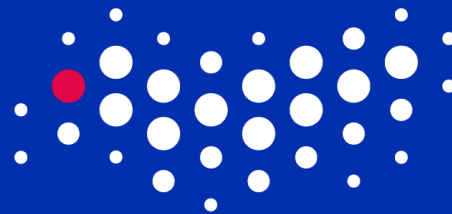


УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург, 2021



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Введение в дисциплину.
Полупроводниковые материалы.
Электронно-дырочный переход.

Николаев Николай Анатольевич
nikolay.a.nikolaev@gmail.com

Санкт-Петербург, 2021

Темы, освещенные в презентации

- ✓ Общие «моменты»
- ✓ Введение в дисциплину
- ✓ Полупроводниковые материалы
- ✓ Электронно-дырочный переход

Структура курса:

1. Лекционные занятия – 16 ч
2. Лабораторные работы – 32 ч (NI Elvis II, LabView)
3. Самостоятельная работа студента – 55,2 ч (подготовка к занятиям и лабораторным работам, оформление отчетов, выполнение домашних заданий)

Итоговая аттестация - экзамен.

Общие положения.

Проектирование изделий электронной техники.

НИР, ОКР и постановку на производство изделий электронной техники осуществляют в соответствии с ГОСТ Р 53736— 2009.

Рассмотрим этапы ОКР:

1. Разработка ТЗ
2. Разработка эскизного проекта
3. Разработка технического проекта
4. Разработка рабочей КД, ТД и проекта ТУ: технологическая подготовка производства, изготовление опытных образцов, проведение предварительных испытаний
5. Приемка ОКР.

ЕСКД распространяются на изделия машиностроения и приборостроения. (ГОСТ 2.001-2013 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие положения).

Виды конструкторских документов определяются ГОСТ 2.102-2013 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Виды и комплектность конструкторских документов.

Общие положения.

Проектирование изделий электронной техники.

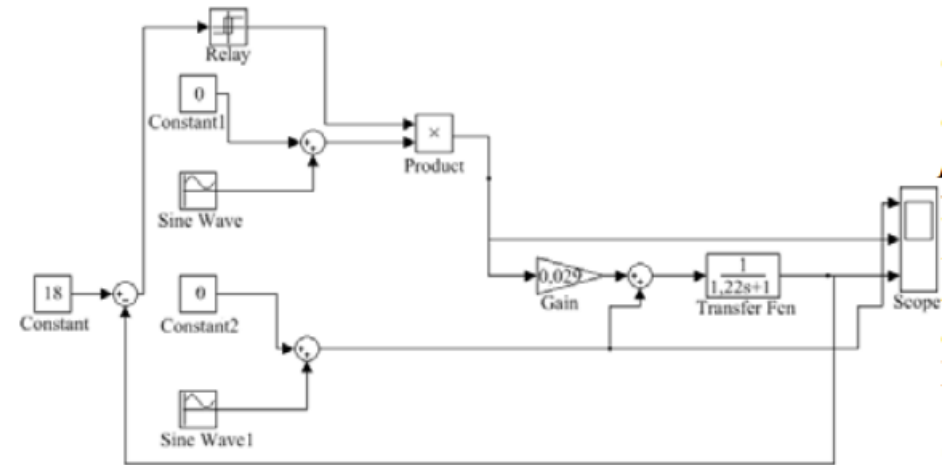
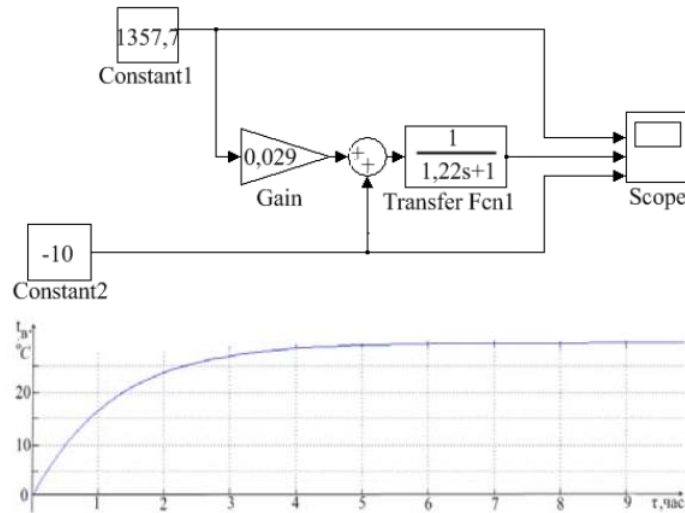
Электрические схемы выполняются в соответствии с ГОСТ 2.701 и 2.702.

На структурной схеме изображают все основные функциональные части изделия (элементы, устройства и функциональные группы) и основные взаимосвязи между ними.

На принципиальной схеме изображают все электрические элементы и устройства, необходимые для осуществления и контроля в изделии электрических процессов, все электрические взаимосвязи между ними, а также электрические элементы (соединители, зажимы и т.д.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи.

Схемы выполняют для изделий, находящихся в отключенном положении.

Схема комбинированная структурная



Структурная схема разомкнутой системы

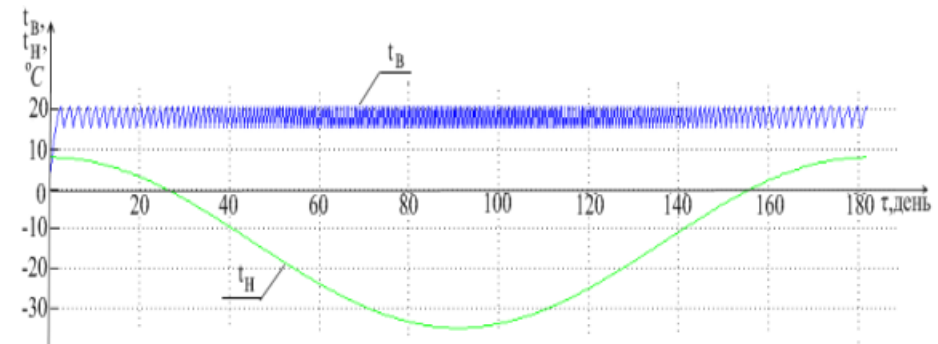
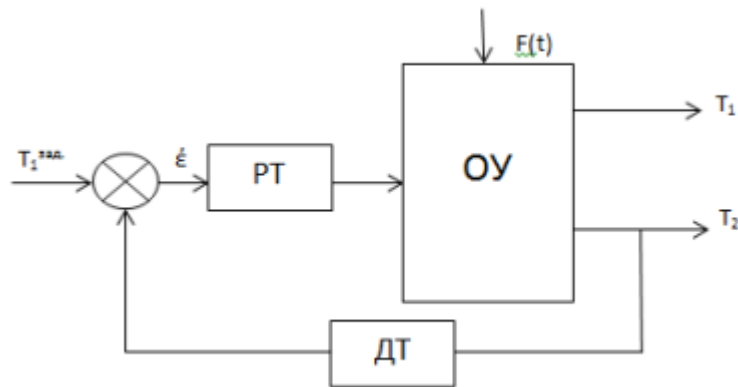


Рисунок – структурная схема замкнутой системы

Структурная схема системы автоматического регулирования температуры в помещении

Программная поддержка разработки

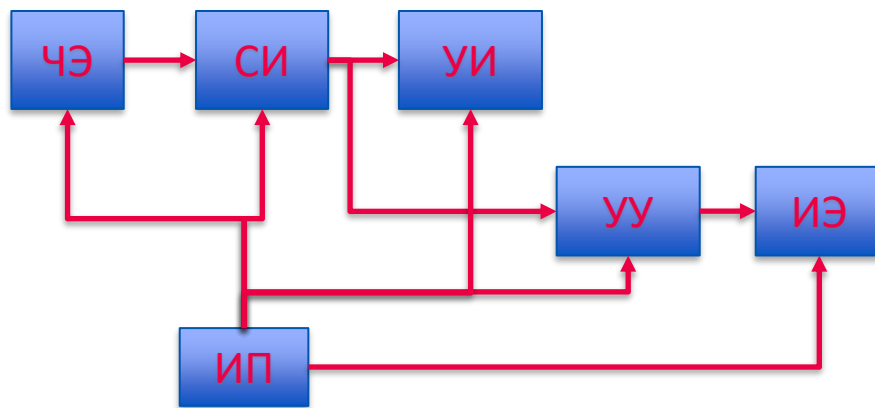
На этапе разработки структурной схемы – Matlab, Scilab.

На этапе разработки электрической схемы (имитационное моделирование – симуляция работы) – NI Multisim, EasyEDA, Circuit Sims, EveryCircuit, DoCircuits, PartSim, 123DCircuits, TinaCloud, Spicy schematics, Gecko simulations, CircuitLab и т.д.

На этапе разработки электрической схемы (формирование схемы электрической принципиальной схемы, печатной платы, сборочного чертежа и т.д.) – стандартные САВ продукты (Autocad, Nanocad, Компас и т.д.), а также специализированное ПО (Бесплатное ПО: Ltspice, «Компас-электрик», DipTrace, EasyEDA, TinyCAD, Xcircuit, Dia, Pspice — Student Version, SmartDraw, 1-2-3 схема, Microsoft Visio, KiCad, CadSoft Eagle и Платное ПО: OrCAD, TINA-TI, Altera, Altium Designe, P-Cad, Proteus Design Suite, sPlan.

Пример – терморегулятор-индикатор

✓ Схема электрическая структурная



ЧЭ – чувствительный элемент
 СИ – схема измерения
 УИ – устройство индикации
 УУ – устройство управления
 ИЭ – исполнительный элемент
 ИП – источник питания

✓ Схема электрическая принципиальная

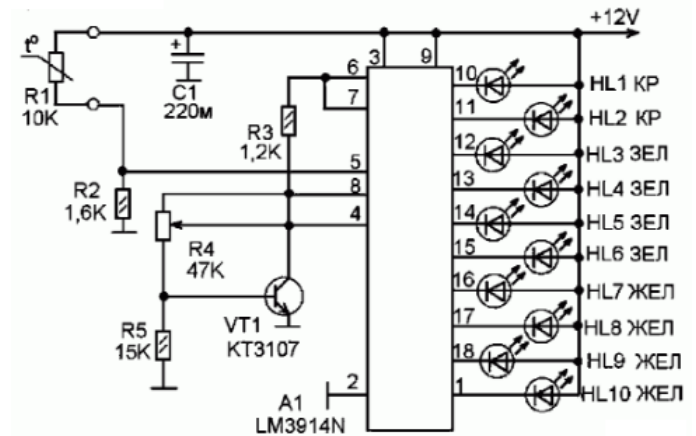


Схема индикатора температуры

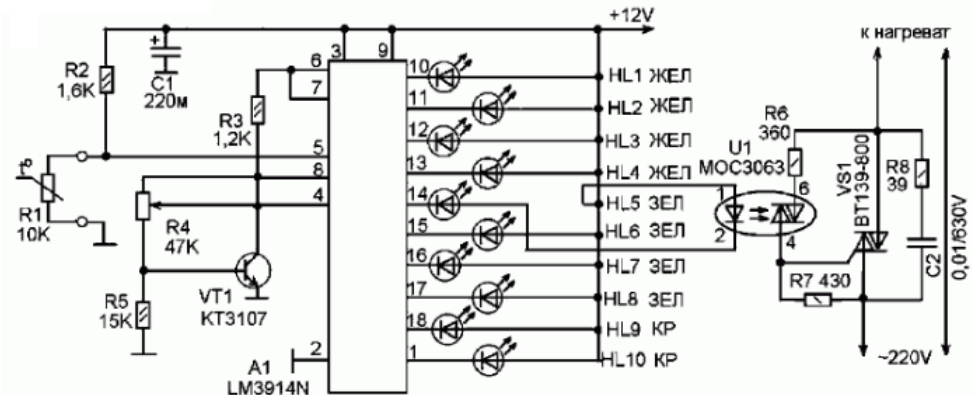
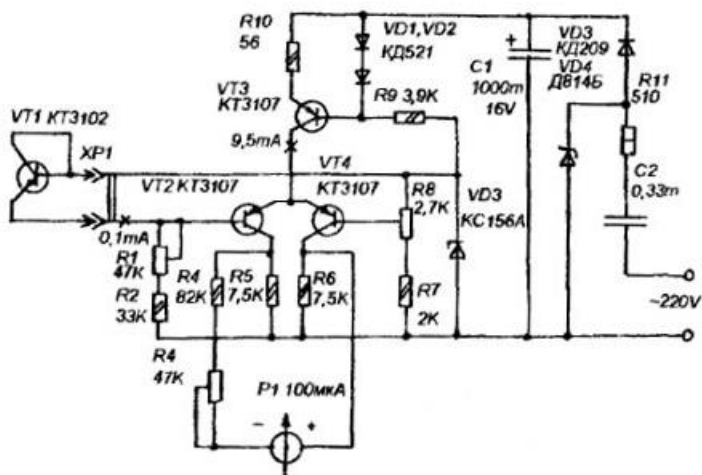
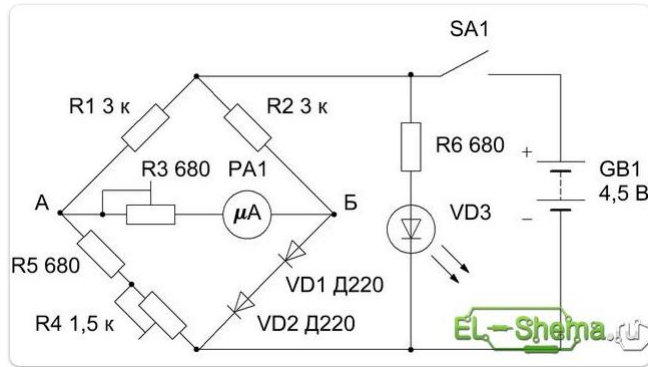


Схема терморегулятора-индикатора

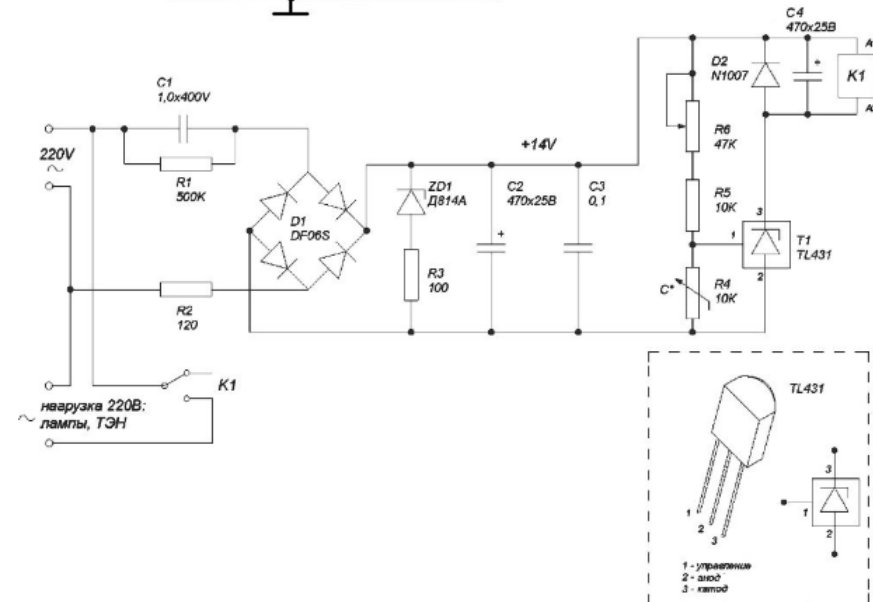
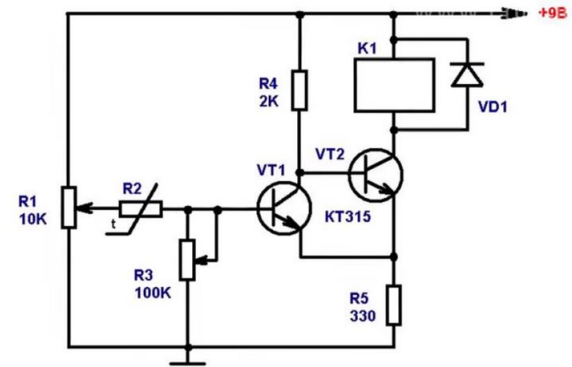


Примеры

✓ Простейший термометр



✓ Простой терморегулятор





Введение в дисциплину

Электроника – дисциплина в которой рассматриваются вопросы управления потоками заряженных частиц в полупроводниковых устройствах (электронных компонентах).

Такие элементы широко используются как в слаботочной электронике, так и в силовой технике.

Целью силовой электроники является преобразование большого количества энергии, поэтому основное внимание при разработке схем уделяется получению наибольшего КПД.

В слаботочной электронике основной целью является передача информации с наименьшим возможным искажением и обработка информации с наибольшей возможной точностью, в то время как вопрос о достижении максимального КПД является второстепенным.

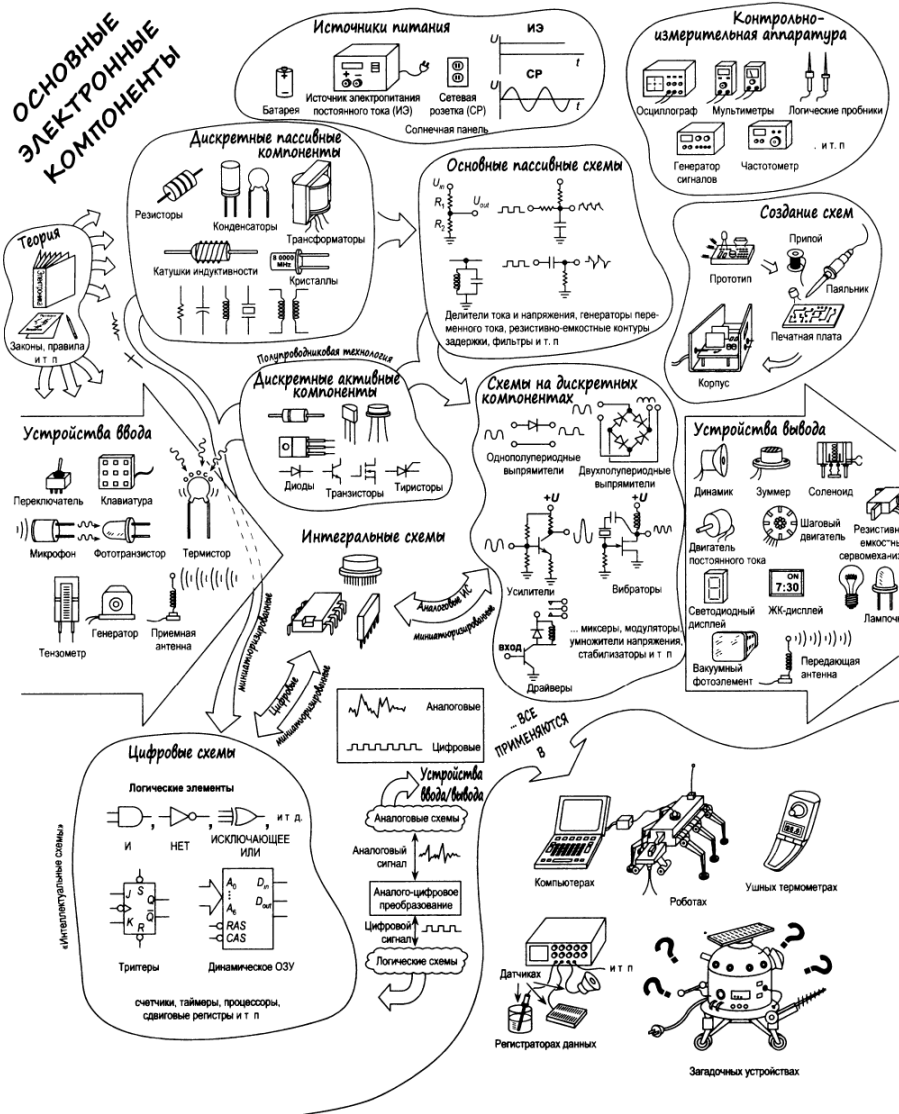
В настоящее время и в силовой и слаботочной электронике решаются обе задачи – обеспечение высокого КПД и обеспечение максимальной точности.



Введение в дисциплину

Предметные области курса
«Электроника»:

- дискретные активные компоненты;
- схемы на дискретных компонентах;
- интегральные схемы (аналоговые и цифровые).





Электропроводность веществ

Электропроводность – способность вещества проводить электрический ток.

Электрический ток – направленное движение заряженных частиц.

Таким образом электропроводность это способность вещества (материала) проводить электрический ток под действием электрического поля.

Электропроводность веществ зависит от концентрации в них свободных заряженных частиц, то есть ионов и электронов, не связанных ни с кристаллической структурой, ни с молекулами, ни с атомами данного вещества.



Электропроводность веществ

- ✓ **Диэлектрики** – это вещества, которые существенно препятствуют протеканию через них электрического тока ввиду высокого удельного сопротивления, часто превышающего 10^8 Ом·м. Диэлектрики, которые применяют в качестве изоляции, например, проводов, обычно обладают на много порядков более высоким сопротивлением.
- ✓ **Проводники** – это материалы, которые почти не препятствуют протеканию по ним электрического тока благодаря низкому удельному сопротивлению, обычно не превышающему 10^{-5} Ом·м. Металлические проводники используют в кабелях и проводах в качестве токоведущих шин.
- ✓ **Сверхпроводники** – это материалы, которые при охлаждении до некоторой критической температуры резко уменьшают удельное сопротивление до нуля. В результате отсутствуют потери энергии на омическом сопротивлении, что позволяет создавать мощные высокоэффективные кабели, трансформаторы мощностью в мегаватты с высоким КПД и т.п. К сверхпроводникам относят соединения NbN, NbTi, Nb₃Sn и другие. У большинства сверхпроводников критическая температура лежит вблизи абсолютного нуля, что снижает практическую пригодность этих материалов.
- ✓ **Полупроводники** – это вещества, удельное сопротивление которых зависит от внешних условий, например, изменения температуры, изменений интенсивности облучения световым потоком и прочего. В результате, в определенных условиях полупроводники могут менять свое удельное сопротивление, и оно может стать со всеми промежуточными градациями либо таким, как у проводников, либо как у диэлектриков. При температуре вблизи абсолютного нуля полупроводники обладают диэлектрическими свойствами, а при нагреве выше определенной критической температуры они проявляют свойства проводников. Зависимость их сопротивления от температуры нелинейна.



Классификация полупроводников

Полупроводники можно классифицировать по разным принципам, например:

- ✓ по агрегатному состоянию: твердые и жидкие;
- ✓ по структуре: кристаллические и некристаллические;
- ✓ по физическим свойствам: магнитные и сегнетоэлектрические;
- ✓ по химическому составу: элементарные, соединения, органические.

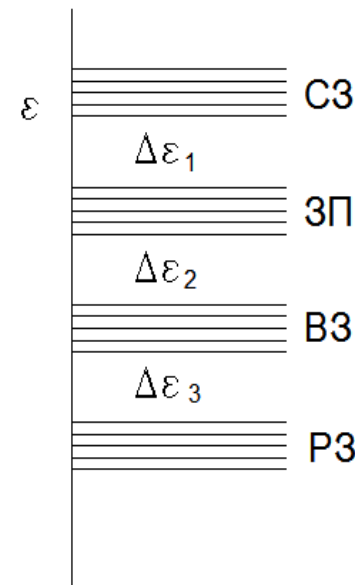
Электропроводность полупроводников обусловлена двумя типами носителей электрического заряда, которые могут перемещаться под действием градиента концентрации или внешнего электрического поля. Носителями заряда в полупроводниках являются электроны проводимости и дырки.

Полупроводниковые материалы

Одиночный электрически нейтральный атом имеет ядро, окруженное пространственными оболочками электронов. При сближении атомов дискретные энергетические уровни электронов, расщепляются на подуровни, при этом образуются энергетические зоны. Энергетическую зону образовавшуюся при расщеплении одного или нескольких энергетических уровней, называют разрешенной зоной. При расщеплении энергетических уровней валентных электронов, образуется зона называемая валентной. При взаимодействии атомов незанятые электронами разрешенные энергетические уровни также могут расщепляться и образовывать одну или несколько свободных зон. Нижняя из них называется зоной проводимости. Электроны, соответствующие энергетическим уровням зоны проводимости, могут под действием внешних сил свободно перемещаться по кристаллу, меняя свою энергию и, следовательно, переходя с одного уровня на другой в зоне проводимости.

Такие электроны называются свободными.

Если электрон из валентной зоны под действием внешнего поля приобрел энергию и перешел на уровень зоны проводимости, то в валентной зоне появился незаполненный энергетический уровень, на который возможен переход валентного электрона соседнего атома. Уход одного электрона из ковалентной связи эквивалентен появлению у соседнего атома положительного заряда – дырки. Если другой соседний атом отдает электрон из своей ковалентной связи, то говорят, что дырка как положительный заряд перемещается по кристаллу. При подобных многократных актах можно считать, что в полупроводнике существует ток, называемый дырочным. Перемещение электронов рассматривается как обычный электрический ток. Упрощенная энергетическая диаграмма собственного полупроводника (полупроводника без примесей) приведена на рисунке.



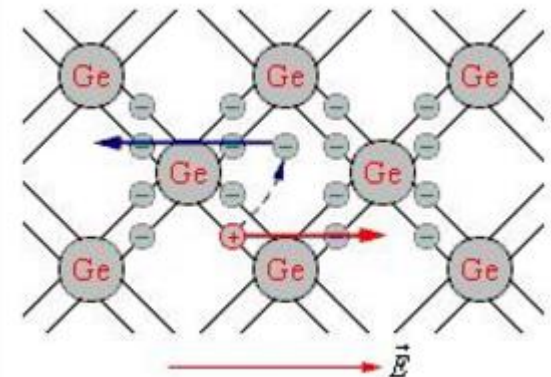
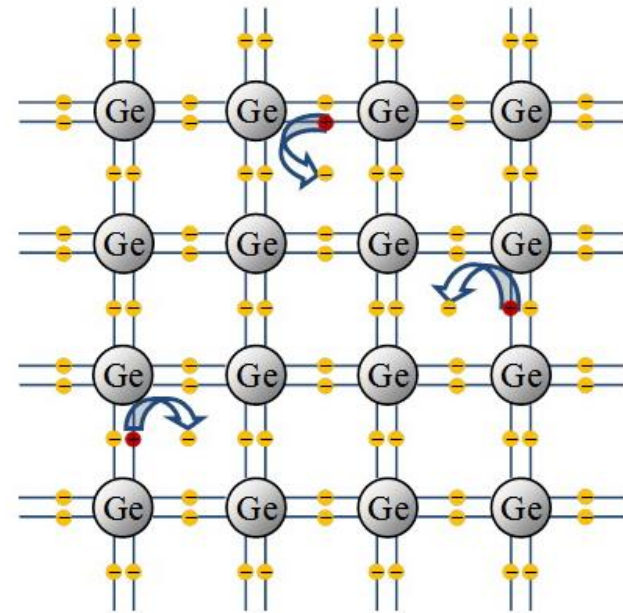
Элементарные полупроводники, полупроводники, содержащие донорные и акцепторные примеси

В микроэлектронике в основном используются твердотельные кристаллические структуры, состоящие из элементарных полупроводников (Ge и Si) или полупроводниковых соединений Ge-Si, A^3B^5 (GaAs – арсенид галлия, InSb – антимонид индия), A^2B^6 (CdS – сульфид кадмия)

Электропроводность собственных полупроводников активизируется при их нагревании, облучении фотонами, воздействии электрического поля, а так же при воздействии других факторов, если электронам валентной зоны сообщается энергия, превышающая ширину запрещенной зоны.

При хаотическом движении по объему кристалла электроны могут быть захвачены дырками, что приводит к восстановлению ковалентных связей атомов. Электрон теряет часть энергии и занимает свободный уровень в валентной зоне. Электрон и дырка как носители заряда исчезают, этот процесс называется процессом рекомбинации.

В стационарном режиме процессы генерации и рекомбинации электронно-дырочных пар уравновешены.

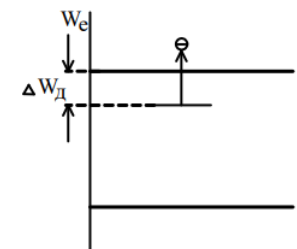
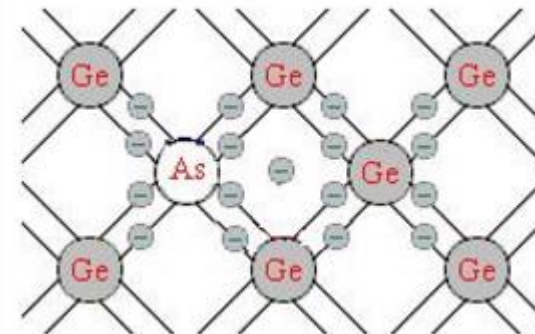
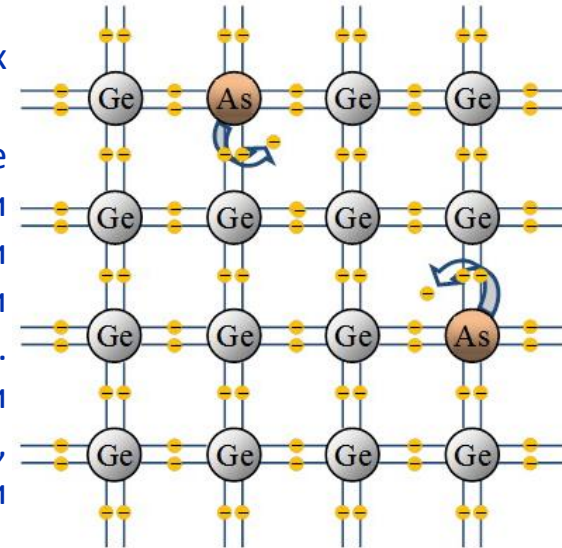


Донорные и акцепторные примеси

Полупроводники с донорной примесью. В качестве донорных примесей используются пятивалентные материалы (As – мышьяк).

Концентрация примесных (донорных) атомов обычно мала (менее 10^{19} см^{-3}). Примесные атомы из-за большого расстояния между ними практически не взаимодействуют друг с другом. Энергетические уровни примесных атомов не расщепляются и им соответствуют локальные уровни энергии – уровни доноров в запрещенной зоне вблизи зоны проводимости. При высокой концентрации атомов примеси энергетические уровни электронов атомов доноров расщепляются, образуется примесная зона, которая перекрывается с нижними уровнями у дна зоны проводимости полупроводника, такой полупроводник становится вырожденным.

Донорные примеси уже при комнатной температуре ионизированы. Достаточно небольшой энергии, чтобы электрон с уровня доноров перешел на свободный уровень зоны проводимости. В зоне проводимости появляются свободные электроны, концентрация которых, как правило, больше концентрации электронов, обусловленных термогенерацией электронно-дырочных пар. Общая концентрация свободных электронов в полупроводнике оказывается существенно больше концентрации дырок, и электроны становятся основными носителями заряда. Электропроводность полупроводника в этом случае в основном определяется перемещением электронов и называется электронной, а полупроводник – соответственно полупроводником n-типа.

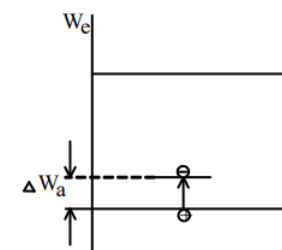
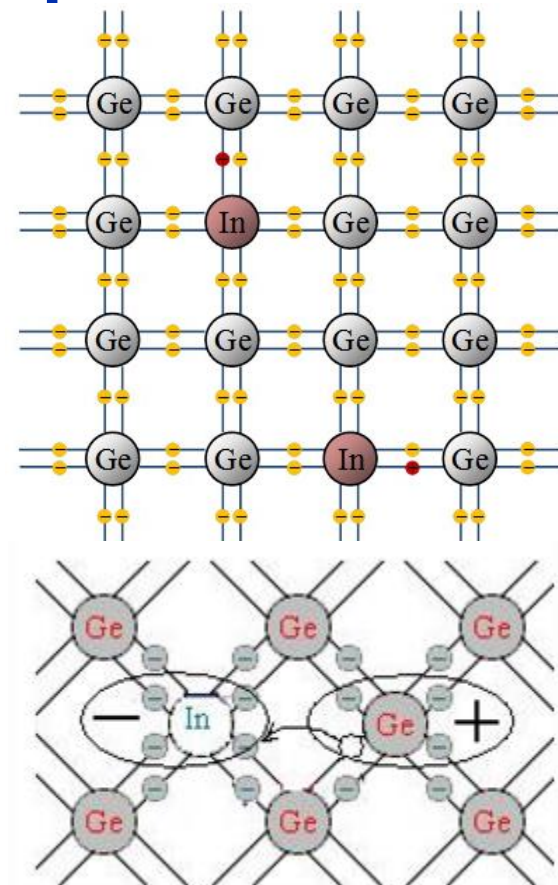


Донорные и акцепторные примеси

Полупроводники с акцепторной примесью. В качестве донорных примесей используются трехвалентные материалы (In – индий).

Для образования устойчивой оболочки из восьми отбирается электрон соседнего атома исходного полупроводника, у которого возникает незаполненная связь – дырка. Примесный атом становится неподвижным отрицательным ионом. На энергетической диаграмме появляется разрешенный энергетический уровень вблизи потолка валентной зоны – уровень акцепторов. На этот уровень уже при комнатной температуре могут переходить электроны из валентной зоны. В валентной зоне появляются свободные энергетические уровни, соответствующие дыркам.

В полупроводнике с акцепторными примесями свободных дырок существенно больше чем дырок, обусловленных термогенерацией. Электропроводность такого полупроводника в основном дырочная, и он называется полупроводником p-типа.



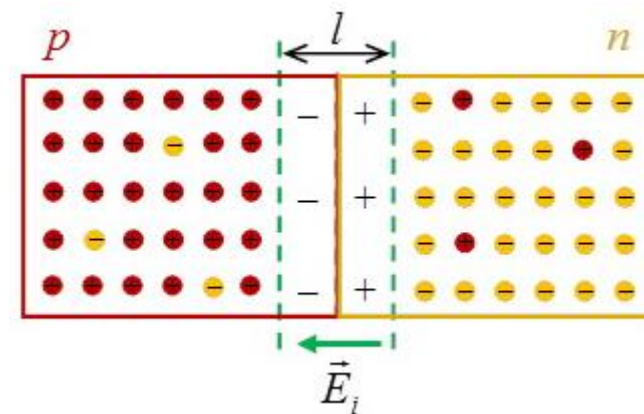
Электронно-дырочный переход и его свойства

- ✓ **Электронно-дырочным переходом** называется тонкий слой между двумя частями полупроводникового кристалла, в котором одна часть имеет электронную, а в другой дырочную электропроводность. Технологический процесс создания электронно-дырочного перехода может быть различным: *сплавление* (сплавные диоды), *диффузия* одного вещества в другое (диффузионные диоды), *эпитаксия* – ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (эпитаксиальные диоды) и др. По конструкции электронно-дырочные переходы могут быть симметричными и несимметричными, резкими и плавными, плоскостными и точечными и др.
- ✓ При равных концентрациях атомов акцепторов в р-области и атомов доноров в n-области (равенство количества основных носителей зарядов – электронов и дырок) р-n переход называется симметричным.
- ✓ Однако для всех типов переходов основным свойством является несимметричная электропроводность (число основных носителей заряда в одном полупроводнике значительно превосходит число основных носителей зарядов в другом полупроводнике), при которой в одном направлении кристалл пропускает ток, а в другом – не пропускает.

Электронно-дырочный переход и его свойства

Устройство р-n-перехода приведено на рисунке.

Одна часть перехода легирована донорной примесью и имеет электронную проводимость (n-область), другая легирована акцепторной примесью, имеет дырочную проводимость (р-область).



Благодаря тепловому движению электроны из полупроводника n-типа будут диффундировать в область р-типа. В области n-типа останется нескомпенсированный положительный ион донора. В области с дырочной проводимостью, электрон рекомбинирует с дыркой, а в области р-типа образуется нескомпенсированный ион акцептора.

Аналогично электронам дырки из области р-типа диффундируют в электронную область, оставляя в дырочной области нескомпенсированный отрицательно заряженный ион акцептора. Перейдя в электронную область, дырка рекомбинирует с электроном. В результате этого в электронной области образуется нескомпенсированный положительный ион донора.

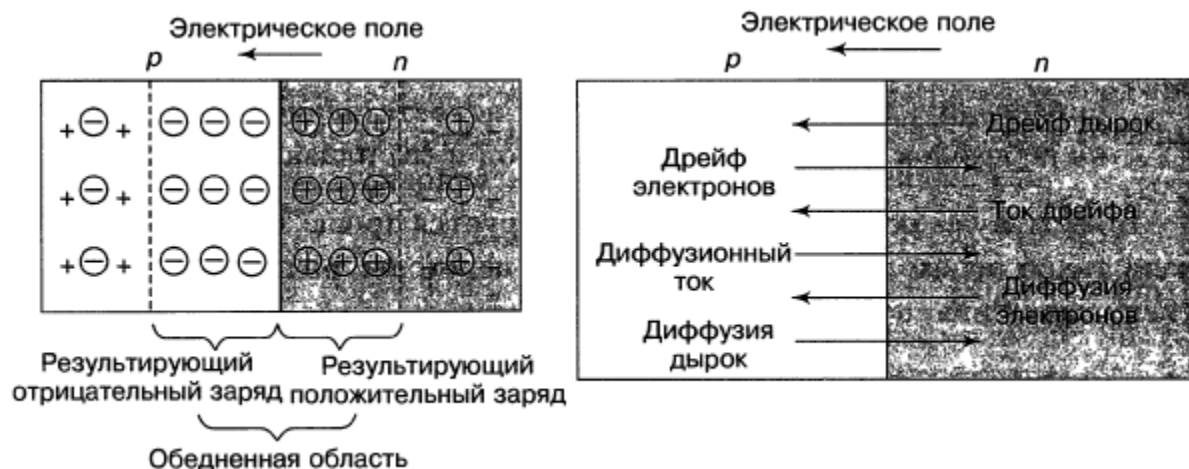
Электронно-дырочный переход и его свойства

Обедненная область имеет пространственный заряд, положительный на n - стороне и равный по величине отрицательный на p -стороне. Эти заряды в обедненной области создают электрическое поле.

Направление образованного поля таково, что оно препятствует диффузии основных носителей заряда, но способствует дрейфу неосновных носителей зарядов, т.е. электронов из p -стороны в направлении к n - области и дырок с n - стороны к p - области полупроводника. Это приводит к появлению тока дрейфа в дополнении к диффузионному току.

Движение электронов и дырок в противоположных направлениях создает электрический ток в одном направлении из-за их разноименных зарядов, и направление движения дырок совпадает с направлением электрического тока.

Диффузия и дрейф зарядов через переход продолжают развиваться до тех пор, пока диффузионный ток не станет равным дрейфовому току (полный ток становится равным нулю, достигается равновесие и завершается образование p - n – перехода).



Электронно-дырочный переход и его свойства

В результате диффузии на границе между этими областями образуется двойной электрический слой разноименно заряженных ионов, толщина / которого не превышает долей микрометра.

Между слоями ионов возникает электрическое поле с напряженностью E_j . Электрическое поле электронно-дырочного перехода (р-п-переход) препятствует дальнейшему переходу электронов и дырок через границу раздела двух полупроводников. Запирающий слой имеет повышенное сопротивление по сравнению с остальными объемами полупроводников.

Разновидности тока через р-п переход – диффузионный ток и ток дрейфа.

1. Диффузия зарядов, вызывающая **диффузионный ток**, имеет место как естественный процесс в любой системе, где существует градиент концентрации зарядов.

$$J_{diff(e)} = qD_e \frac{dn}{dx},$$

$J_{diff(e)}$ - диффузионный ток электронов

q – заряд электрона

D_e - коэффициент диффузии электронов

$\frac{dn}{dx}$ - градиент концентрации

Электронно-дырочный переход и его свойства

$$J_{diff(h)} = -qD_h \frac{dp}{dx},$$

$J_{diff(h)}$ - диффузионный ток дырок

D_h - коэффициент диффузии дырок

$\frac{dp}{dx}$ - градиент концентрации дырок

Т.о. суммарный диффузионный ток

$$J_{diff(total)} = J_{diff(e)} + J_{diff(h)}$$

2. Ток дрейфа

Движение носителей заряда под действием электрического поля создает ток, называемый током дрейфа.

$$J_{drift} = \sigma E$$

σ – удельная проводимость ($\sigma = qn\mu_n$), E – электрическое поле

$$J_{drift(e)} = -qn\mu_n E$$

$$J_{drift(h)} = qp\mu_p E$$

$$J_{drift(total)} = J_{drift(e)} + J_{drift(h)}$$

μ_n, μ_p - подвижность дырок и электронов.

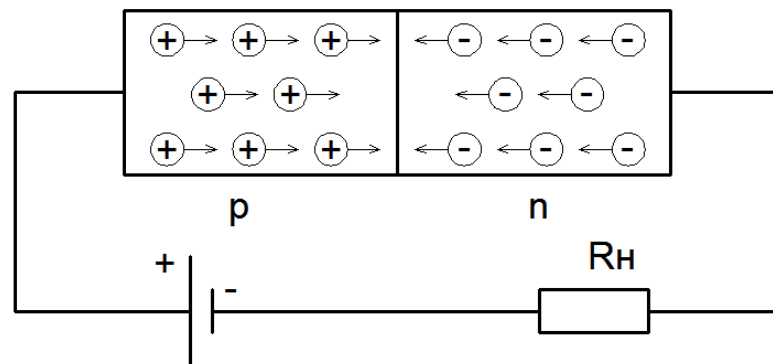
Прямое включение р-п перехода

На рисунке показана схема включения диода в прямом направлении.

Отрицательный вывод источника питания соединен с материалом n-типа, это заставляет электроны двигаться от вывода по направлению к р-п переходу. Свободные электроны, накопившиеся на р-стороне, притягиваются к положительному выводу. Это уменьшает количество отрицательных зарядов на р-стороне, потенциальный барьер уменьшается, что дает возможность для протекания тока. Ток может течь только тогда, когда приложенное напряжение превышает потенциальный барьер. Источник тока создает постоянный поток электронов, который дрейфует через материал n-типа вместе с содержащимися в нем электронами. Дырки в материале р-типа также дрейфуют по направлению к р-п переходу.

Электроны и дырки собираются на переходе и взаимно уничтожаются. Однако в то время как электроны и дырки взаимно компенсируются, на выводах источника питания появляются новые дырки и электроны. Большинство носителей продолжает двигаться по направлению к р-п переходу, пока приложено внешнее напряжение. Поток электронов через р-область диода притягивается к положительному выводу источника питания. Как только электроны покидают материал р-типа, создаются дырки, которые дрейфуют по направлению

к р-п переходу, где они взаимно компенсируются с другими электронами. Диффузионный ток через переход экспоненциально возрастает при увеличении прямого напряжения, приложенного к переходу, в следствие чего необходимо предусматривать меры по его ограничению.

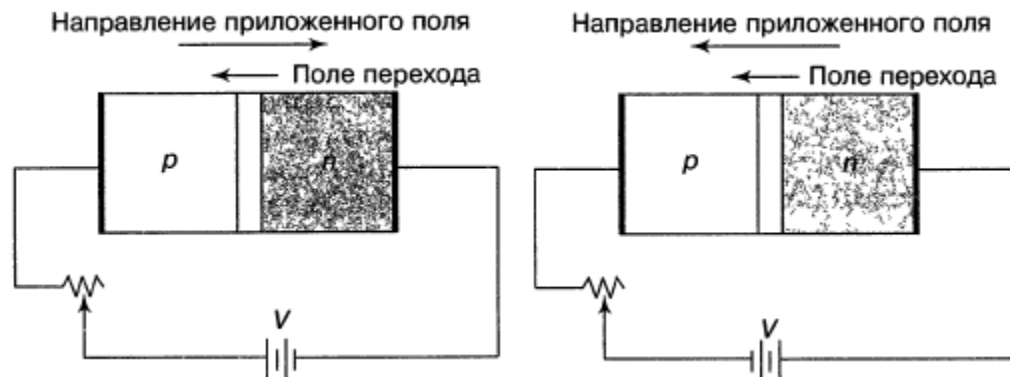
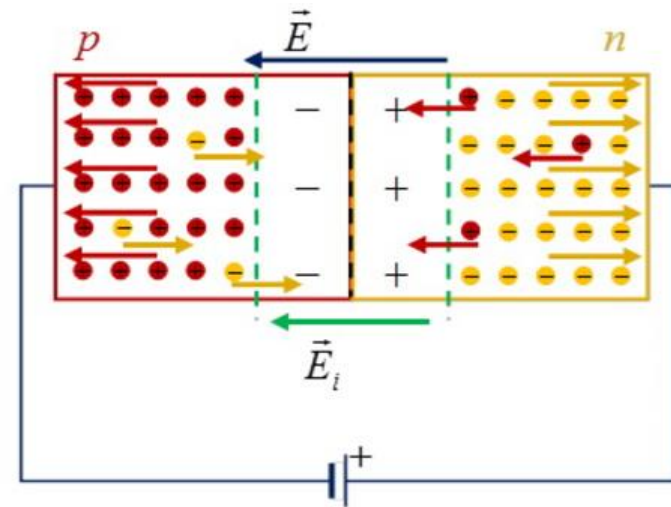




Обратное включение р-п перехода

Обратное напряжение на р-п переходе, когда «+» источника питания подключается к n-области, а «-» источника подключается к р-области приводит к увеличению потенциального барьера. Уже при небольших обратных напряжениях подавляющее большинство основных носителей заряда не могут преодолеть данный барьер.

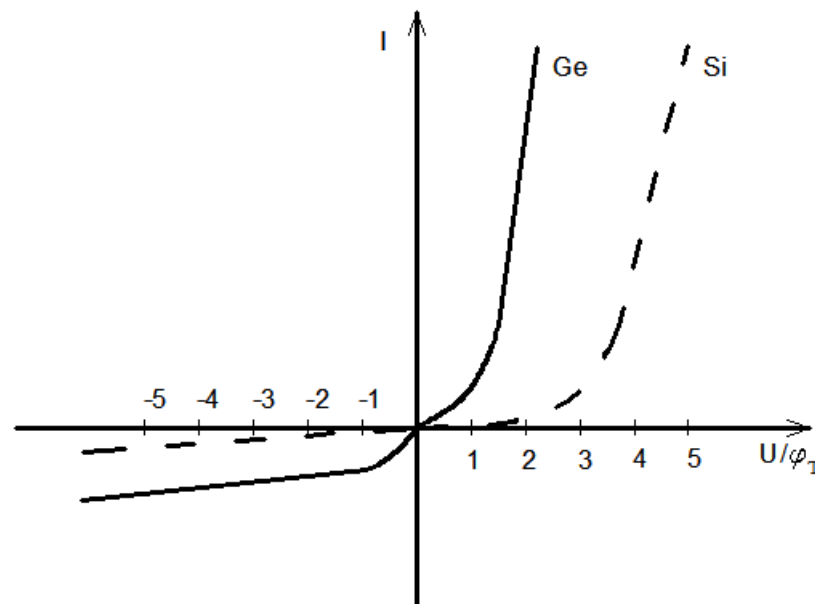
Диффузионная составляющая тока через переход уменьшается экспоненциально при увеличении обратного напряжения стремясь к нулю.



Вольт-амперная характеристика p-n перехода

Вольт-амперная характеристика (ВАХ)

электронно-дырочного перехода
приведена на рисунке.



ВАХ p-n перехода описывается аналитической функцией:

$$I_{p-n} = I_0 (e^{U/\varphi_T} - 1) = I_0 \left(\exp \frac{U}{\varphi_T} - 1 \right),$$

где

U — приложенное к переходу внешнее напряжение соответствующего знака;

$I_0 = I_m$ — обратный (тепловой) ток p-n перехода;

$\varphi_T = kT/q$ — температурный потенциал, где k - постоянная Больцмана, q - элементарный заряд (при $T = 300K$, $\varphi_T \approx 0,26 \text{ В}$).

Барьерная емкость р-п перехода

Наряду с электропроводностью р-п переход имеет определенную емкость. Емкостные свойства обусловлены наличием по обе стороны от границы электрических зарядов, которые созданы ионами примесей, а также подвижными носителями заряда, находящимися в области границы р-п перехода.

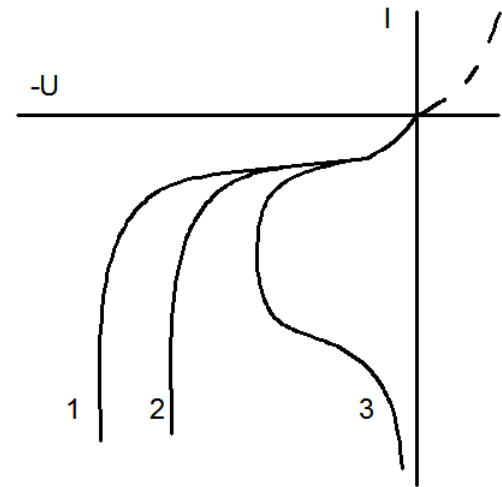
Емкость р-п перехода подразделяют на две составляющие: **барьерную**, отражающую перераспределение зарядов в р-п переходе, и **диффузионную**, отражающую перераспределение зарядов вблизи р-п перехода.

При **прямом смещении** перехода в основном проявляется **диффузионная емкость**, при **обратном** заряды вблизи р-п перехода (в базе) меняются мало и основную роль влияет **барьерная емкость**. Барьерная емкость обусловлена наличием в р-п переходе ионов донорной и акцепторной примеси, которые образуют как бы две заряженные обкладки конденсатора. При изменении запирающего напряжения, например увеличении, ширина р-п перехода увеличивается и часть подвижных носителей заряда (электронов в области n и дырок в области p) отсасывается электрическим полем от слоев, прилегающих к р-п переходу. Перемещение этих носителей заряда вызывает в цепи ток.

Диффузионная емкость отражает физический процесс изменения концентрации подвижных носителей заряда, накопленных в областях, в следствие изменения концентрации инжектированных носителей.

Пробой p-n перехода

- ✓ Под пробоем p-n перехода понимают значительное уменьшение обратного сопротивления, сопровождающееся возрастанием обратного тока при увеличении приложенного напряжения. Различают три вида пробоя: туннельный, лавинный и тепловой.
- ✓ В основе туннельного пробоя лежит туннельный эффект, т.е. просачивание электронов через потенциальный барьер, высота которого больше, чем энергия носителей заряда.
- ✓ Лавинный пробой вызывается ударной ионизацией, которая происходит тогда, когда напряженность электрического поля, вызванная обратным напряжением, достаточно велика.
- ✓ Тепловой пробой возникает в результате разогрева p-n перехода, когда количество теплоты выделяемой током в p-n переходе, больше количества теплоты, отводимой от него.
- ✓ На рисунке показаны виды пробоя p-n перехода: 1 – лавинный, 2 – туннельный, 3 – тепловой





Контрольные вопросы

1. Что понимают под электропроводностью?
2. Как по типу электропроводности подразделяются твердые вещества?
3. Что понимают под чистым полупроводником?
4. Какой полупроводник называется примесным?
5. От чего зависит проводимость примесных полупроводников?
6. Примеси какой валентности обеспечивают получение полупроводников p -типа?
7. Какие подвижные носители являются основными в полупроводнике n -типа?
8. Как меняется сопротивление примесных полупроводников при увеличении температуры?
9. Что такое $p-n$ - переход?
10. Чем вызвано наличие объемного заряда в $p-n$ - переходе?
11. Чем объясняется скачок потенциала на границе двух областей полупроводника с разным типом проводимости?
12. Какое включение $p-n$ - перехода называется обратным?
13. Как изменяется толщина $p-n$ - перехода при обратном включении?
14. Чем объясняется изменение толщины $p-n$ - перехода при включении внешнего источника?
15. Какими процессами определяется барьерная емкость $p-n$ - перехода?



Рекомендуемая литература:

1. [Белов Н. В., Волков Ю. С. Электротехника и основы электроники: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 432 с.: ил.](#)
2. [Бурбаева Н.В. Основы полупроводниковой электроники. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 312 с.](#)
3. [Иванов И. И., Соловьев Г. И., Фролов В. Я. Электротехника и основы электроники: Учебник. 7-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 736 с.: ил.](#)
4. [Смирнов Ю.А., Соколов С.В., Титов Е.В. Физические основы электроники: Учебное пособие. – 2-е изд., испр. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 560 с.: ил.](#)



Дополнительная литература:

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том I: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с.: ил.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.: ил.
3. П. Хорвиц, У. Хилл Искусство схемотехники. В 2 томах. Том 1. Издание 3-е, стереотипное. – Москва: Мир, 1985. – 600 с.: ил.
4. П. Хорвиц, У. Хилл Искусство схемотехники. В 2 томах. Том 2. Издание 3-е, стереотипное. – Москва: Мир, 1985. – 600 с.: ил.

Список использованных источников

1. Электроника. Теория и практика – 4-е издание.: Пер. с англ. / Саймон Монк, Пауль Шерц. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 1168 с.: ил.
2. Ханнанова В.Н. Математическая модель системы регулирования температуры внутри помещения. Вестник казанского технологического университета. т. 16, №18, 2013, с. 309-3013.
3. А.Н Шушура, К.В. Климов. Проектирование системы автоматического регулирования температуры в помещении при помощи программного пакета Matlab. Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС КМ 2014) . С. 613 - 618



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Спасибо за внимание!

Николаев Николай Анатольевич
nikolay.a.nikolaev@gmail.com