

Р-Н ПЕРЕХОД И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Бизюк Д.С., Тытуш Е.А. студенты гр.424403

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию р-п перехода – его структуры, принципов работы и ключевых характеристик. Рассмотрены основные области применения, включая диоды, солнечные элементы, биосенсоры и современные электронные устройства.

Ключевые слова. Р-п переход, полупроводниковые приборы, диоды, солнечные элементы, преобразование энергии, электронная техника, прямое смещение, диффузия.

Определение.

Совершенное соединение двух полупроводниковых монокристаллов с разными типами проводимости, созданное методами диффузии, эпитаксии или другими технологическими процессами, образует р-п переход, также известный как электронно-дырочный переход. Этот переход играет важнейшую роль в функционировании полупроводниковых устройств благодаря своим свойствам.

Основы работы р-п перехода.

Ключевое значение для р-п перехода имеет структура энергетических зон полупроводников. В материалах р-типа валентная зона, содержащая дырки как основные носители заряда, практически полностью заполнена, в то время как зона проводимости остается почти пустой (рис. 1). Для п-типа валентная зона полностью заполнена электронами, а зона проводимости включает свободные электроны, являющиеся основными носителями заряда (рис. 2). Между этими зонами располагается запрещенная зона, ширина которой для кремния составляет 1.1 электронвольт. Именно этот параметр критически важен для работы перехода.

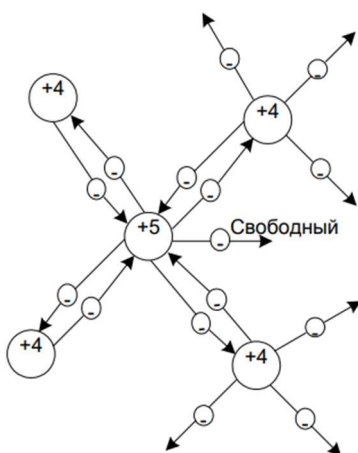


Рисунок 1 – Образование полупроводника n-типа

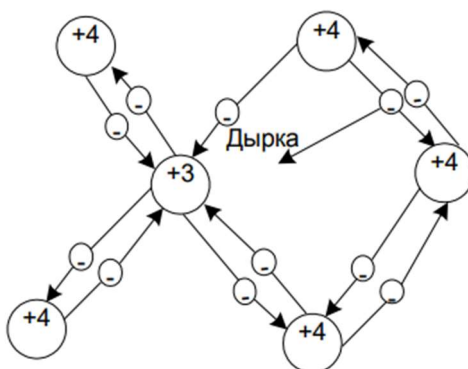


Рисунок 2 – Образование полупроводника р-типа

Создание проводящих областей.

Если в заранее очищенный расплав кремния или германия внести примесь элементов III группы (например, индия, галлия или бора), атомы примеси займут места атомов исходного полупроводника. Это приводит к созданию областей р-типа проводимости. Аналогично, добавление элементов V группы (например, фосфора, мышьяка) формирует области n-типа. Таким образом, в одной пластине полупроводника можно получить области с различными типами проводимости, что дает возможность сформировать р-n переход.

Динамика процессов в р-n переходе.

На границе перехода происходит диффузия: электроны из n-области переходят в р-область, оставляя в n-области неподвижные положительно заряженные ионы доноров. Одновременно дырки из р-области перемещаются в n-область, создавая отрицательный заряд за счет неподвижных ионов акцепторов. Это приводит к образованию слоя объемного заряда, обеднённого основными носителями, с противоположными зарядами по обе стороны перехода (рис. 3).

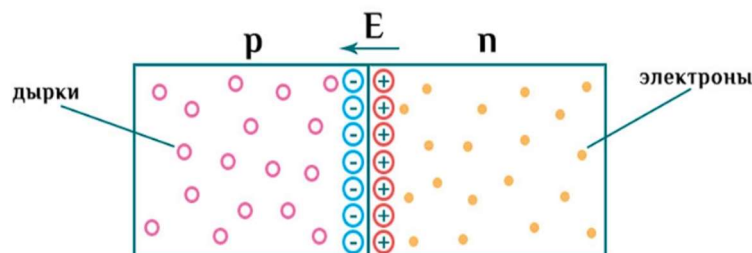


Рисунок 3 – Граница р-n перехода

Возникающее контактное электрическое поле препятствует дальнейшему движению основных носителей между областями. Это поле поддерживает состояние равновесия, при котором ток диффузии, вызванный тепловым движением носителей, и ток проводимости, обусловленный движением неосновных носителей, компенсируют друг друга.

Контактное поле и слои объемного заряда формируют барьерный слой, от которого зависит проводимость р-n перехода. Именно эти характеристики позволяют устройству функционировать как выпрямитель, транзистор или фотодиод в зависимости от приложенного внешнего напряжения.

Работа р-n перехода при внешнем напряжении.

Рассмотрим р-n переход, к которому приложено внешнее напряжение. Если напряжение имеет прямую полярность (р-область положительна относительно n-области), оно называется прямым смещением. В этом случае внешнее поле ослабляет внутреннее контактное поле перехода, что приводит к снижению потенциального барьера. В результате через переход начинают активно течь электроны из n-области и дырки из р-области. Их встречное движение создает значительный ток даже при небольшом напряжении (менее 1 В).

Принцип работы р-n перехода основан на динамическом изменении энергетических зон. Рассмотрим два состояния р-n перехода, к которому приложено внешнее напряжение: прямое смещение (рис. 4) и обратное смещение (рис. 5).

Прямое смещение:

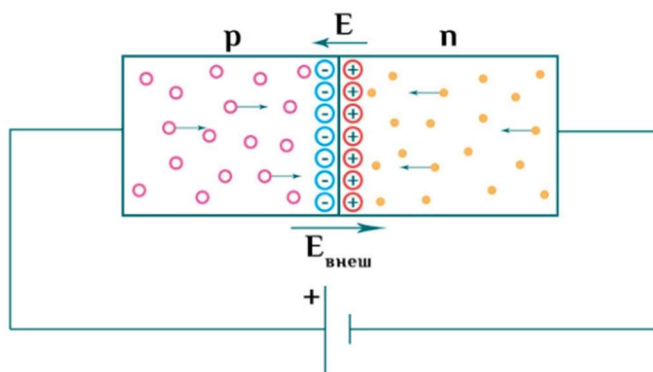


Рисунок 4 – Прямое смещение для р-n перехода

Р-n переход представляет собой полупроводниковую структуру, которая пропускает электроны только в одном направлении – из n-области в р-область. Для преодоления энергетического барьера обеднённой зоны электронам требуется дополнительная энергия. Такие устройства, работающие на основе р-n перехода, называются диодами и широко используются в электронике. При подаче прямого

смещения (положительного напряжения на р-область относительно n-области, как показано на рисунке 4) происходит понижение потенциального барьера. Это позволяет электронам из зоны проводимости n-типа свободно преодолевать переход и перемещаться в р-область. В результате в цепи возникает электрический ток, величина которого зависит от приложенного напряжения. В режиме прямого смещения наблюдаются характерные изменения в структуре перехода. Ширина обеднённой области значительно уменьшается по сравнению с равновесным состоянием. В р-области сохраняются положительные ионы, а внешний источник напряжения создает условия для направленного движения носителей заряда. Именно этот принцип лежит в основе работы большинства полупроводниковых приборов.

Обратное смещение:

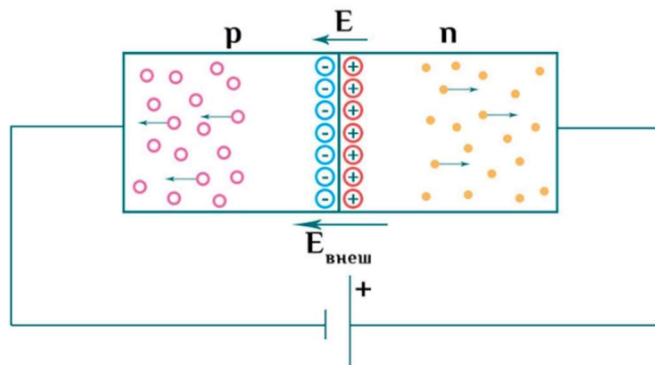


Рисунок 5 – Обратное смещение для р-п перехода

При подаче обратного смещения на р-п переход (рис. 5) происходит расширение обеднённой области и усиление разделения зарядов. Возникающий при этом повышенный энергетический барьер эффективно блокирует движение электронов через переход. В результате через диод практически не протекает электрический ток от р к n области.

Именно это свойство односторонней проводимости – способность пропускать ток только в одном направлении – стало революционным преимуществом полупроводниковых диодов. Оно позволило создать компактные и эффективные электронные устройства, полностью вытеснившие громоздкую вакуумную ламповую технологию. Сегодня этот принцип лежит в основе работы всех современных полупроводниковых приборов.

Таким образом, р-п переход обладает выпрямляющими свойствами: хорошо проводит ток при прямом смещении и почти не пропускает его при обратном. Это ключевой принцип работы диодов и многих других полупроводниковых приборов, заменивших устаревшие вакуумные технологии.

Применение р-п переходов в современных технологиях

Р-п переходы играют важную роль в современной электронике, становясь основой работы множества устройств, обеспечивая важнейшие функции для обработки и передачи электрических сигналов. Их уникальные характеристики находят применение в самых различных областях науки и техники.

Диоды

Полупроводниковый диод – это устройство, основанное на р-п переходе, которое пропускает ток только в одном направлении. Его конструкция включает две области: р-тип с дырочной проводимостью и n-тип с электронной проводимостью. Такой принцип работы позволяет диоду выполнять функцию выпрямления тока. Схематично полупроводниковый диод показан рисунке 6.

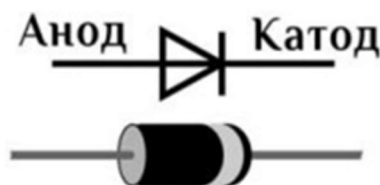


Рисунок 6 – Полупроводниковый диод

Существует несколько типов диодов, которые классифицируются в зависимости от их функций.

Выпрямительные диоды преобразуют переменный ток в постоянный и широко используются в блоках питания и зарядных устройствах.

Один из популярных вариантов – диодный мост, который состоит из четырёх диодов, соединённых так, чтобы выпрямлять оба полупериода переменного напряжения (рис. 7). Такая схема гарантирует направленность тока и позволяет получить стабильное постоянное напряжение.

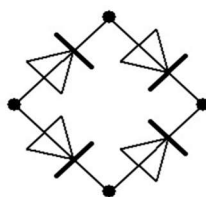


Рисунок 7 – Диодный мост

Импульсные диоды, которые работают в цифровых схемах и высокоскоростных устройствах, защищают электронные компоненты от скачков напряжения.

Стабилитроны, в свою очередь, поддерживают стабильное напряжение, а варикапы регулируют ёмкость в зависимости от приложенного напряжения.

Одной из ключевых характеристик диодов является показанная на рисунке 8 вольт-амперная характеристика (ВАХ), которая отражает зависимость тока от напряжения.

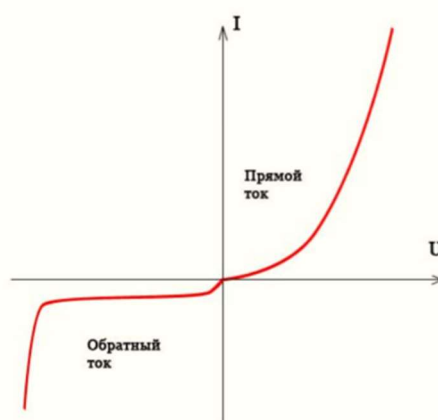


Рисунок 8 – ВАХ p-n перехода

При прямом напряжении ток увеличивается экспоненциально, а барьер p-n перехода ослабевает. При обратном напряжении ток остаётся минимальным, и наблюдается ток насыщения, который зависит от температуры и материала.

Солнечные батареи

Солнечные батареи – это одно из наиболее значимых применений p-n переходов, преобразующих солнечную энергию в электрическую. В основе их работы лежит фотоэлектрический эффект, возникающий в p-n переходе, когда при освещении происходит разделение электрон-дырка, генерируя электрический ток.

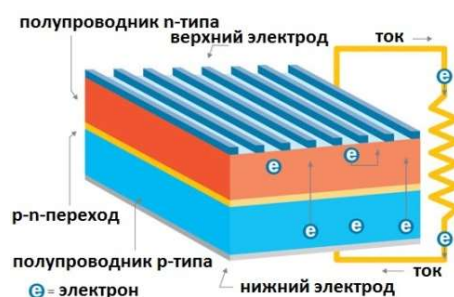


Рисунок 9 – Процесс преобразования солнечной энергии в электрическую

Солнечные элементы состоят из двух слоёв: области n-типа, где находятся свободные электроны, и области p-типа, где преобладают дырки. Эти два слоя формируют p-n переход, который определяет характеристики солнечных батарей. КПД современных кремниевых солнечных панелей, достигающий 15-22%, напрямую зависит от особенностей этого перехода.

Вентильный фотоэффект – это явление возникновения электродвижущей силы (или фотоэдс) при освещении структуры, состоящей из разнородных элементов. Составляющими такой структуры могут

быть два полупроводника с различным типом проводимости (р-п переход). Практическое применение солнечных батареи получили, когда на смену контактам Шоттки пришли сначала германиевые, а затем кремниевые фотоэлементы с р-п переходом, имеющие существенно более высокий к.п.д.. Коэффициент полезного действия батарей на основе гетероструктур из новых полупроводниковых материалов достигает 30 %.

Солнечные батареи используются как в космической технике, где важны надёжность и высокая производительность, так и в земных энергосистемах, обеспечивая экологически чистую и устойчивую энергию. Р-п переход позволяет эффективно преобразовывать солнечную энергию, открывая новые возможности для развития альтернативных источников энергии.

Биосенсоры и медицинская диагностика

Р-п переходы на основе пористого кремния и графена применяются в биосенсорах для диагностики, так как они чувствительны к поверхностным зарядам. Это позволяет точно обнаруживать биомолекулы, такие как ДНК или белки, для ранней диагностики заболеваний, обеспечивая персонализированный подход к лечению.

Нейроморфные вычисления

Нейроморфные вычисления ориентированы на создание систем, имитирующих работу мозга, с использованием мемристоров на основе р-п переходов, они регулируют движение заряда в мемристорах, позволяя им «запоминать» состояние, что делает их подходящими для хранения и обработки данных.

Фотокамеры в смартфонах

Современные камеры смартфонов используют р-п переходы, которые являются основой сенсоров, преобразующих свет в электрические сигналы. Эти переходы обеспечивают высокую светочувствительность, особенно при съёмке в условиях низкого освещения. Обратносвещённые CMOS-матрицы с р-п переходами увеличивают улавливаемое количество света, что улучшает светочувствительность и снижает шум в изображении. Р-п переходы остаются важной частью камер смартфонов, обеспечивая адаптацию к условиям съёмки и высокое качество фото.

Выводы

1. Р-п переход в полупроводниках образуется при помощи различных примесных веществ, донорного и акцепторного типа.
2. Основное свойство р-п перехода заключается в прохождении тока в одном направлении.
3. На основании свойств р-п перехода построено множество полупроводниковых приборов, таких как: диод, транзистор, светодиод, мемристор, элементы солнечных батарей, интегральные микросхемы. Таким образом, р-п переход играет важную роль в развитии современной электроники, улучшая функциональность существующих устройств.

Список использованных источников:

1. Шишкин Г.Г., Шишкин А.Г. *Электроника: учебник для бакалавров. 2-е изд.* – М.: Юрайт, 2015. – 703 с.
2. Парфенов В.В., Закиров Р.Х., Болтакова Н.В. *Изучение солнечной батареи.* – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2014. – 120 с.
3. Гременок В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б. *Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов.* – Минск: Белорусская наука, 2018. – С. 45-67.
4. Третьяков С.Д. *Современные технологии производства радиоэлектронной аппаратуры.* – М.: Техносфера, 2020. – 256 с.
5. Акимова Г.Н. *Электронная техника: учеб. пособие.* – СПб: Лань, 2017. – 180 с.
6. Бонч-Бруевич В.Л. *Применение полупроводниковых приборов в медицинской аппаратуре // Медицинская техника, 2019. – № 3. – С. 12-18.*
7. Иванов А.А., Петров С.К. *Перспективы развития микроэлектроники // Микроэлектроника, 2023. – № 4. – С. 34-45.*

P-N JUNCTION AND ITS APPLICATIONS

Bizyuk D.S., Tytush E.A.

students of group 424403

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics

Annotation. *This work is devoted to the study of the p-n junction – its structure, principles of operation and key characteristics. The main fields of application are considered, including diodes, solar cells, biosensors and modern electronic devices.*

Keywords. *P-n junction, semiconductor devices, diodes, solar cells, energy conversion, electronic engineering, forward bias, diffusion.*