

РАБОТА 5

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Цель работы: снятие вольтамперной характеристики полупроводникового диода.

Полупроводниковый диод – полупроводниковый прибор с двумя выводами, принцип действия которого основан на использовании свойств электронно-дырочного перехода пропускать ток в одном направлении и практически не пропускать в противоположном направлении. Электронно-дырочный переход или $p-n$ -переход – электрический переход между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет проводимость p -типа (дырочного), а другая n -типа (электронного).

Для образования $p-n$ перехода нужно создать в кристалле с дырочной проводимостью область с электронной проводимостью (или, наоборот, в кристалле с электронной проводимостью область с дырочной проводимостью). Такую область создают путем введения примеси в процессе выращивания кристалла или атомы примеси вводят в готовый кристалл. Например, на кристалл германия n -типа накладывается индиевая «таблетка» (рис. 5.1, а). Эта система нагревается примерно при $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в вакууме или в атмосфере инертного газа; атомы трехвалентного индия диффундируют на некоторую глубину в германий. Затем расплав медленно охлаждают. Так как германий (Ge), содержащий индий (In), обладает дырочной проводимостью, то на границе закристаллизовавшегося расплава и германия n -типа образуется $p-n$ -переход (рис. 5.1, б).



Рис. 5.1.

Напомним, что *дырочная проводимость (проводимость p-типа)* возникает, когда в полупроводник вводят примесь, валентность которой на единицу меньше валентности основных атомов. *Полупроводники* с такой проводимостью называются *дырочными* (или *полупроводниками p-типа*). Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны полупроводника, называются *акцепторами*, а энергетические уровни этих примесей – *акцепторными уровнями*.

В полупроводниках с примесью, валентность которой на единицу больше валентности основных атомов, носителями тока являются электроны; возникает *электронная примесная проводимость (проводимость n -типа)*. Полупроводники с такой проводимостью называются *электронными* (или *полупроводниками n -типа*). Примеси, являющимися источником электронов, называются *донорами*, а энергетические уровни этих примесей – *донорными уровнями*.

Рассмотрим физические процессы, происходящие в p – n -переходе (рис. 5.2). Пусть донорный полупроводник (работа выхода — A_n , уровень Ферми — E_{Fn}) приводится в контакт (рис. 5.2, б) с акцепторным полупроводником (работа выхода — A_p , уровень Ферми — E_{Fp}). Электроны из n -полупроводника, где их концентрация выше, будут диффундировать в p -полупроводник, где их концентрация ниже. Диффузия же дырок происходит в обратном направлении — в направлении $p \rightarrow n$.

В n -полупроводнике из-за ухода электронов вблизи границы остается нескомпенсированный положительный объемный заряд неподвижных ионизованных донорных атомов. В p -полупроводнике из-за ухода дырок вблизи границы образуется отрицательный объемный заряд неподвижных ионизованных акцепторов (рис. 5.2, а). Эти объемные заряды образуют у границы двойной электрический слой, поле которого, направленное от n -области к p -области, препятствует дальнейшему переходу электронов в направлении $n \rightarrow p$ и дырок в направлении $p \rightarrow n$. Если концентрация доноров и акцепторов в полупроводниках n - и p -типа одинаковы, то толщины слоев d_1 и d_2 (рис. 5.2, в), в которых локализируются неподвижные заряды, равны ($d_1 = d_2$).

При определенной толщине p – n -перехода наступает равновесное состояние, характеризуемое выравниванием уровней Ферми для обоих полупроводников (рис. 5.2, в). В области p – n -перехода энергетические зоны искривляются, в результате чего возникают потенциальные барьеры как для электронов, так и для дырок. Высота потенциального барьера определяется первоначальной разностью положений уровня Ферми в обоих полупроводниках. Все энергетические уровни акцепторного полупроводника подняты относительно уровней донорного полупроводника на высоту, равную $e\varphi$, причем подъем происходит на толщине двойного слоя d .

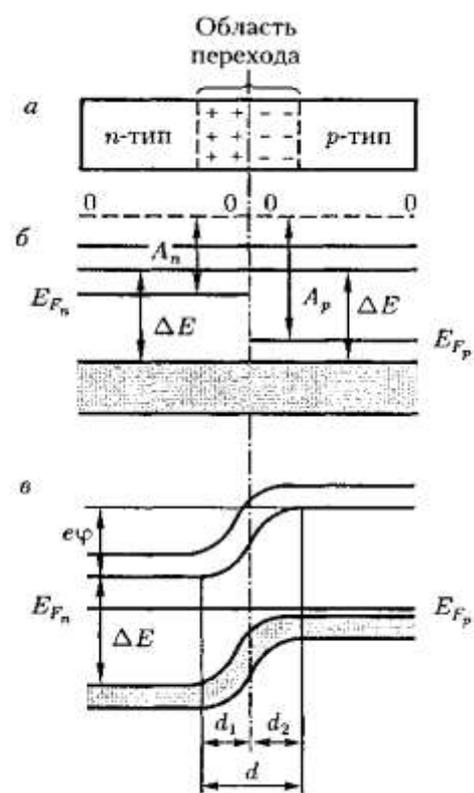


Рис. 5.2

Толщина d слоя p - n -перехода в полупроводниках составляет примерно в 10^{-6} - 10^{-7} м, а контактная разность потенциалов — десятые доли вольт. Носители тока способны преодолеть такую разность потенциалов лишь при температуре в несколько тысяч градусов, т. е. при обычных температурах равновесный **контактный слой** является **запирающим** (характеризуется повышенным сопротивлением).

Сопротивление запирающего слоя можно изменить с помощью внешнего электрического поля. Если приложенное к p - n -переходу внешнее электрическое поле направлено от n -полупроводника к p -полупроводнику (рис. 5.3, а), т. е. совпадает с полем контактного слоя, то оно вызывает движение электронов в n -полупроводнике и дырок в p -полупроводнике от границы p - n -перехода в противоположные стороны. В результате запирающий слой расширится и его сопротивление возрастет. **Направление внешнего поля**, расширяющего запирающий слой, называется **запирающим (обратным)**. В этом направлении электрический ток через p - n -переход практически не проходит. Ток в запирающем слое в запирающем направлении образуется лишь за счет неосновных носителей тока (электронов в p -полупроводнике и дырок в n -полупроводнике).

Если приложенное к p - n -переходу внешнее электрическое поле направлено противоположно полю контактного слоя (рис. 5.3, б), то оно вызывает движение электронов в n -полупроводнике и дырок в p -полупроводнике к границе p - n -перехода навстречу друг другу. В этой области они рекомбинируют, толщина контактного слоя и его сопротивление уменьшаются. Следовательно, в этом **направлении** электрический ток проходит сквозь p - n -переход в направлении от p -полупроводника к n -полупроводнику; оно называется **пропускным (прямым)**. Таким образом, p - n -переход обладает **односторонней проводимостью**.

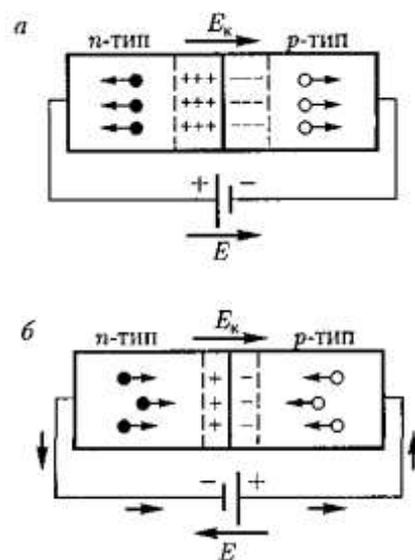


Рис. 5.3

На практике используются, главным образом, несимметричные переходы, в которых концентрация дырок в полупроводнике p -типа больше концентрации электронов в полупроводнике n -типа или наоборот, причем различие в концентрациях может составлять 100-1000 раз. Низкоомная область, сильно легированная примесями называется эмиттером; высокоомная, слабо легированная — базой.

Зависимость силы тока от разности потенциалов на электродах называется вольтамперной характеристикой полупроводникового диода (ВАХ). Пример ВАХ для одного из диодов приведен на рис. 5.4.

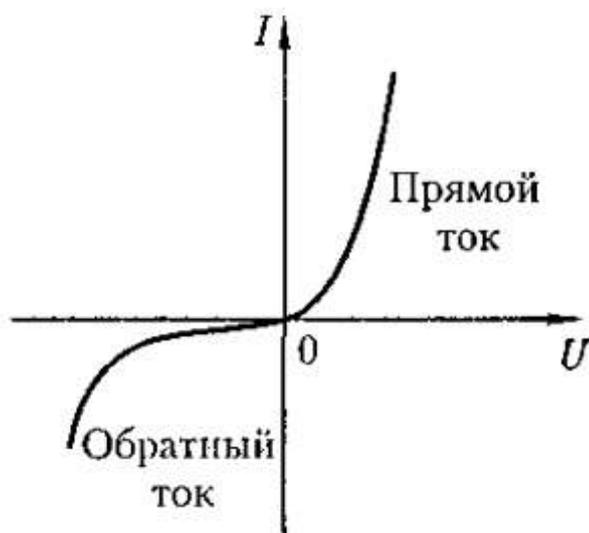


Рис. 5.4. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода.

Как уже указывалось, при пропускном (прямом) напряжении внешнее электрическое поле способствует движению основных носителей тока к границе *p-n*-перехода (рис. 5.3, б). В результате толщина контактного слоя уменьшается. Соответственно уменьшается и сопротивление перехода (тем сильнее, чем больше напряжение), а сила тока становится большой (правая ветвь на рис. 5.4). Это *направление тока* называется *прямым*.

При запирающем (обратном) напряжении внешнее электрическое поле препятствует движению основных носителей тока к границе *p-n*-перехода (рис. 5.3, а) и способствует движению неосновных носителей тока, концентрация которых в полупроводниках невелика. Это приводит к увеличению толщины контактного слоя, обедненного основными носителями тока. Соответственно увеличивается и сопротивление перехода. Поэтому в данном случае через *p-n*-переход протекает только небольшой ток (он называется *обратным*), полностью обусловленный неосновными носителями тока (левая ветвь на рис. 5.4). Лишь при очень большом обратном напряжении сила тока начинает резко возрастать (левая ветвь), что обусловлено электрическим пробоем перехода и его разрушением. Каждый *p-n*-переход характеризуется своим предельным значением обратного напряжения, которое он способен выдержать без разрушения.

Рассмотрим влияние некоторых факторов на прямую ветвь ВАХ диода.

При увеличении температуры диода уменьшается высота потенциального барьера и изменяется распределение носителей заряда по энергиям (электроны, например, занимают более высокие энергетические уровни в зоне проводимости). Из-за этих двух причин прямой ток через диод увеличивается с ростом температуры при неизменном прямом напряжении.

Если сравнить прямые ветви двух диодов, изготовленных из разных материалов, с разной шириной запрещенной зоны, то у диода из материала с большей шириной запрещенной зоны

будет больше высота потенциального барьера. Следовательно, прямой ток через диод из материала с большей шириной запрещенной зоны будет меньше при том же прямом напряжении.

С увеличением концентрации примесей в прилегающих к *p-n*-переходу областях будет увеличиваться высота потенциального барьера перехода, а значит, будет меньше прямой ток при том же прямом напряжении.

Неодинаковость сопротивления в прямом и обратном направлениях позволяет использовать полупроводниковые диоды для выпрямления переменного электрического тока в различных радиотехнических устройствах – радиоприемниках, магнитофонах, телевизорах и т.п., поскольку по сравнению с лампами, используемыми для этого ранее, они обладают рядом преимуществ: малые размеры и масса, высокая механическая прочность, длительный срок службы. Диоды, рассчитанные на сильные токи, используются для выпрямления переменных токов на тяговых подстанциях, питающих электротранспорт.

Существенный недостаток полупроводниковых диодов – зависимость их параметров от температуры. Они не могут работать при температуре ниже $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ из-за возрастания удельного сопротивления полупроводниковых приборов с понижением температуры. При температурах выше $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ для германиевых и $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ для кремниевых диодов рабочие параметры резко ухудшаются из-за возрастания влияния собственной проводимости полупроводниковых материалов.

Методика выполнения работы

Измерения проводятся по схемам, приведенным на рис. 5.5 и 5.6, в которые входят полупроводниковый диод, источник питания – ИП, вольтметр, мили- или микроамперметр.

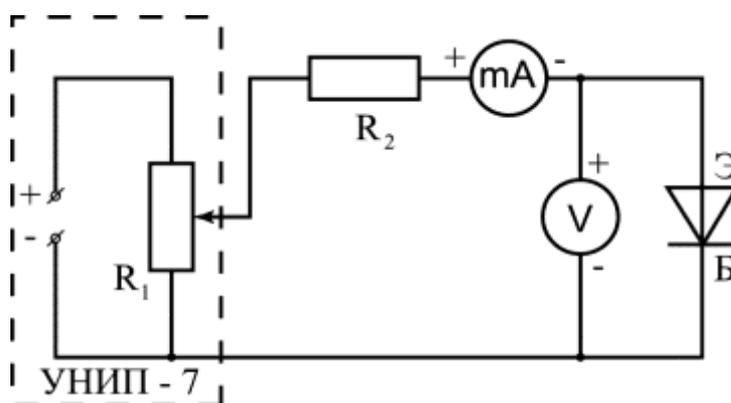


Рис. 5.5

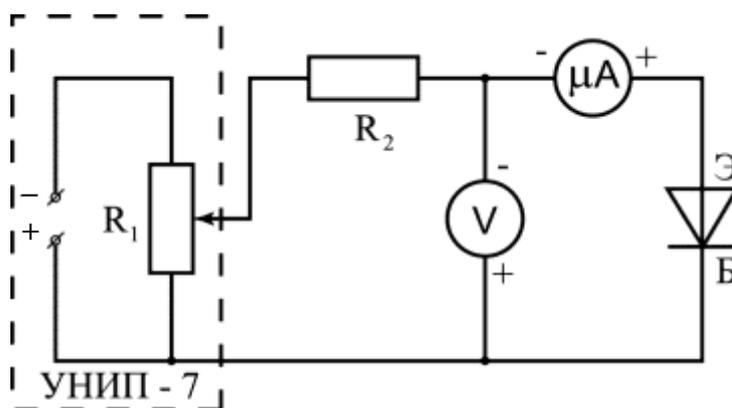


Рис. 5.6

Подготовка к работе

1) Начертите в лабораторном журнале схему измерений и составьте таблицу приборов и принадлежностей.

Приборы и принадлежности	Технические характеристики

2) Заготовьте в лабораторном журнале две таблицы для записи экспериментальных данных (табл. 5.1 и табл. 5.2).

Таблица 5.1. Измерение тока в зависимости от напряжения на диоде при $U > 0$.

U, В								
I, мА								

Таблица 5.2. Измерение тока в зависимости от напряжения на диоде при $U < 0$.

U, В								
I, мкА								

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с рабочей схемой соответствующей рис. 5.5 и дополнительными инструкциями на рабочем стенде. Схему не разбирать. В схеме используется УНИП-7, в цепи диода – миллиамперметр и вольтметр; R_1 – реостат (вмонтирован в источник питания УНИП-

7). R_2 – устанавливается на магазине сопротивлений. Обратите внимание, для какого тока (прямого или обратного) собрана схема. Для измерения тока используется цифровой прибор.

2. Заполните таблицу приборов и принадлежностей.

3. Снимите зависимость силы прямого тока от приложенного к нему напряжения. Сила тока, идущего через диод, не должна превышать 30мА , прямое напряжение на диоде не превышает 1В . Результаты измерений занесите в табл. 5.1.

4. Переключите контакты на выходе источника питания УНИП-7, цифровой прибор на диапазон микроамперметра и вольтметр на шкалу 30В . Обратите внимания на знаки «+» и «-» диода (схема на рис.5.6)

5. Снимите обратную характеристику диода. Обратное напряжение на диоде не должно превышать 10В . Увеличивая напряжение потенциометром R_1 запишите значения напряжения и силы тока в табл. 5.2.

6. По данным табл. 5.1 и 5.2 постройте прямую и обратную вольтамперную характеристику диода, т.е. зависимость силы тока от приложенного напряжения. Силу прямого тока, прямое напряжение считайте положительными, а обратное – отрицательными.

По оси абсцисс отложите напряжение в вольтах, по оси ординат – силу тока в миллиамперах. Рекомендуется выбрать масштаб для прямого напряжения $1\text{см} - 0,2\text{В}$, для обратного $1\text{см} - 1\text{В}$, масштаб для силы прямого тока $1\text{см} - 10\text{мА}$, для обратного $1\text{см} - 1\text{мкА}$.

7. Напишите **Заключение к работе**.

Контрольные вопросы

1. Что такое полупроводник n -типа? p -типа?
2. Расскажите о физических процессах, происходящих в $p-n$ переходе при включении его в прямом и обратном направлениях.
3. Как изменяется сопротивление диода с увеличением напряжения?
4. Каким образом необходимо включить в электрическую цепь последовательно с лампой полупроводниковый диод, чтобы лампа ярко горела?
5. Почему ограничено применение полупроводниковых диодов при высоких напряжениях?
6. Каким образом влияет увеличение температуры на прямой ток через диод при неизменном прямом напряжении?
7. Сравнить ВАХ двух полупроводниковых диодов, изготовленных из материалов с разной шириной запрещенной зоны, при неизменном прямом напряжении.
8. Как влияет увеличение концентрации примесей в прилегающих к $p-n$ -переходу областях на прямой ток при одинаковом прямом напряжении?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики в 5 кн. Книга 5. М. : Наука. Физматлит. 1998. § 9.5.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. Пособие для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2006. §§ 242-250.
3. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. 6-е изд., СПб.: Издательство «Лань». 2002.