяжения к ядру) энергий, называется **энергетическим состоянием атома**.

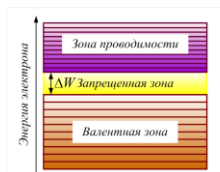
Энергетические уровни могут быть **разрешенными** и **запрещенными**.

ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Проводники, полупроводники и диэлектрики

Принцип Паули:

На любом энергетическом уровне одновременно может находиться **не более двух** электронов, отличающихся моментами импульса или спинами.



$\Delta W = 0$ эВ – проводники

$0,01 \leq \Delta W \leq 3$ эВ – полупроводники

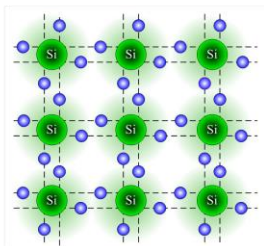
$\Delta W > 3$ эВ – диэлектрики

Расщепление энергетических уровней электронов в твердых телах

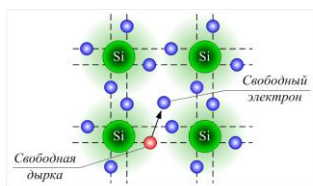
ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Собственная электропроводность полупроводника

Структура связей атома кремния в кристаллической решетке



ЭЛЕКТРОНИКА 1.1



Собственная электропроводность полупроводника

ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Электропроводность, обусловленную движением свободных электронов, называют **электронной**.

Электропроводность, обусловленную движением дырок – **дырочной**.

Электропроводность полупроводника, обусловленная парными носителями теплового происхождения, называется **собственной проводимостью**.

Процесс образования пары свободных носителей заряда «электрон – дырка» называют **генерацией пары**.

Процесс восстановления разорванных валентных связей называется **рекомбинацией**.

ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Распределение электронов по энергетическим уровням

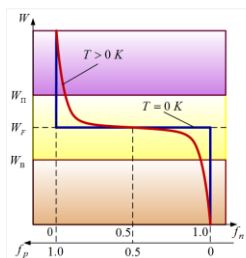
Уровень Ферми – это такой энергетический уровень, вероятность нахождения на котором заряженной частицы равна 0,5 при любой температуре твердого тела.

$$f_n(W) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W - W_F}{kT}}} \quad \text{— вероятность заполнения электроном энергетического уровня } W \text{ при температуре } T$$

$$f_p(W) = 1 - f_n(W) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W_F - W}{kT}}} \quad \text{— вероятность того, что квантовое состояние с энергией } W \text{ свободно от электрона}$$

ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Распределение электронов (дырок)
по энергетическим уровням для чистого полупроводника



ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Примесная электропроводность

Электрические свойства полупроводников зависят от содержания в них примесей.

Электропроводность, возникающую за счет примесных атомов, называют **примесной**.

В качестве регулирующих примесей применяют:

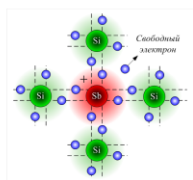
- ✓ трехвалентные элементы: *бор, индий, галлий, алюминий*;
- ✓ пятивалентные элементы: *сурьма, мышьяк, фосфор*.

Примеси бывают *донорные* и *акцепторные*.

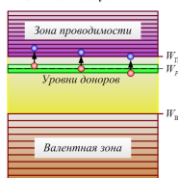
ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Донорные примеси

Донор – это примесный атом, создающий в запрещенной зоне энергетический уровень, занятый в невозбужденном состоянии электроном и способный в возбужденном состоянии отдать электрон в зону проводимости.



Зонная диаграмма

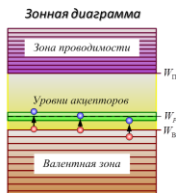
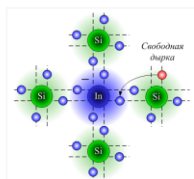


Такой полупроводник называют **полупроводником n-типа**.

ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Акцепторные примеси

Акцептор – это примесный атом, создающий в запрещенной зоне энергетический уровень, свободный от электрона в невозбужденном состоянии и способный захватить электрон из валентной зоны в возбужденном состоянии.



Такой полупроводник называют **полупроводником p-типа**.

ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Процессы переноса зарядов в полупроводниках**Дрейф носителей заряда**

Дрейфом называют направленное движение носителей заряда под действием электрического поля.

Составляющая электрического тока в полупроводнике под действием внешнего электрического поля называется **дрейфовым током**

$$J = J_{n \text{ др}} + J_{p \text{ др}} = qE(N_n \mu_n + N_p \mu_p).$$

ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Диффузия носителей заряда

Диффузия – движение носителей заряда из-за градиента концентрации, т.е. происходит выравнивание концентрации носителей заряда по объему полупроводника.

Поток частиц при диффузии $\Phi_m = -D_m \text{grad}(m).$

$$J_{n \text{ диф}} = qD_n \frac{dn}{dx}, \quad J_{p \text{ диф}} = -qD_p \frac{dp}{dx},$$

$$J_{\text{диф}} = q \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right).$$

ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

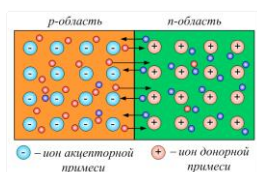
Электрические переходы

Электрическим переходом в полупроводнике называется граничный слой между двумя областями, физические характеристики которых имеют существенные физические различия.

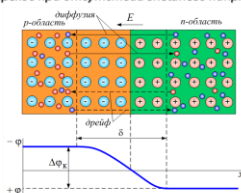
Виды электрических переходов:

- ✓ **электронно-дырочный, или р-п-переход;**
- ✓ **переход металл – полупроводник;**
- ✓ **переходы между двумя областями с одним типом электропроводности, отличающиеся значением концентрации примесей;**
- ✓ **гетеропереходы.**

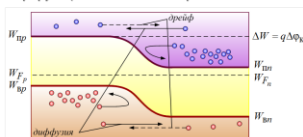
ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Электронно-дырочный переход

ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Р-п-переход при отсутствии внешнего напряжения

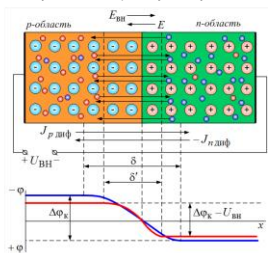
Зонная энергетическая диаграмма р-п-перехода, иллюстрирующая баланс токов в равновесном состоянии



ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Вентильное свойство р-п-перехода

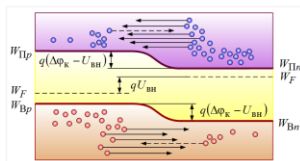
Р-п-переход, обладает свойством изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от направления протекающего через него тока. Это свойство называется **вентильным**.

Прямое смещение р-п-перехода

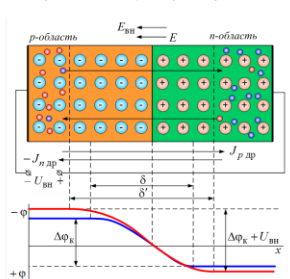
ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Введение носителей заряда через р-п-переход при понижении высоты потенциального барьера в область полупроводника, где эти носители являются неосновными, называют **инжекцией носителей заряда**.

Зонная энергетическая диаграмма прямого смещения р-п-перехода, иллюстрирующая дисбаланс токов

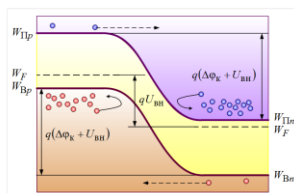


ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Обратное смещение р-п-перехода

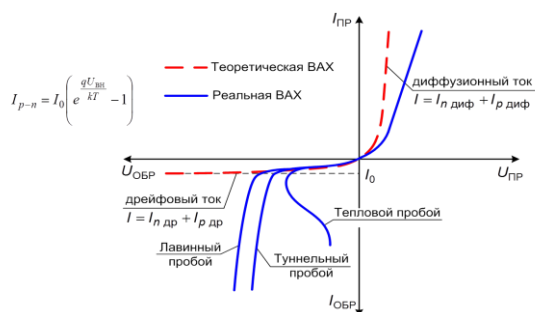
ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Зонная энергетическая диаграмма обратного смещения р-п-перехода, иллюстрирующая дисбаланс токов



ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Вольт-амперная характеристика р-п-перехода



ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Виды пробоев р-п-перехода

Возможны обратимые и необратимые пробой.

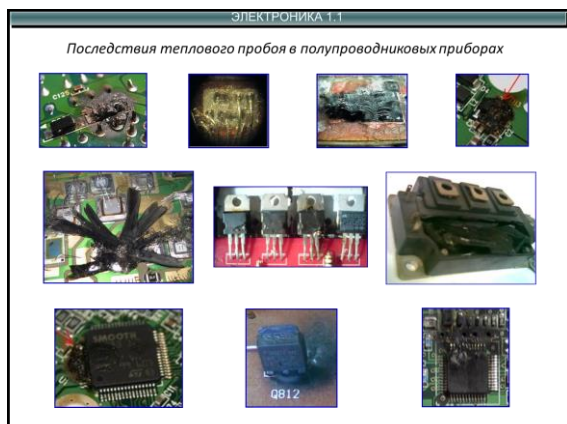
Обратимый пробой — это пробой, после которого р-п-переход сохраняет работоспособность.

Необратимый пробой ведет к разрушению структуры полупроводника.

Существуют четыре типа пробоя: *лавинный, туннельный, тепловой и поверхностный*.

Лавинный и туннельный пробой объединяются под названием — *электрический пробой*, который является обратимым.

К необратимым относят тепловой и поверхностный.



ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Емкость р-п-перехода

Емкость р-п-перехода разделяют на две составляющие:

- ✓ **барьерную**, отражающую перераспределение зарядов в р-п-переходе.
- ✓ **диффузионную**, отражающую перераспределение зарядов вблизи р-п-перехода.

ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

1. Барьерная емкость

При постоянном напряжении $C_B = \frac{Q_{\text{обр}}}{U_{\text{обр}}}$

Барьерная емкость C_B определяется как:

$$C_B = C_0 \sqrt{\frac{\Delta\varphi_K}{\Delta\varphi_K - U_{\text{ВН}}}}$$

$$C_0 = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{\delta}$$

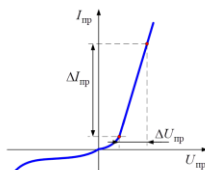
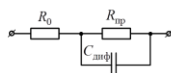
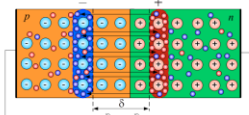
Зависимость барьерной емкости от обратного напряжения

ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

2. Диффузионная емкость

При постоянном напряжении

$$C_{\text{диф}} = \frac{Q_{\text{диф}}}{U_{\text{пр}}}$$



ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

Контакт металл – полупроводник

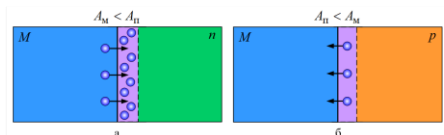
Контакт металл – полупроводник возникает в месте соприкосновения полупроводникового кристалла *n* или *p*-типа проводимости с металлами.

В месте контакта происходит перераспределение электрических зарядов и возникает электрическое поле и контактная разность потенциалов:

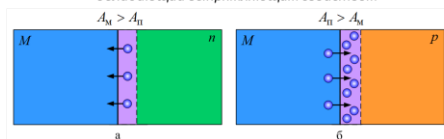
$$\Delta\varphi_k = \left| \frac{A_M - A_n}{q} \right|$$

ЭЛЕКТРОНИКА 1.1

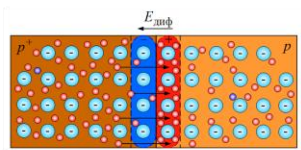
Контакт «металл – полупроводник»,
не обладающий выпрямляющим свойством



Контакт «металл – полупроводник»,
обладающий выпрямляющим свойством



Контакт между полупроводниками одного типа проводимости



Такой контакт **не обладает** выпрямляющим свойством
