

Лабораторная работа № 6.3

Исследование работы полупроводниковых диодов.

Цель работы: Определить и сравнить зависимости силы тока от напряжения для полупроводниковых диодов различных типов.

Приборы и принадлежности: Установка для изучения вольтамперной характеристики полупроводниковых диодов.

Теоретические сведения.

1. Свойства $p-n$ -перехода.

Основная структурная ячейка огромного числа полупроводниковых приборов называется $p-n$ -переходом. Рассмотрим в общих чертах физические процессы, которые происходят в $p-n$ -переходе.

Пусть два участка полупроводника с проводимостями разного типа разделяет плоская граница (рис. 1): слева от нее расположен полупроводник p -типа, справа – полупроводник n -типа.

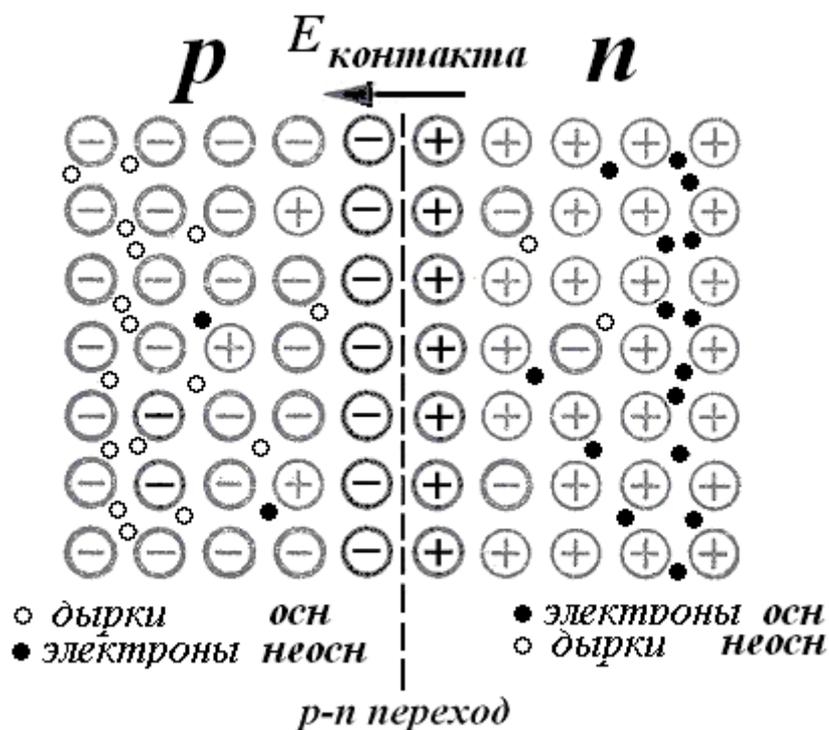


Рис. 1

Ионы донорной примеси обозначены кружком со знаком «+», и ионы акцепторной примеси обозначены кружком со знаком «-». Ионы (кружки) находятся в узлах кристаллической решетки, а дырки и электроны (белые и черные точки) могут перемещаться по кристаллу.

Носители тока, концентрация которых в данном полупроводнике больше, называют *основными*, а носители, концентрация которых меньше, – *неосновными*. Концентрация основных носителей гораздо больше, чем концентрация неосновных носителей (примерно в 10^6 раз).

В p -области основными носителями тока являются **дырки**. Однако, в этой области имеется также небольшое число *неосновных носителей* – электронов, возникших вследствие разрыва ковалентных связей за счет теплового движения атомов кристалла.

Соответственно, в n -области основные носители тока – **электроны**, а неосновные носители – небольшое число дырок.

Вследствие значительного различия в концентрации электронов и дырок по разные стороны от перехода **происходит диффузия** дырок из p -полупроводника, где их концентрация выше, в n -полупроводник, где концентрация дырок ниже. Электроны диффундируют в противоположном направлении – в направлении $n \rightarrow p$.

Диффундируя во встречных направлениях через пограничный слой, дырки и электроны **рекомбинируют** (соединяются) друг с другом. Рекомбинация приводит к исчезновению пары электрон проводимости – дырка.

Такой встречный процесс диффузии заряженных частиц эквивалентен электрическому току $I_{\text{осн}}$ через $p - n$ -переход, который течет из p -области в n -область. Этот **ток основных носителей** заряда называется **диффузионным**.

В p - области после ухода дырок вблизи границы раздела остаются неподвижные отрицательные ионы акцепторной примеси, заряд которых теперь не компенсируется дырками. Они образуют отрицательный пространственный заряд (рис. 1).

В n - области вследствие ухода электронов вблизи границы остаются неподвижные положительные донорные ионы, заряд которых теперь не компенсируется электронами. Они образуют положительный объемный заряд в прилегающем слое (рис. 1).

Таким образом, возникает **двойной электрический слой** в $p - n$ -переходе и **контактная разность потенциалов**. Напряженность электрического поля двойного слоя $E_{\text{контакта}}$ направлена от n - к p – полупроводнику (рис. 1).

Контактное поле препятствует дальнейшему переходу дырок – направо, а электронов – налево, т.е. **препятствует диффузионному току основных носителей тока**.

Зато двойной электрический слой в $p - n$ -переходе **способствует движению неосновных** носителей заряда – дырок из n -области и электронов из p -области. Такой «дрейф» заряженных частиц через переход представляет собой электрический ток $I_{\text{неосн}}$, который направлен противоположно диффузионному току и называется **дрейфовым**.

В условиях термодинамического равновесия, которое устанавливается в $p - n$ -переходе, если к нему не приложена внешняя разность потенциалов, диффузионный ток $I_{\text{осн}}$ по величине точно равен дрейфовому $I_{\text{неосн}}$, оба тока компенсируют друг друга и **полный ток через переход равен нулю**.

Область $p - n$ -перехода обеднена подвижными носителями заряда, т.к. здесь благодаря встречному потоку электронов и дырок происходит их интенсивная рекомбинация. По этой причине область $p - n$ -перехода обладает

гораздо большим удельным сопротивлением, чем весь кристалл полупроводника, и называется «*запирающим слоем*».

Толщина слоя $p-n$ -перехода составляет приблизительно доли микрометра, а контактная разность потенциалов – десятые доли вольта. Носители тока в состоянии преодолеть такую разность потенциалов только при температуре в десятки тысяч градусов, т.е. при обычных температурах контактный слой является запирающим.

Сопротивление запирающего слоя можно изменить с помощью внешнего электрического поля. При этом *возможны два варианта*.

1. Приложим к кристаллу внешнее напряжение так, чтобы высокий потенциал «+» был подан на p -область, а низкий потенциал «-» был подан на n -область (режим прямого напряжения) (рис. 2).

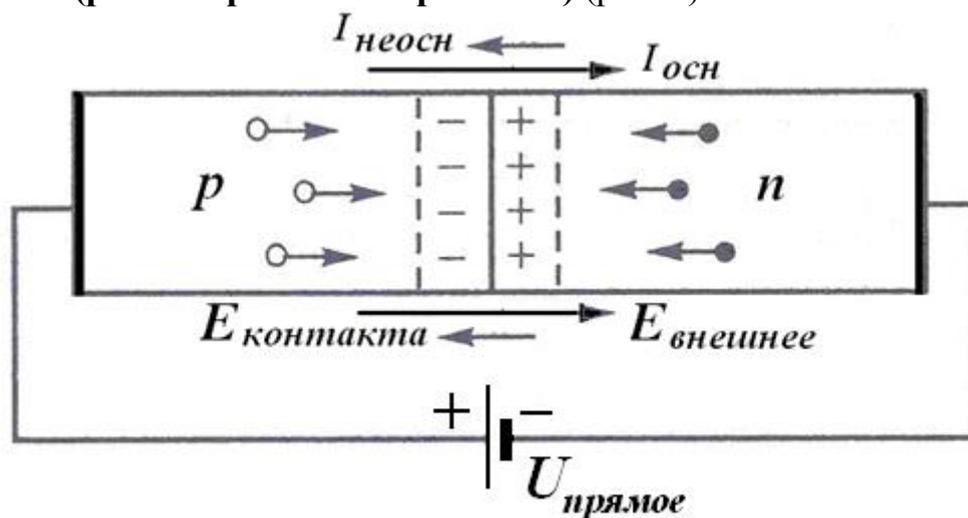


Рис. 2.

Тогда внешнее электрическое поле в кристалле $E_{внеш}$ будет направлено противоположно полю контактного запирающего слоя $E_{конт}$. Внешнее поле вызовет движение дырок из области p -полупроводника и электронов из области n -полупроводника к границе $p-n$ -перехода. (рис. 2).

Двигаясь навстречу, электроны и дырки рекомбинируют друг с другом, ток основных носителей возрастет. Ток же неосновных носителей останется практически без изменения. Следовательно, результирующий ток станет отличным от нуля. Понижение потенциального барьера пропорционально приложенному напряжению. При уменьшении высоты барьера ток основных носителей, а, следовательно, и результирующий ток, быстро нарастает. Таким образом в направлении от p -области к n -области $p-n$ -переход пропускает ток, сила которого *быстро нарастает* при увеличении приложенного напряжения. Это напряжение называется *прямым* (или пропускным). Расчет показывает, что с увеличением напряжения ток экспоненциально нарастает (рис. 4).

Электрическое поле «поджимает» основные носители к границе между областями, вследствие чего ширина переходного слоя, обедненного носителями, уменьшается. Соответственно уменьшается и сопротивление перехода, причем тем сильнее, чем больше напряжение.

2. Теперь приложим к кристаллу напряжение противоположного направления, чтобы «+» был подключен к n -области, а «-» был подключен к p -области. (режим обратного или запирающего напряжения)

Теперь направление внешнего электрического поля $E_{\text{внеш}}$ будет совпадать с направлением контактного поля $E_{\text{конт}}$ (рис. 3)

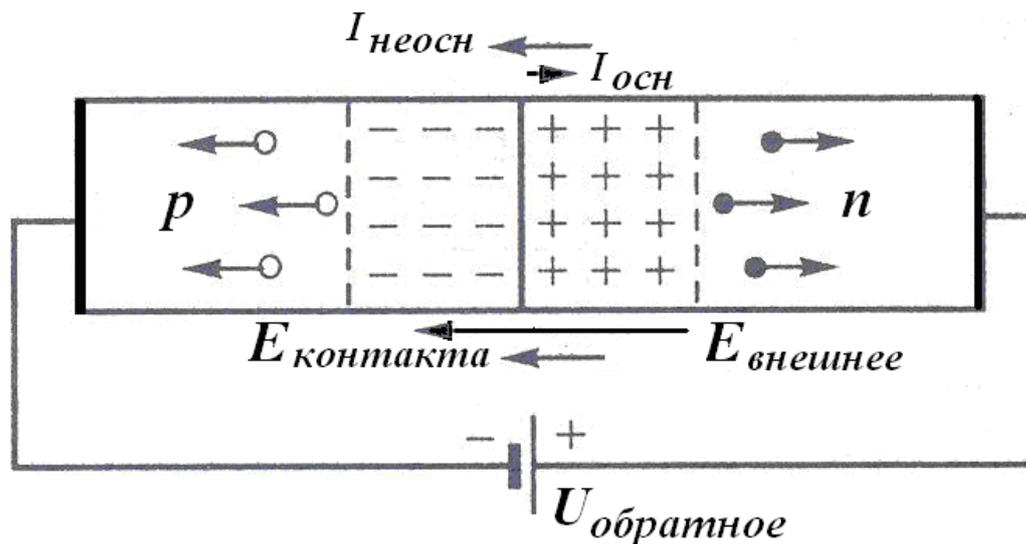


Рис. 3.

В этом случае внешнее поле будет усиливать поле контактного слоя и обусловит движение электронов и дырок от границы $p - n$ -перехода в противоположных направлениях. Поле, возникающее в кристалле при наложении обратного напряжения «оттягивает» основные носители от границы между областями, что приводит к возрастанию ширины переходного слоя, обедненного носителями. Соответственно увеличивается и сопротивление перехода. Следовательно, $p - n$ -переход обладает в обратном направлении гораздо большим сопротивлением, чем в прямом.

В данном случае через $p - n$ -переход протекает только небольшой ток (он называется **обратным**) целиком обусловленный неосновными носителями. Ток неосновных носителей (обратный ток) не зависит от величины контактного поля, а определяется концентрацией этих носителей, которая очень мала по сравнению с основными носителями.

Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода изображена на рис. 4. Обратный ток быстро достигает насыщения, т.е. перестает зависеть от U . Только при очень большом обратном напряжении сила тока начинает резко возрастать, что обусловлено электрическим пробоем перехода (см. пунктир на левой ветви на рис. 4)

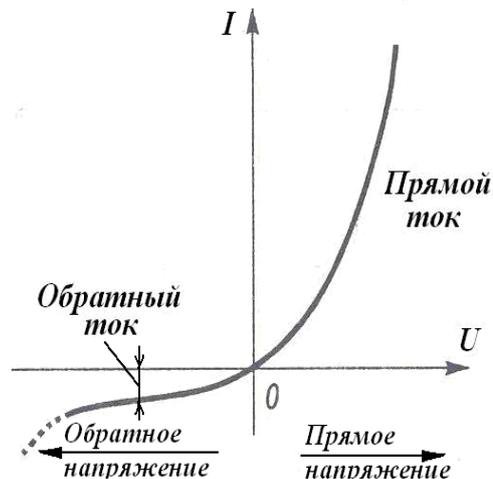


Рис. 4

Направление внешнего поля, в котором расширяется запирающий слой и $p-n$ -переход не пропускает электр тока, называется **обратным** или запирающим.

Прямой ток на несколько порядков превышает обратный ток.

2. Способы получения $p-n$ -переходов

Полупроводниковые диоды по конструкции $p-n$ -перехода подразделяют на диоды с *плоскостными контактами* и диоды с *точечными контактами*.

Создать $p-n$ -переход механическим соединением (прижатием) электронного и дырочного полупроводников невозможно, даже если контактные поверхности тщательно отполированы. Такие поверхности всегда содержат огромное количество разнообразных примесей и дефектов, которые сильно изменяют свойства полупроводников.

Один из методов создания $p-n$ -перехода – **метод сплавления**. Например, в тонкую пластинку монокристалла из очень чистого германия с электронным типом проводимости вплавляют с одной стороны кусочек индия (рис.5).

При нагревании в вакууме атомы индия диффундируют в германий на некоторую глубину. После охлаждения расплава на участке, в который проникают атомы индия, проводимость германия становится дырочной, а остальной кристалл сохраняет электронную проводимость. На внутренней границе обоих участков с проводимостью разного типа возникает $p-n$ -переход.

Другой способ получения $p-n$ -перехода – создание на поверхности кристалла n -типа с помощью химических реакций монокристаллической пленки с проводимостью p -типа.

В точечном германиевом диоде (рис. 6) к кристаллу германия 1 с проводимостью n -типа прижимается тонкая вольфрамовая проволока 2 острием, покрытым алюминием.

Если через диод в прямом направлении пропустить

кратковременный импульс тока, то

вследствие нагревания резко возрастает диффузия алюминия в германий.

Вблизи точечного контакта формируется обогащенный алюминием слой германия с проводимостью p -типа. На границе этого слоя с основным кристаллом германия образуется $p-n$ -переход. Благодаря малой емкости контактного слоя точечные диоды используются для выпрямления

высокочастотных электрических колебаний.



Рис. 5.

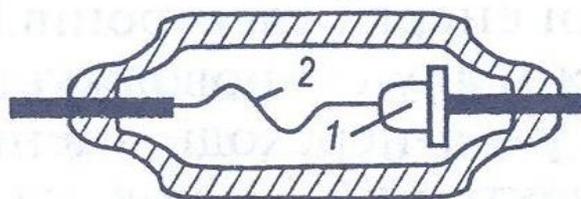


Рис. 6.

В лабораторной работе предлагается получить сравнительную характеристику выпрямляющих свойств для трех типов полупроводниковых диодов: КД 521 – кремниевый низкочастотный диод, КД 226 – кремниевый высокочастотный диод и Д 9К – германиевый точечный диод.

3. Измерения

1. Включить прибор, в качестве вида исследования выбрать «Исследование вольтамперной характеристики диода»;

2. В качестве объекта исследования выбрать полупроводниковый диод КД521;

3. Изменяя прямое напряжение от 0 до 0,6 В с шагом 0,05 В и обратное напряжение от 0 до 30 В с шагом 5В, определить соответствующие значения прямого и обратного тока. Данные измерений занести в таблицу.

4. Повторить такие же измерения для полупроводниковых диодов КД 226 и Д 9К;

4. Результаты измерений занести в таблицы. По данным опытов построить графики зависимости $I = f(U)$ для трех диодов.

3. Вычислить коэффициент выпрямления $k = \frac{I_{\text{прям}}}{I_{\text{обратн}}}$, причем прямой и обратный токи берутся при одинаковых значениях $U_{\text{пр}}$ и $U_{\text{обр}}$.

Диод.....

Таблица

Направление тока	U	I	k	$\langle k \rangle$
Прямое				
Обратное				

По результатам работы сделать вывод – какой из исследованных диодов обладает лучшими выпрямляющими свойствами.

4. Понятие о планарной технологии изготовления интегральных схем

Современные средства электронной техники в качестве элементной базы содержат не отдельные диоды и транзисторы, а интегральные схемы (ИС) — совокупность электрически связанных между собой транзисторов, диодов, конденсаторов и резисторов, изготовленных одновременно в едином технологическом цикле.

Все элементы ИС выполняются в тонком (5 – 10 мкм) приповерхностном слое полированной полупроводниковой пластины в результате комбинации процессов легирования, травления, оксидирования, металлизации и др., проводимых с использованием методов литографии.

Один из вариантов создания кремниевого биполярного p-n-p-транзистора в процессе изготовления ИС в упрощенном виде показан на рис. 7.

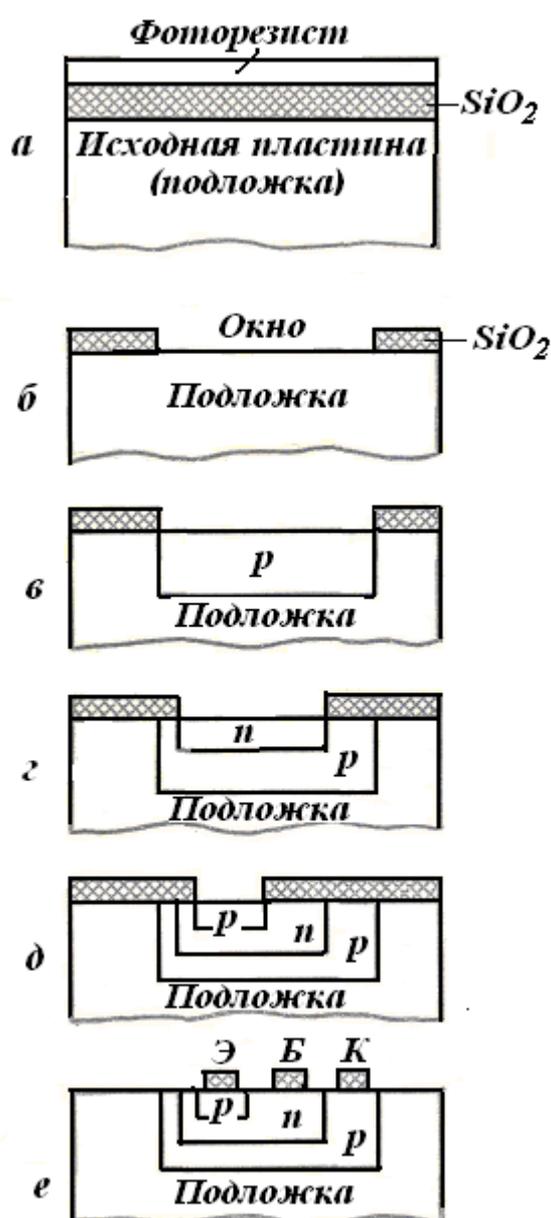


Рис. 7.

а) Поверхность кремниевой пластины окисляется. На ней образуется слой двуокиси кремния SiO_2 . Затем поверх окисла наносится тонкий слой светочувствительного полимера — фоторезиста. Фоторезист обладает способностью изменять свои химические свойства под действием света.

К покрытой фоторезистом полупроводниковой пластине прижимается стеклянная пластинка с нанесенным на ней рисунком, составленным из прозрачных и непрозрачных участков — фотошаблон. После этого фоторезист облучается УФ лучами через фотошаблон. При этом те участки фоторезиста, на которые попадает свет, приобретают способность растворяться в определенных травителях. Эта операция называется *фотолитографией*.

б) Пластина с засвеченным фоторезистом погружается в травитель. При этом происходит растворение участков фоторезиста, на которые попадал свет, а также находящихся под ними участков двуокиси кремния. На полупроводниковой пластине в этих местах открываются области чистой поверхности кремния — так называемые *окна*. Затем в другом травителе, растворяющем незасвеченный фоторезист, но не растворяющем SiO_2 , удаляется оставшийся фоторезист. В результате

поверхность пластины представляет собой сочетание окон с участками, защищенными слоем прочной, устойчивой к высокой температуре двуокиси кремния — так называемой *маской*.

в) Теперь через маску в пластину из нагретого газа проводят диффузию бора (В) или какого-либо другого вещества, образующего в Si акцепторную примесь. Там, где поверхность пластины защищена маской SiO₂, атомы примеси не достигают кремния. Таким образом, примесь попадает в кремний только в окнах, т. е. селективно (избирательно).

Так формируются сразу все будущие коллекторы транзисторов.

г) Маска SiO₂ удаляется путем химического травления, и на пластине создается новая маска с окнами, соответствующими расположению базовых областей транзистора. Через эти окна проводится диффузия мышьяка (As) или сурьмы (Sb), являющихся донорами. Концентрация доноров выбирается большей, чем концентрация акцепторов, так что те области полупроводника, куда попадает As и Sb, будут областями *n*-типа.

Так формируются сразу все базы будущих транзисторов,

д) На поверхности пластины формируется новая маска, и новой диффузией акцепторной примеси формируются эмиттерные *p*-области.

е) На поверхности полученных *p — n — p* структур также с помощью соответствующих масок и одновременно на всей пластине формируются металлические контакты (чаще всего из алюминия).

Совокупность способов изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем путем формирования их структур только с одной стороны пластины (подложки), вырезанной из монокристалла, получила название *планарной технологии*.

При разработке интегральных схем (ИС), когда на одном кристалле изготавливается готовая схема, содержащая до нескольких сотен тысяч транзисторов размером несколько микрометров, планарная технология является единственно возможной.

Контрольные вопросы

1. Поясните физические процессы, происходящие в *p-n*-переходе.
2. Как объяснить одностороннюю проводимость *p-n*-перехода?
3. Какой вид имеет вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода? Объясните возникновение прямого и обратного тока.
4. Какое направление в полупроводниковом диоде является прямым для тока?
5. Какие типы полупроводниковых диодов вам известны?
6. Почему через полупроводниковый диод проходит ток (хотя и слабый) даже при запирающем напряжении?