

**Государственное образовательное учреждение
Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН»**

Кафедра физики

Лабораторная работа

**«Изучение вольтамперной характеристики
полупроводникового диода »**

1. Цель работы.
2. Теоретическое введение.
3. Оборудование и схема установки.
4. Порядок выполнения работы.
5. Результаты и выводы.
6. Контрольные вопросы.
7. Рекомендованная литература.

1. Цель работы.

Целью данной лабораторной работы является ознакомление с основными представлениями о полупроводниках и полупроводниковых диодах и получение вольтамперной характеристики диода на постоянном и на переменном токе, наблюдение ***VAX*** с помощью осциллографа и определение коэффициента выпрямления данного полупроводникового диода.

2. Теоретическое введение.

Полупроводники – это химические элементы (кремний Si, германий Ge) или соединения (арсенид галлия GaAs, фосфид индия InP, сульфид кадмия CdS и многие другие соединения), обладающие худшей электропроводностью, чем у типичных металлов. В отличие от металлов, удельная проводимость которых в широком диапазоне является убывающей линейной функцией температуры, у чистых полупроводников эта зависимость имеет экспоненциальный вид,

$$\sigma(T) = \sigma_0 \cdot \exp\left\{-\frac{E_g}{2kT}\right\}, \quad (1)$$

где σ_0 – постоянная, характеризующая данный полупроводник, E_g – ширина запрещенной зоны (измеряется в джоулях или электронвольтах, см. ниже), k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура в кельвинах.

При нулевой температуре чистые полупроводники становятся диэлектриками.

Сильная зависимость проводимости полупроводников от температуры мешает работе большинства полупроводниковых приборов. Поэтому для создания *элементной базы* чистые полупроводники используются очень редко. Обычно их *легируют*, то есть добавляют строго контролируемые количества определенных примесей. Если валентность примеси выше (чаще всего не единицу), чем валентность исходного материала, то примесь легко *отдает* валентный электрон, который свободно перемещается по кристаллу. Такая примесь называется *донорной*, а полупроводник с донорными примесями, имеющий избыток подвижных электронов называется полупроводником *n-типа* (“negative” – «отрицательный» - указывает знак зарядов, создающих в полупроводнике электрический ток). Если валентность примеси ниже, чем у атомов основного материала, то примесь захватывает электрон, связывая его около себя. Такая примесь называется *акцепторной*, а полупроводник – полупроводником *p-типа* (“positive” - «положительный»).

Связанный электрон формирует *дырку*. Появление дырок – следствие квантовой природы микрочастиц, в данном случае – электронов. Электроны имеют полуцелый спин и поэтому являются фермиевскими частицами. Это означает, в частности, что в одном квантовом состоянии может находиться только один электрон. Поэтому электроны последовательно занимают самые низшие энергетические состояния, образуя в энергетическом пространстве *фермиевскую сферу*. При нулевой температуре электрон с самой большой энергией находится в состоянии с *энергией Ферми* или на *уровне Ферми*. Если из заполненной сферы Ферми каким-либо образом «вытащить» электрон, переведя его на уровень, лежащий выше уровня Ферми, то соответствующее энергетическое состояние становится свободным, то есть превращается в дырку (ферми-дырка). Один из других электронов может занять состояние этой дырки, оставив за собой дырку в другом месте. Такой процесс выглядит как движение положительного заряда (дырки) по кристаллу, и ему соответствует *дырочный ток*.

В чистых полупроводниках уровень Ферми расположен посередине запрещенной зоны. Но доноры и акцепторы формируют энергетические уровни вблизи краев разрешенных зон (см. рисунок 1), изменяя концентрацию электронов и дырок и за счет этого смещая уровень Ферми вверх или вниз.

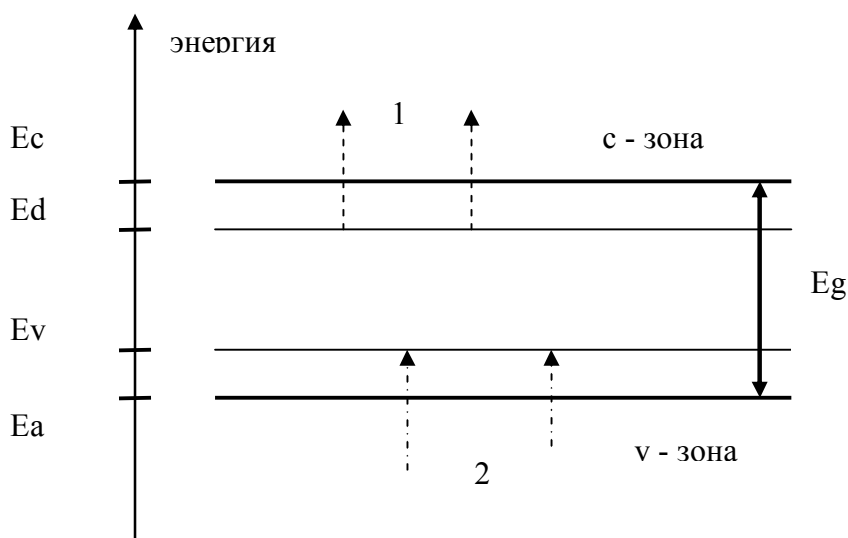


Рис. 1. Энергетическая структура полупроводника: с-зона – зона проводимости, v-зона – валентная зона, E_c – дно зоны проводимости, E_d – энергетический уровень донора (лежит в запрещенной зоне), E_a – энергетический уровень акцептора (лежит в запрещенной зоне), $E_g = E_c - E_v$ – ширина запрещенной зоны, стрелки 1 показывают переход электрона с донорного уровня в зону проводимости, стрелки 2 показывают переходы электронов из валентной зоны на акцепторный уровень.

При нулевой температуре валентная зона чистого полупроводника заполнена, а с-зона – пуста. Полупроводник не проводит электрический ток – он диэлектрик. При повышении температуры

часть электронов (см. формулу (1)) из-за тепловых возбуждений переходит в с-зону. Там появляются электроны проводимости. В v-зоне остаются не заполненные электронами состояния. Они называются *дырками* и могут перемещаться по полупроводнику так, как будто там движется положительный заряд. Создаваемая электронами и дырками проводимость сильно зависит от температуры.

В легированных образцах картина несколько иная. Например, в n-полупроводнике уже при невысоких температурах практически все доноры *ионизируются*, то есть отдают электроны в зону проводимости. Проводимость резко возрастает и потом почти не зависит от температуры. Похожая картина имеется в полупроводнике p-типа. Там происходят тепловые возбуждения электронов валентной зоны, захватываемых акцепторным уровнем, и возникает не зависящая от температуры дырочная проводимость.

При контакте полупроводников, сделанных из одного материала, но легированных разными типами примесей возникает $p - n$ - переход. Если в контактируют полупроводники разного состава (с близкими, но разными ширинами запрещенных зон), то образуется *гетеропереход*.

В лабораторной работе изучается стандартный $p - n$ - переход и его выпрямляющие свойства.

Основой современной электроники являются полупроводниковые приборы, главными элементами которых следует считать $p - n$ - переходы. Эти переходы формируются в объеме полупроводникового монокристалла, одна часть которого представляет собой материал p-типа, а другая – материал n-типа (см. рис. 2). Через границу двух областей происходит диффузия подвижных носителей. Электроны из n-области диффундируют в p-область и рекомбинируют (схлопываются) там с положительными дырками. Дырки из p-области диффундируют навстречу и рекомбинируют с электронами в n-области. В результате рекомбинации в n-области появляется избыток положительных зарядов, а в p-области – избыток отрицательных зарядов. Формируется так называемая область объемного заряда. В этой области (это и есть $p - n$ - переход) возникает электрическое поле, препятствующее дальнейшей диффузии носителей заряда. Из-за наличия электрического поля в равновесных условиях (нет внешнего напряжения) на $p - n$ - переходе возникает скачок потенциала – энергия, например, электрона с одной стороны перехода больше, чем с другой стороны. Для того, чтобы перебросить электрон из области 1 в область 2, ему нужно дать дополнительную энергию.

Если к области 1 приложить положительное напряжение, а к области 2 отрицательное, то электроны под действием силы Кулона сместятся направо, а дырки – налево. Поэтому сопротивление перехода увеличивается. Это действие *обратного напряжения или обратного смещения*. Если же поменять полярность, то и электроны, и дырки будут подгоняться к переходу,

начнется их непосредственная рекомбинация, то есть в области 1 возникнет электронный ток, а в области 2 – равный ему дырочный ток. Это означает, что через p - n –переход идет ток.

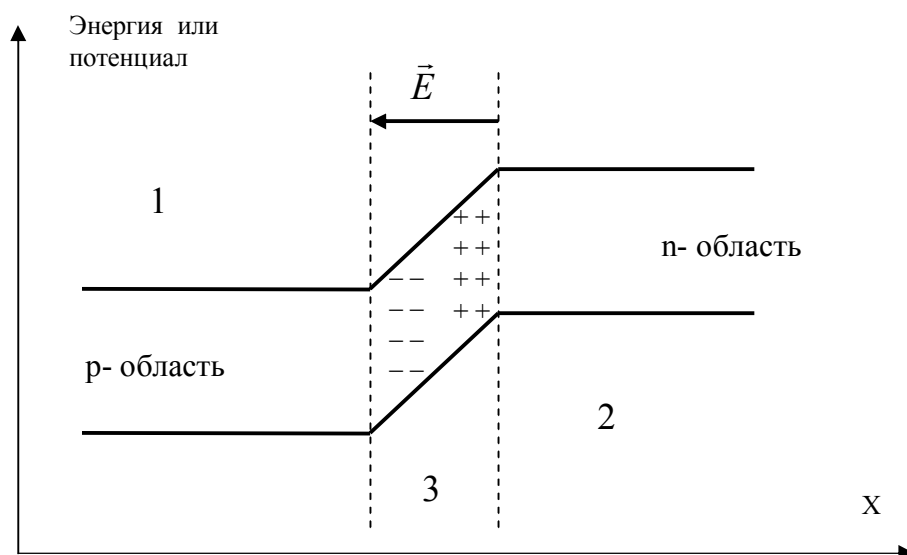


Рис. 2. Схема p – n - перехода. 1 – p -область с избытком отрицательных зарядов, 2 – n -область с избытком положительных зарядов, 3 – область p – n - перехода (запорный слой), в которой имеется электрическое поле \vec{E} и скачок электрического потенциала U_k .

Большое сопротивление перехода при обратном смещении не означает, что обратный ток отсутствует вовсе. Дело в том, что в статистическом ансамбле дырок и электронов всегда есть частицы с большой энергией, которые могут преодолеть потенциальный барьер, возникающий при обратном смещении, и рекомбинировать. Они создают слабый обратный ток. В современных полупроводниковых диодах приняты меры, делающие обратный ток маленьким (с помощью специальных технологических приемов), это улучшает характеристики прибора. Однако это же создает трудности для изучения вольтамперной характеристики – обратная ветвь (см. рис. 3) практически не заметна. В лабораторной работе используются старые полупроводниковые диоды с плохими характеристиками, позволяющие наблюдать обратный ток.

Заметим, что появление электрического поля \vec{E} (см. рис. 2) означает, что область 3 может рассматриваться как внутренняя часть плоского конденсатора. Подача прямого смещения ликвидирует этот конденсатор, подача обратного напряжения – увеличивает его емкость. Этот факт позволяет использовать p – n - переход как малогабаритный конденсатор, причем с управляемой емкостью. В микросхемах создают конденсаторы именно такого типа. Как сами диоды, так и созданные на их основе конденсаторы имеют весьма малые размеры. В микросхемах они не превышают 2 – 5 мкм.

Толщина запорного слоя

$$D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon U_k (n + p)}{e n p}} , \quad (2)$$

ε_0 и ε – электрическая постоянная и относительная диэлектрическая проницаемость, U_k – контактная разность потенциалов (см. рис. 2), e – численное значение заряда электрона, n и p – концентрации электронов и дырок. Величина (1) достигает $10^{-5} \div 10^{-7}$ м.

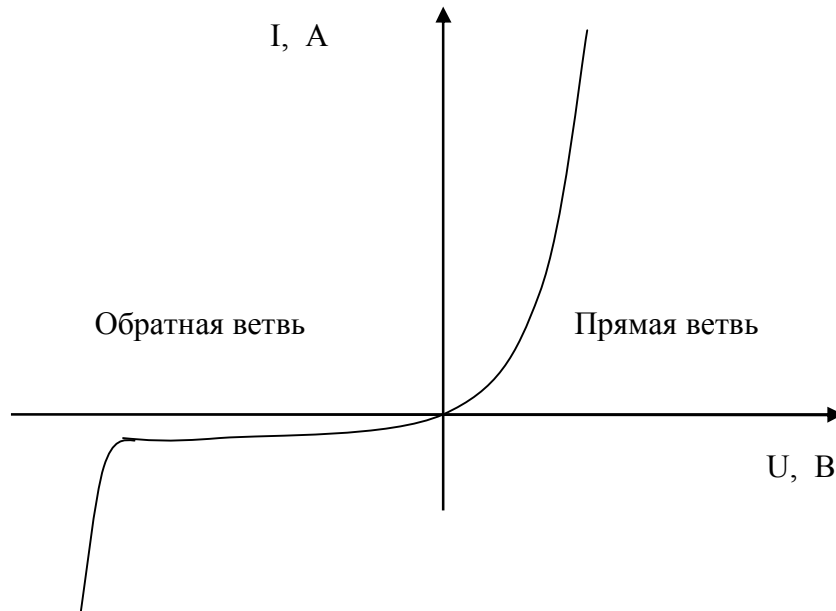


Рис. 3. Вольтамперная характеристика «плохого» р-п – перехода. У «хорошего» перехода (диода) обратная ветвь сливается с горизонтальной осью. Резкое падение обратной ветви отмечает наступление электрического пробоя диода.

Допустимые напряжения U не велики, и редко превышают несколько вольт. Дальнейшее повышение напряжения может вызвать перегрев $p - n$ - перехода и его разрушение. Выделяют лавинный, туннельный и тепловой пробой перехода. Эти явления происходят при превышении критических для данного типа диодов напряжений. Однако даже слабое, но многократно повторяющееся повышение напряжения вызывает эффект деградации перехода, приводящего к потере прибором паспортных свойств. Тепловой пробой необратим.

Важной характеристикой конкретного типа полупроводникового диода является коэффициент выпрямления $K_{вып}$. По определению, $K_{вып}$ это отношение прямого тока, текущего через диод при данном напряжении, к обратному току,

$$K_{вып} = \frac{I_{пр}(U)}{I_{об}(U)} . \quad (3)$$

3. Оборудование и схема установки.

Установка (см. рис. 4) состоит из источника питания постоянного тока (GPR-6030D) **1**, звукового генератора, выступающего в роли источника питания переменного тока **2**, схемы, включающей кремниевый полупроводниковый диод Д-226Г **3**, вольтметра **4**, амперметра **5** и осциллографа **6**. Схема **3** имеет переключатели напряжения «прямой ток» и «обратный ток», а также переключатели режима работы «постоянное напряжение» и «переменное напряжение».

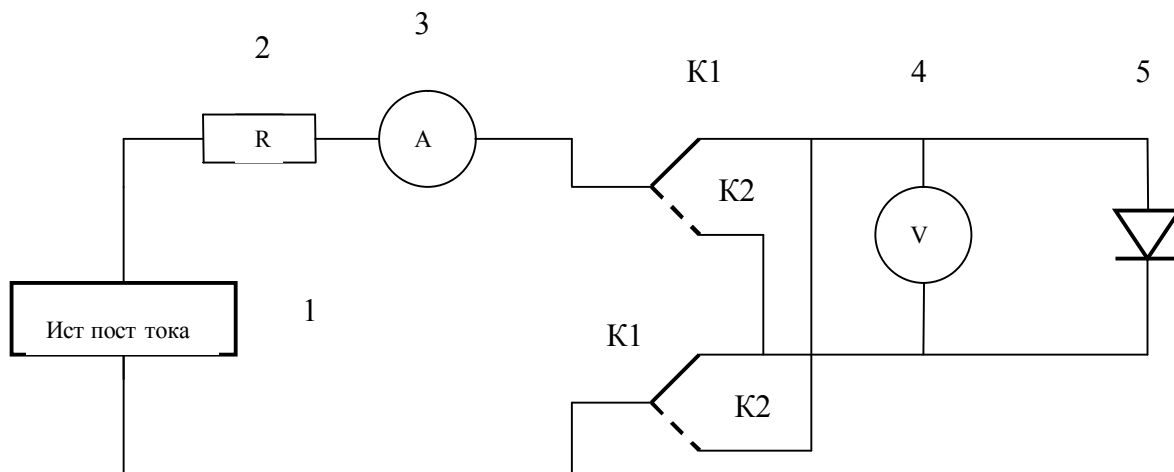


Рис. 4. Схема установки для получения вольтамперной характеристики р-п – перехода. 1 – источник постоянного тока 0 – 15 В, 2 – резистор (100 Ом), 3 – миллиамперметр, 4 – вольтметр, 5 – диод. В случае замыкания контактов K1 (как на рисунке) на диод подается прямое напряжение, при замыкании контактов K2 – подается обратное напряжение.

Допустимые напряжения, при которых диод сохраняет работоспособность, составляют 5 В при обратном смещении и 15 В при прямом смещении. Выходить за рамки этих диапазонов **запрещается**. Рекомендуется начинать измерения с подачи обратного смещения, регулируя его величину ручкой «точно» (Fine) источника **1**, а затем переходить к изучению прямой ветви вольтамперной характеристики, вначале также используя ручку «точно». Когда диапазон изменения напряжения этой ручкой будет исчерпан, необходимо повернуть ее налево до значения напряжения 0 В, подать напряжение, немного меньшее требуемого, расположенной правее ручкой «грубо», и затем проводить настройку ручкой «точно».

Рис. 4 изображает схему получения вольтамперной характеристики при подаче постоянного напряжения. **При использовании переменного напряжения схема незначительно изменяется: источник постоянного тока 1 заменяется звуковым генератором, а вместо миллиамперметра 3 подключается осциллограф.**

4. Порядок выполнения работы.

1. Подготовьте конспект лабораторной работы.
2. Ознакомьтесь с установкой, проверьте правильность подключения приборов и получите разрешение преподавателя, приступить к работе.
3. Включите источник питания **I** (см. рис. 1) . Включите звуковой генератор и осциллограф (они должны прогреться в течении нескольких минут).
4. Установите переключатель **K** измерительной схемы в положение «обратный ток» (K2) и выберите режим «постоянное напряжение».
5. Рукояткой «плавно» увеличивайте напряжение, наблюдая его изменение по вольтметру **4**.
6. Заполняйте табл. 1, изменяя напряжение на диоде с шагом $\Delta U = 0,2 \div 0,5$ В. Не превышайте напряжение 5 В. Одновременно снимайте показания амперметра **4** и заносите их в ту же таблицу.
7. Рукояткой «плавно» уменьшите напряжение до нуля.
8. Переключите тумблер **K** в положение «прямой ток» (K1) , сохраняя режим «постоянное напряжение» и заполняйте табл. 1, изменяя напряжение с тем же шагом, что и в упражнении 6.

Таблица 1.

№ опыта	Напряжение на диоде U , В	Обратный ток $I_{обр}$, мкА	Прямой ток $I_{обр}$, мкА	Коэффициент выпрямления $K_{вып}$

10. Проведите измерения при напряжении, большим 5 В, приняв шаг равным 1 В.
11. Выключите источник питания **I**.
12. Выберите режим «переменное напряжение».
13. Ручки управления осциллографом должны находиться в положениях, указанных на таблице.
14. Получите изображение выпрямленного сигнала на экране осциллографа. Зарисуйте его в лабораторную тетрадь и будьте готовы дать анализ картинки.
15. Получите подпись преподавателя под черновиками данных измерений.

5. Обработка результатов и выводы.

1. Оформите результаты измерений «набело».
2. По данным таблицы постройте на миллиметровой бумаге вольтамперную характеристику.
3. Рассчитайте значения коэффициентов выпрямления и постройте соответствующий график.
4. Используя картинку, полученную на осциллографе, нарисуйте график выпрямленного сигнала, укажите его особенности.
5. Сформулируйте выводы по работе, учитывая теоретический и экспериментальный материал.

6. Контрольные вопросы.

1. Какие вещества можно считать полупроводниками? Приведите примеры.
2. Как зависят удельные проводимости полупроводников и металлов от температуры?
3. Что такое собственные полупроводники? Ток в собственном полупроводнике.
4. Особенности p - и n - типов полупроводников. Типы носителей заряда.
5. Какие частицы участвуют в создании тока в легированных полупроводниках?
6. Где расположены акцепторные и донорные уровни?
7. Что такое уровень Ферми и где он находится в чистом полупроводнике?
8. Что такое $p - n$ - переход и гетеропереход?
9. Дайте описание процессов перераспределения электронов и дырок в $p - n$ - переходе.
10. Нарисуйте энергетическую схему $p - n$ - перехода.
11. Что такое «прямое смещение» и «обратное смещение».
12. Какие физические процессы происходят при «прямом» и «обратном» смещении?
13. Когда и почему $p - n$ - переход может рассматриваться как конденсатор?
14. Что такое запирающий слой?
15. Дайте описание особенностей различных вольтамперных характеристик $p - n$ - перехода.
16. Что такое «пробой» $p - n$ - перехода, и какие типы «пробоев» $p - n$ - перехода известны?
17. Что такое «коэффициент выпрямления»?
18. Нарисуйте принципиальную схему установки и перечислите используемые приборы.
19. Укажите допустимые пределы изменения напряжения на $p - n$ - переходе.
20. Укажите последовательность проведения измерений в данной работе.
21. Укажите причины возникновения погрешностей измерений в данной работе и методы их расчета.

7. Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. М., Наука, 1977.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 3. М., Наука. 1982.
3. Калашников С.Г. Электричество. М., Наука. 1977.
4. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М., Энергоатомиздат. 1985.
5. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М., Наука. 1977.