

**Специализированный учебно-научный центр -
факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,
Школа имени А.Н. Колмогорова
Кафедра физики**

Общий физический практикум

Лабораторная работа №3.6

Изучение полупроводникового диода

Составитель Т.П. Корнеева

2011 г.

Изучение полупроводникового диода

Цель работы:

1. Получение вольтамперной характеристики полупроводникового диода.
2. Знакомство с техническими схемами применения полупроводниковых диодов для выпрямления переменного тока.
3. Наблюдение вольтамперной характеристики полупроводникового диода на экране осциллографа.

Приборы и оборудование:

- 1) панель, на которой расположены полупроводниковые диоды и резисторы;
- 2) вольтметр (V), микроамперметр (μA), миллиамперметр (mA);
- 3) источник регулируемого постоянного напряжения;
- 4) источник переменного напряжения;
- 5) осциллограф.

Теоретическое введение.

1. Устройство полупроводникового диода.

Полупроводниковый диод - составная часть современных электронных схем. Работа полупроводникового диода основана на свойствах $p-n$ перехода.

Когда кристалл полупроводника легирован (снабжен примесями) так, что одна его часть имеет проводимость p -типа (акцепторная примесь), а другая – проводимость n -типа (донорная примесь), то на границе между этими частями

возникает слой с особыми свойствами, который и называется $p-n$ переходом или электронно-дырочным переходом.

Существует много способов получения $p-n$ переходов, но для всех способов характерен один общий прием. Берется кристалл полупроводника p - или n -типа. Затем каким-либо способом в кристалл вводятся примеси, проникающие на определенную глубину в данном полупроводнике, и создающие примесь противоположного характера. Если исходно кристалл был n -типа, вводится акцепторная примесь, если p -типа – то донорная. Примесь вводится в кристалл в концентрации большей, чем в исходном полупроводнике. Поэтому в той части кристалла, куда попала примесь, тип проводимости изменяется.

На границе между областью, где тип проводимости в кристалле изменился, и областью, где он остался исходным, возникает $p-n$ переход.

В германиевом диоде, который исследуется в данной задаче, $p-n$ переход образуется в монокристаллической пластинке слаболегированного германия (Ge) с проводимостью n -типа при вплавлении в него капли индия (In) - металла, выполняющего роль акцепторной примеси.

Пластинка германия припаяна к металлическому корпусу, защищающему кристалл от внешних воздействий. Один контактный вывод соединен с пластинкой германия, второй контактный вывод соединен с каплей индия и изолирован от металлического корпуса.

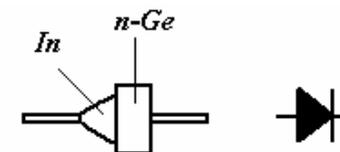


Рис. 1.

Схема и условное обозначение полупроводникового диода.

2. Примесная проводимость полупроводников

Пусть в кристалл германия (Ge) каким-то образом попал атом мышьяка (As) и занял место в одном из узлов кристаллической решетки. Германий принадлежит к четвертой группе элементов в таблице Менделеева, мышьяк принадлежит к пятой группе и имеет пять валентных электронов. Четыре валентных электрона займут свое место в ковалентных связях с атомами германия, а пятый электрон будет удерживаться атомом мышьяка очень слабо. Энергия E_d , которая нужна, чтобы разорвать связь этого пятого электрона со своим атомом, составляет всего 0,05 эВ, в то время, как энергия E_g , требуемая для создания электронно-дырочной пары в кристалле германия, равна 0,72 эВ. Заметим также, что при комнатной температуре средняя энергия теплового движения порядка $kT \approx 0,026$ эВ.

Все это означает, что отрыв пятого электрона от атома мышьяка происходит с гораздо большей вероятностью, чем образование электронно-дырочных пар из ковалентных связей атомов германия. Электрон, потерявший связь со своим атомом, становится «свободным», т.е. может перемещаться по всему кристаллу в пространстве между атомами, а атом мышьяка без пятого электрона превращается в положительно заряженный ион, закрепленный в узле кристаллической решетки (Рис.2).

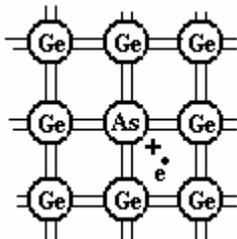


Рис. 2

Возникновение примесной электронной проводимости

Заметим, что образование свободного электрона в этом случае не сопровождается появлением дырки, т.к. энергия связи электронов с атомами германия существенно превышает энергию связи пятого валентного электрона с атомом мышьяка.

При концентрации примесей $N_d \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (одна десяти-миллионная доля всех атомов) концентрация электронов проводимости n_d , обусловленная наличием примеси, при комнатной температуре составляет примерно $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При этом концентрация собственных электронов (образовавшихся при разрыве ковалентных связей) составляет $n_i \approx 2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Примеси, обеспечивающие дополнительные электроны проводимости, носят название *донорные* примеси, а полупроводник, имеющий электронную примесную проводимость, называют *электронным полупроводником* или *полупроводником n-типа*.

При рассмотрении примесной проводимости необходимо остановиться еще на одном вопросе.

В собственном (чистом) полупроводнике концентрации свободных носителей – электронов (n_i) и дырок (p_i) – равны друг другу:

$$n_i = p_i = n_0.$$

Вероятность $\Psi_{\text{ген}}$ образования электронно-дырочной пары за счет энергии хаотического теплового движения определяется только температурой и описывается формулой Больцмана:

$$\Psi_{\text{ген}} \sim \exp(-E_g / kT).$$

Наряду с процессом генерации (образования) электронно-дырочных пар происходит и процесс их рекомбинации (исчезновения). Вероятность рекомбинации электронно-дырочной пары пропорциональна произведению концентраций электронов и дырок:

$$\Psi_{\text{рек}} \sim n_i \cdot p_i = n_0^2(T).$$

В равновесном состоянии при заданной температуре концентрация свободных носителей в полупроводнике остается неизменной, а это означает, что электронно-дырочные пары рождаются и исчезают с одинаковой вероятностью:

$$\Psi_{\text{рек}} = \Psi_{\text{ген}}$$

Из этого следует, что $n_0^2 \sim \exp(-E_g / kT)$, и концентрация свободных носителей заряда в собственных полупроводниках зависит только от температуры:

$$n_0 = A \exp(-E_g / 2kT).$$

Вернемся теперь к полупроводнику с донорной примесью. Внутри такого кристалла так же, как и в собственном полупроводнике, происходят процессы генерации и рекомбинации электронно-дырочных пар, и в равновесном состоянии концентрация свободных носителей не меняется со временем. Только теперь вероятность рекомбинации пропорциональна произведению новых значений равновесных концентраций носителей:

$$\Psi_{\text{рек}} \sim p \cdot n$$

Но по-прежнему должно выполняться условие $\Psi_{\text{рек}} = \Psi_{\text{ген}}$, а т.к. вероятность генерации осталась прежней, это означает что для равновесных значений концентраций выполняется соотношение:

$$p \cdot n = n_0^2(T).$$

Так, если концентрация свободных электронов вследствие наличия примеси возросла в 1000 раз по сравнению с концентрацией носителей n_0 в чистом полупроводнике, то концентрация дырок в 1000 раз уменьшилась. На основании этого с полным правом можно говорить об исключительно электронной проводимости в полупроводнике n -типа. Говорят, что электроны являются *основными*, а дырки – *неосновными* носителями заряда в таких полупроводниках.

Аналогичные рассуждения можно провести, если рассматривать кристалл германия с примесью атомов трехвалентного элемента, например, индия (In).

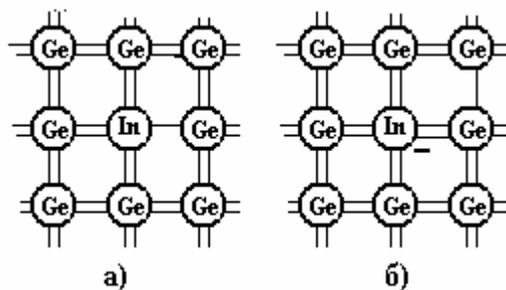


Рис. 3

Возникновение примесной дырочной проводимости

У атома индия не хватает одного электрона для образования полноценной ковалентной связи с четырьмя соседними атомами германия (Рис.3а). Такая связь может быть установлена, если вакантное место (дырку) займет электрон из соседней валентной связи (Рис.3б). Затем новое вакантное место займет случайным образом еще какой-нибудь электрон из соседних связей, и дырка начнет свои блуждания по кристаллу. При этом *атом индия превращается в отрицательный ион*, занимающий определенное место в кристаллической решетке.

Примеси, обеспечивающие дополнительное количество дырок, носят название *акцепторные* примеси, а полупроводник, имеющий дырочную примесную проводимость, называют *дырочным* или *полупроводником p -типа*.

Концентрация возникающих из-за наличия акцепторной примеси дырок обычно во много раз превышает концентрацию собственных носителей, что приводит к резкому уменьшению концентрации электронов проводимости, а дырки становятся основными носителями заряда в полупроводнике p -типа.

Заметим, что как атомы донорной, так и атомы акцепторной примесей не сообщают исходному полупроводнику никакого дополнительного электрического заряда, и кристаллы как n -, так и p -типа электрически нейтральны.

3. Свойства p - n перехода

Когда в одной части полупроводникового кристалла (в нашем случае - германия) концентрация свободных электронов существенно выше, чем в другой его части, неизбежно возникает диффузионный поток электронов из области проводимости n -типа в область p -типа.

Ушедшие из n -области электроны оставляют в этой части кристалла нескомпенсированный положительный заряд ионов донорной примеси. Попадая в p -область, электроны почти сразу рекомбинируют с дырками, в результате чего вблизи границы

образуется область нескомпенсированного отрицательного заряда ионов акцепторной примеси.

Точно также и дырки, диффундирующие из области p -типа в область n -типа, оставляют после себя отрицательный заряд ионов акцепторной примеси и, рекомбинируя с электронами в n -области, вызывают появление там нескомпенсированного положительного заряда ионов донорной примеси.

В результате вблизи границы между областями с разным типом проводимости образуется двойной заряженный слой - отрицательный со стороны p -области и положительный со стороны n -области (Рис.4).

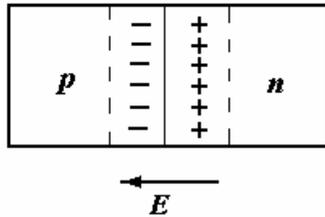


Рис. 4

Возникновение двойного электрического слоя на границе между p - и n -областями.

Внутри двойного электрического слоя существует электрическое поле E . Это поле направлено так, что на свободный электрон, оказавшийся внутри этого слоя, действует сила, «выталкивающая» его в n -область, а дырки, соответственно, «выталкиваются» в p -область. Это приводит к тому, что область p - n перехода оказывается обедненной свободными носителями заряда, что, в свою очередь, приводит к резкому возрастанию электрического сопротивления в этой области.

Наличие электрического поля E означает также, что для движения основных носителей (дырок из p - в n -область и электронов из n - в p -область) существует потенциальный барьер. Величина этого барьера устанавливается в результате двух конкурирующих процессов: диффузионного потока

основных носителей против поля E и потока, обусловленного рассмотренным выше действием поля. В стационарном состоянии эти два потока скомпенсированы.

Для различных полупроводников высота потенциального (энергетического) барьера различна. Так, для германия она составляет $\sim 0,7$ эВ, для кремния ~ 1 эВ, для арсенида галлия (GaAs) высота потенциального барьера $\sim 1,4$ эВ.

Поскольку подавляющая часть электронов проводимости и, соответственно, дырок имеет энергию порядка kT (что составляет $\sim 0,026$ эВ при комнатной температуре), ясно, что подавляющая часть носителей не способна преодолеть энергетический барьер.

Существует, однако, очень небольшая часть основных свободных носителей (дырок в p -области и электронов в n -области), для которых энергия теплового движения превышает высоту энергетического барьера, что приводит к возникновению диффузионного тока таких «энергичных» носителей из p - в n -область. Поскольку в стационарном состоянии (при отсутствии каких-либо внешних факторов) внутри полупроводника не могут существовать какие-либо нескомпенсированные потоки частиц, то должен существовать встречный ток, и такой ток действительно существует.

Дело в том, что помимо основных носителей, в полупроводнике существуют в небольшой концентрации неосновные носители заряда – электроны в p -области и дырки в n -области. Для этих носителей электрическое поле внутри барьера не только не препятствует их переходу из одной области в другую, но даже способствует этому. Величина тока неосновных носителей определяется только их концентрацией, так что данный ток является током насыщения, т.е. максимально возможным и не зависящим от величины внутреннего поля барьера E .

Заметим при этом, что, поскольку величина тока насыщения определяется равновесной концентрацией неосновных носителей, то для нее характерна сильная зависимость от температуры. Так, для германиевого диода

повышение температуры от комнатной до $+80^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению плотности тока примерно в 60 раз, поэтому для германиевых диодов рабочая температура не должна превышать значение $+80^{\circ}\text{C}$.

Все вышесказанное о полупроводниковом диоде в отсутствие внешнего поля можно обобщить следующим образом:

1. В области p - n перехода существует потенциальный барьер.

2. Через область барьера протекают два встречных тока – ток насыщения I_n неосновных носителей и диффузионный ток I_o основных носителей.

3. В стационарном состоянии устанавливается динамическое равновесие – эти два тока равны друг другу, и полный ток I через переход отсутствует:

$$I = I_o - I_n = 0.$$

3. Прохождение тока через p - n переход при наличии внешнего электрического поля.

Прямым включением диода во внешнюю цепь называют соединение положительного полюса источника с p -областью и отрицательного полюса с n -областью диода.

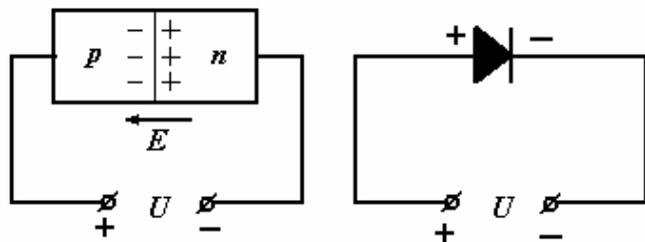


Рис. 5

Прямое включение полупроводникового диода во внешнюю цепь.

При прямом включении (прямом смещении) внешнее поле, создаваемое источником, направлено противоположно

полю E , существующему в области объемного заряда. Это приводит к тому, что высота потенциального барьера между p - и n -областями понижается, и число свободных основных носителей, способных преодолеть понизившийся барьер, резко возрастает. В результате резко возрастает диффузионный ток через барьер из p - в n -область.

На ток насыщения неосновных носителей понижение барьера существенного влияния не оказывает, но теперь величина этого тока оказывается существенно меньше диффузионного тока основных носителей: $I_n \ll I_o$.

Можно считать, что при прямом включении весь ток через p - n переход – это ток основных носителей: $I = I_o - I_n \approx I_o$.

При увеличении внешнего напряжения U высота барьера продолжает уменьшаться, а ток через него увеличивается.

Следует, однако, иметь в виду, что понижение барьера связано с приложенным напряжением U непрямой зависимостью. При прохождении тока через диод происходит падение напряжения как на контактах, так и в p - и n -областях полупроводника, на сам же p - n переход приходится только часть приложенного напряжения. К тому же сопротивление p - n перехода уменьшается с ростом числа свободных носителей, способных проникать внутрь барьера, что еще уменьшает долю внешнего напряжения, приходящуюся на область p - n перехода.

Посмотрим теперь, что произойдет, если при подключении диода поменять полярность источника (обратное смещение).

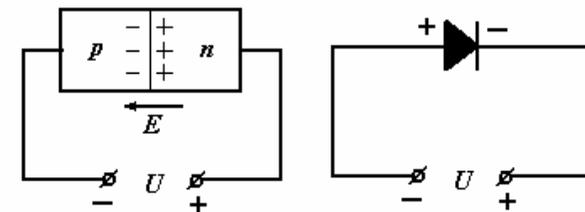


Рис. 6

Обратное включение полупроводникового диода во внешнюю цепь.

Поскольку область объемного заряда, как уже упоминалось, сильно обеднена свободными носителями заряда, ее сопротивление очень велико по сравнению с сопротивлением полупроводника в p - и n -областях. В этом случае напряжение источника U оказывается практически полностью приложенным в области p - n перехода, что приводит к увеличению энергетического барьера между p - и n -областями на величину eU .

На величину тока I_n неосновных носителей величина барьера не оказывает никакого влияния (это уже ток насыщения), но ток основных носителей I_0 очень быстро уменьшается с ростом величины U . Объяснить это можно следующим образом.

Количество «энергичных» основных носителей, способных преодолеть при переходе из p - в n -область энергетический барьер величины W , определяется из распределения Больцмана и пропорционально $\exp\{-W/kT\}$. При величине приложенного напряжения $U = 0,026$ В высота барьера увеличивается на $0,026$ эВ, что равно значению kT при комнатной температуре. Следовательно, количество свободных электронов и дырок, способных преодолеть увеличившийся на величину eU барьер, уменьшится в $e \approx 2,7$ раз. Приложенное напряжение $U = 0,1$ В увеличит высоту барьера на ~ 4 кТ и, соответственно, уменьшит число носителей заряда в диффузионном токе I_0 в $e^4 \approx 55$ раз. Это означает, что в общем токе через p - n переход, который равен $I = I_n - I_0$, величина тока I_0 меньше величины тока I_n в 55 раз, т.е. через диод при обратном включении протекает только ток неосновных носителей заряда, являющийся током насыщения: $I \approx I_n$.

Ток I_n не зависит от величины приложенного напряжения в определенных пределах. Однако, начиная с некоторого значения, характерного для данного p - n перехода, ток начинает резко возрастать, наступает так называемый «пробой», что может привести к выходу диода из строя. Выясним, почему это происходит.

Увеличение высоты потенциального барьера одновременно означает увеличение напряженности

электрического поля в области объемного заряда. Энергия носителей тока, электронов и дырок, которую они получают при движении в электрическом поле, возрастает с ростом напряженности электрического поля. Существует критическая величина напряженности электрического поля E_i , при которой свободные электроны и дырки приобретают такую большую энергию, что способны при столкновении с атомами кристаллической решетки полупроводника породить новые пары электрон-дырка. Это явление, во многом сходное с ионизацией газа, называется *ударной ионизацией*. И, как и в газе, в сильном поле могут образовываться *лавины* свободных носителей.

При достижении напряжения *лавинного пробоя* U_i (соответствующего полю E_i) ток через p - n переход чрезвычайно быстро растет с ростом напряжения. При возрастании обратного напряжения на несколько процентов ток через переход может возрасти в сотни тысяч и даже миллионы раз.

4. Применение полупроводниковых диодов.

На приведенных ниже рисунках представлена вольтамперная характеристика (рис.7 – прямая ветвь, рис.8 – обратная ветвь) германиевого диода при прямом и обратном включении.

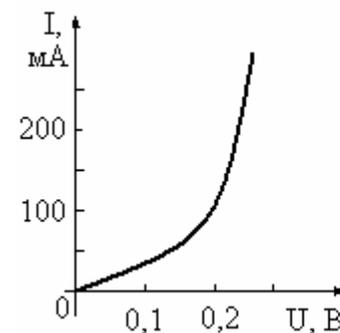


Рис. 7

Прямое включение

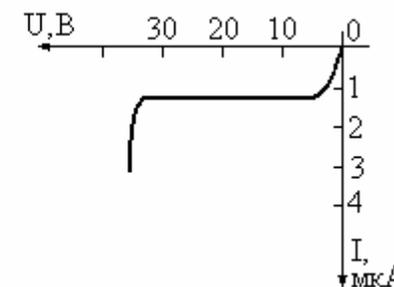


Рис. 8

Обратное включение

Для различных диодов значения токов и напряжений на вольтамперной характеристике могут различаться, но для любого из них сохраняется важная особенность: сопротивление диода, включенного в прямом направлении, принимает значения ~ 1 Ом, в то время, как при обратном включении его сопротивление превышает значения ~ 1 МОм. Такое свойство диода позволяет использовать его при выпрямлении переменного тока.

На рисунке 9 показана простейшая схема для выпрямления переменного тока.

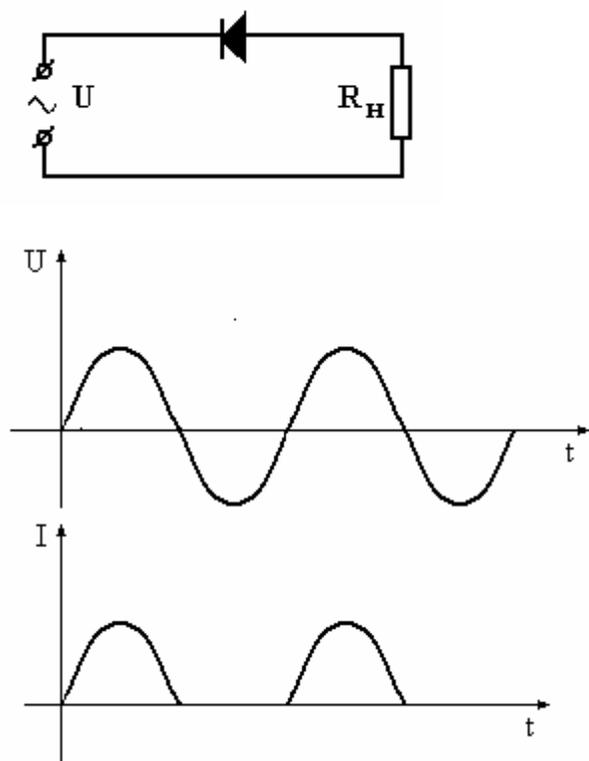


Рис. 9

Простейшая выпрямительная схема

Если на вход схемы подается переменное напряжение $U(t)$, ток через нагрузку R_n протекает только в те промежутки

времени, когда диод оказывается включенным в прямом направлении.

Ток $I(t)$, протекающий в одном направлении и меняющийся только по величине, называют *пульсирующим*, а полученное выпрямление тока - однополупериодным. С помощью других выпрямительных схем (например, мостовой схемы) можно получить двух-полупериодное выпрямление переменного тока, а применение конденсаторов в этих схемах позволяет сглаживать пульсации и получать ток, практически не меняющийся со временем

Выпрямительные схемы широко применяются в радиотехнике, электронике, в компьютерной технике. На постоянном (выпрямленном) токе работает весь транспорт на электрической тяге (троллейбусы, трамваи, метро, электрички) и еще многие другие устройства.

Выпрямление тока – не единственная область применения полупроводниковых диодов. На основе *p-n* переходов изготавливают фотодиоды, солнечные батареи, варикапы (приборы, используемые как конденсаторы переменной емкости), стабилизаторы и другие приборы.

Экспериментальная часть

1. Снятие вольтамперной характеристики полупроводникового диода.

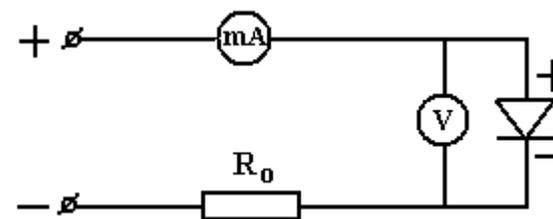


Рис. 10

Схема для получения прямой ветви вольтамперной характеристики (ВАХ).

1. Для снятия прямой ветви вольтамперной характеристики диода соберите схему, изображённую на рис. 10, используя ограничительное сопротивление $R_0 = 100 \text{ Ом}$. Обратите внимание на знаки «+» и «-» на панели диода, на измерительных приборах и на источнике тока.

2. Включите источник постоянного напряжения. Изменяя входное напряжение, снимите вольтамперную характеристику по значениям тока от 10 мА до 300 мА примерно в 8-10 точках. Предупреждение: Сила прямого тока через диод не должна превышать 300 мА.

3. Для снятия обратной ветви вольтамперной характеристики соберите схему по рис.11. Обратите внимание на различие со схемой на рис.10 в подключении измерительных приборов.

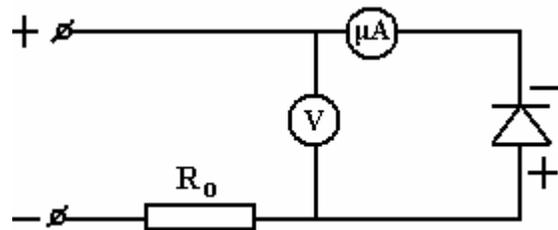


Рис. 11

Схема для получения обратной ветви ВАХ

4. Снимите вольтамперную характеристику, изменяя напряжение в пределах от 1 В до 30 В.

5. По результатам измерений постройте графики зависимости $I(U)$ для прямого и обратного включения диода.

2. Выпрямление переменного тока.

1. Соберите схему однополупериодного выпрямителя, показанную на рис. 12, используя сопротивление нагрузки $R_H = 1 \text{ кОм}$.

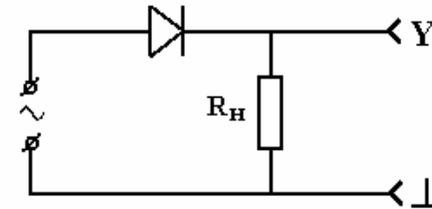


Рис. 12

Схема для получения однополупериодного выпрямления переменного тока

2. Подготовьте к работе осциллограф. Подключите собранную схему к входу «Y» осциллографа.

3. Подключите схему к источнику переменного напряжения ЛИП-90. Пронаблюдайте осциллограмму выпрямленного тока и зарисуйте её.

4. Соберите мостовую схему двух-полупериодного выпрямителя, показанную на рис.13.

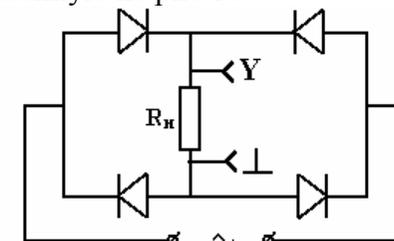


Рис. 13

Мостовая выпрямительная схема.

5. Подключите собранную схему к входу «Y» осциллографа и к источнику переменного напряжения ЛИП-90. Пронаблюдайте осциллограмму выпрямленного тока и зарисуйте её.

3. Наблюдение на экране осциллографа вольтамперной характеристики диода.

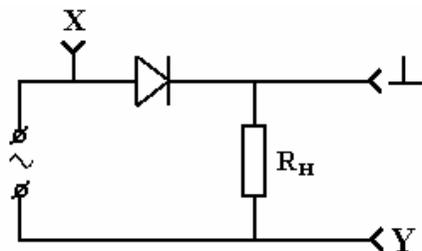


Рис. 14

Получение кривой ВАХ на экране осциллографа.

1. Соберите схему по рис.14.
2. Подключите собранную схему к входам «X» и «Y» осциллографа и к источнику переменного напряжения ЛИП-90. Пронаблюдайте полученную на экране картинку и зарисуйте её.
3. Объясните смысл кривой, полученной на экране осциллографа.

Сделайте выводы о проделанной работе.

Вопросы для получения допуска к выполнению лабораторной работы.

1. Сформулируйте цель работы.
2. Какие задания Вы будете выполнять в данной работе, в какой последовательности, и какие приборы будут Вами использованы для выполнения каждого из этих заданий?
3. Какие физические величины Вы будете измерять непосредственно в данной работе?

4. В какой форме Вы будете представлять результаты Вашей работы?

5. Для чего Вы будете использовать осциллограф и как подготовить осциллограф к работе?

Вопросы к защите результатов лабораторной работы.

1. Что такое примесная проводимость полупроводников?
2. Как получают донорную (акцепторную) примесь?
3. Что такое *p-n* переход?
4. Как получают полупроводник, содержащий *p-n* переход?
5. Что происходит в области *p-n* перехода при наличии внешнего электрического поля?
6. Какие носители электрического заряда образуют прямой и обратный токи через *p-n* переход?
7. Как объяснить зависимость прямого и обратного токов от приложенного напряжения?
8. Что такое *напряжения пробоя*?
9. В чем состоит принципиальное отличие вольтамперных характеристик вакуумного и полупроводникового диодов?
10. Как происходит выпрямление переменного тока с помощью полупроводникового диода?
11. Что представляет собой мостовая выпрямительная схема?
12. Какие характеристики диода обязательно должны быть указаны в его техническом паспорте?
13. Какие выводы Вы сделали о проделанной работе?

Рекомендуемая литература

1. Г.Я. Мякишев, А.З. Синяков
ФИЗИКА 10-11. Электродинамика
«Дрофа», 2002 г.
2. М.Е. Левинштейн, Г.С. Симин
Знакомство с полупроводниками

Библиотечка «КВАНТ», Вып.33, М., «Наука», 1984 г.

3. М.Е. Левинштейн, Г.С. Симин

Барьеры

Библиотечка «КВАНТ», Вып.65, М., «Наука», 1987 г.