

УДК 538.915

Шиллер Михаил Павлович

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Камалетдинова Алина Ильдаровна

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Иванова Олеся Сергеевна

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

Трандин Семён Евгеньевич

*Студент, УлГУ(Ульяновский государственный университет)
Россия, г. Ульяновск*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОМ ПЕРЕХОДЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Аннотация. В работе проводится теоретический анализ электронно-дырочного (p-n) перехода — основы современной полупроводниковой электроники. Целью является систематизация представлений о механизме формирования запирающего слоя и односторонней проводимости. Рассмотрены примесная проводимость полупроводников, образование контактной разности потенциалов, поведение перехода при прямом и обратном смещении. Приведено уравнение вольт-амперной характеристики. Результаты лежат в основе работы диодов, транзисторов и солнечных элементов.

Ключевые слова: полупроводник, p-n переход, дырка, примесная проводимость, запирающий слой, диод, вольт-амперная характеристика.

Shiller Mikhail Pavlovich

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Kamaletdinova Alina Ildarovna

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Ivanova Olesya Sergeevna

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

Trandin Semyon Evgenievich

*Student, ULSU(Ulyanovsk State University)
Ulyanovsk, Russia*

THEORETICAL ANALYSIS OF PHYSICAL PROCESSES IN THE ELECTRON-HOLE JUNCTION OF SEMICONDUCTORS

Abstract. The paper provides a theoretical analysis of the electron-hole (p-n) junction — the basis of modern semiconductor electronics. The goal is to systematize ideas about the mechanism of formation of the barrier layer and one-way conductivity. Impurity conductivity of semiconductors, the formation of the contact potential difference, and the behavior of the junction under forward and reverse bias are considered. The equation of the current-voltage characteristic is given. The results underlie the operation of diodes, transistors, and solar cells.

Keywords: semiconductor, p-n junction, hole, impurity conductivity, barrier layer, diode, current-voltage characteristic.

Введение

Полупроводниковые приборы составляют элементную базу всей современной электроники — от процессоров и систем связи до солнечной энергетики и освещения. В основе подавляющего большинства таких приборов лежит электронно-дырочный переход, или p-n переход, — область контакта двух полупроводников с разным типом проводимости.

Уникальность p-n перехода состоит в его способности пропускать электрический ток преимущественно в одном направлении. Эта односторонняя проводимость позволяет использовать переход для выпрямления переменного тока, детектирования сигналов, преобразования света в электричество и обратно, а также для усиления сигналов в составе транзисторов.

Актуальность изучения физики p-n перехода обусловлена тем, что понимание процессов на границе раздела полупроводников необходимо для проектирования диодов, транзисторов, светодиодов, фотодиодов и солнечных батарей, определяющих технический прогресс в области информатики и энергетики.

Целью данного исследования является теоретический анализ физических процессов, протекающих в электронно-дырочном переходе, и объяснение механизма его односторонней проводимости на основе представлений о примесной проводимости полупроводников.

Методы и теоретические основы

Чистые (собственные) полупроводники, такие как кремний и германий, обладают сравнительно низкой проводимостью. Однако введение даже малого количества примесей радикально изменяет их электрические свойства. При легировании пятивалентными элементами (донорами)

появляются избыточные свободные электроны, и образуется полупроводник n-типа. При легировании трёхвалентными элементами (акцепторами) возникают вакансии — дырки, ведущие себя как положительные носители заряда, и образуется полупроводник p-типа.

При создании контакта между областями p- и n-типа на границе начинается диффузия носителей заряда: электроны из n-области переходят в p-область, а дырки — в обратном направлении. В результате вблизи границы образуется обеднённый носителями заряда слой, по обе стороны которого возникают нескомпенсированные заряды ионов примесей: отрицательные в p-области и положительные в n-области.

Эти заряды создают внутреннее электрическое поле, направленное так, чтобы препятствовать дальнейшей диффузии. Возникает контактная разность потенциалов и так называемый запирающий (потенциальный) барьер. В равновесии диффузионный поток носителей уравнивается дрейфовым потоком, обусловленным внутренним полем, и суммарный ток через переход равен нулю.

Поведение перехода радикально зависит от полярности приложенного внешнего напряжения. При прямом смещении (плюс источника к p-области) внешнее поле ослабляет запирающий барьер, ширина обеднённого слоя уменьшается, и через переход начинает течь значительный ток, быстро растущий с увеличением напряжения.

При обратном смещении (плюс источника к n-области) внешнее поле, наоборот, усиливает барьер и расширяет обеднённый слой. Ток через переход становится крайне малым и определяется лишь неосновными носителями заряда (обратный ток насыщения). Зависимость тока от приложенного напряжения описывается уравнением вольт-амперной характеристики диода:

$$I = I_0 \cdot (\exp(eU / kT) - 1)$$

где I_0 — обратный ток насыщения, e — заряд электрона, U — приложенное напряжение, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Это уравнение количественно описывает резко несимметричную, нелинейную характеристику p-n перехода.

Результаты теоретического анализа

Анализ модели p-n перехода объясняет его ключевое свойство — одностороннюю проводимость. При прямом смещении ток экспоненциально возрастает с напряжением, тогда как при обратном смещении он остаётся пренебрежимо малым вплоть до напряжения

пробоя. Именно эта асимметрия позволяет использовать диод для выпрямления переменного тока.

Уравнение вольт-амперной характеристики показывает существенную зависимость свойств перехода от температуры: обратный ток насыщения быстро растёт с нагревом, что необходимо учитывать при проектировании надёжных электронных устройств. Температурная чувствительность перехода используется также в полупроводниковых датчиках температуры. Физика р-п перехода объясняет работу целого класса приборов. В светодиодах при прямом смещении происходит рекомбинация электронов и дырок с испусканием квантов света. В фотодиодах и солнечных элементах, наоборот, поглощённый свет генерирует электронно-дырочные пары, которые разделяются полем перехода, создавая фотоЭДС и преобразуя энергию света в электрическую.

Объединение двух р-п переходов в единой структуре приводит к созданию биполярного транзистора — прибора, способного усиливать электрические сигналы. Таким образом, относительно простая модель контакта двух полупроводников лежит в основе всей полупроводниковой схемотехники, включая интегральные микросхемы.

Заключение

Проведённый теоретический анализ подтверждает, что электронно-дырочный переход является фундаментальной структурой полупроводниковой электроники, а его односторонняя проводимость есть прямое следствие образования запирающего слоя на границе областей разного типа.

Основные выводы исследования:

Тип проводимости полупроводника определяется характером легирующей примеси — донорной (n-тип) или акцепторной (р-тип).

На границе р- и n-областей вследствие диффузии носителей образуется обеднённый запирающий слой с контактной разностью потенциалов.

Односторонняя проводимость перехода количественно описывается экспоненциальной вольт-амперной характеристикой и обусловлена изменением высоты потенциального барьера при смещении.

Перспективы дальнейших исследований связаны с анализом гетеропереходов и наноразмерных структур, на основе которых создаются современные высокоэффективные лазеры и солнечные элементы.

Использованные источники

Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. — М.: Наука, 1990. — 688 с.

Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 т. — М.: Мир, 1984. — 456 с.

Шалимова К.В. Физика полупроводников. — СПб.: Лань, 2010. — 400 с.

Елифанов Г.И. Физика твёрдого тела. — СПб.: Лань, 2011. — 288 с.