Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

Д.В. Кузнецов, Е.А. Арнаутов, А.В. Сидоров

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебно-методическое пособие
для подготовки к лабораторным и практическим занятиям

Елец – 2019

УДК 621.38 (042.3.4)
ББК 32.85
К 89

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Елецкого государственного университета имени И.А. Бунина
от 31.01.2019 г., протокол № 1

Рецензенты:
О.Т. Рыскулбеков, начальник отдела промышленной электроники
(Елец, АО «Энергия»)
С.Ю. Радин, кандидат технических наук, доцент
(Елец, Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина)

Д.В. Кузнецов, Е.А. Арнаутов, А.В. Сидоров

К 89 Физические основы электроники: учебно-методическое пособие для подготовки к лабораторным и практическим занятиям. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2019. – 75 с.

ISBN 978-5-00151-061-1

Учебно-методическое пособие содержит сведения об основах теории полупроводниковых материалов и физических принципах действия полупроводниковой элементной базы. Рассматриваются наиболее распространенные устройства: диоды, транзисторы и тиристоры. Практическая часть содержит указания к выполнению лабораторных работ, порядок их выполнения, правила оформления отчета, контрольные вопросы для проверки усвоенного материала, а также расчетные задачи по основам теории полупроводников.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки естественнонаучного и технического профиля.

УДК 621.38 (042.3.4)
ББК 32.85

ISBN 978-5-00151-061-1

© Елецкий государственный
университет им. И.А. Бунина, 2019

Введение

Но революция по-настоящему, понимаете, революция – процесс, на самом деле, конечно, но так же, как и в социальной сфере, происходит в науке и технике, некие события, которые определяют потом развитие надолго. И, безусловно, таким вот одномоментным событием полупроводниковой революции 20-го века было открытие транзисторов.

Ж.И. Алферов.

Полупроводниковая техника – это электронные устройства, работа которых основана на использовании физических свойств полупроводниковых материалов. В настоящее время полупроводниковые приборы используются практически во всех областях электроники и радиотехники.

Полупроводниковые элементы позволяют превращать переменный ток в постоянный, усиливать слабые электрические сигналы, создавать электромагнитные волны. С их помощью можно измерять не электромагнитные параметры: температуру, освещенность, давление, скорость движения газов и жидкостей. Устройства, построенные на основе полупроводников, позволяют получать при помощи электричества тепло и холод, превращать свет одного спектрального состава в другой. Однако, несмотря на чрезвычайное разнообразие этих приборов, в основе их, как правило, лежит работа обычного p-n-перехода или системы из нескольких p-n-переходов.

Применение полупроводников является одним из основных направлений развития технического прогресса. Они позволяют автоматизировать сложнейшие системы, обеспечить надежность и безопасность их функционирования и открывают перспективы дальнейшего развития техники. Полупроводниковые приборы используются в различных областях промышленности и социальной сферы, позволяют решать сложнейшие вопросы эксплуатации, контроля и надежности различных систем. В электронных системах полупроводниковая техника служит для преобразования сигналов, в энергетических – для преобразования одного вида энергии в другой.

Существует большое разнообразие элементов построенных на основе полупроводниковых кристаллов. Можно выделить следующие основные классы полупроводниковой техники:

- Приборы, служащие для создания и преобразования электрических сигналов (полупроводниковый транзистор, тиристор, диод).
- Приборы, преобразующие оптические сигналы в электрические или электрические в оптические (светодиод, фоторезистор, фототиристор, фотодиод и т. д.).
- Приборы, преобразующие тепловую энергию в электрическую или электрическую в тепловую (термистор, термоэлемент и т. д.).
- Приборы использующие в качестве физического принципа своей работы эффект Холла (датчики Холла).

В данной работе рассмотрены устройство и принцип действия наиболее распространённых электропреобразовательных устройств – диодов, биполярных и полевых транзисторов и тиристоров. Учебно-методическое пособие состоит из теоретической части и практической: задачи и указания к выполнению лабораторных работ.

Предлагаемое пособие ориентировано на студентов, обучающихся по естественно-научным и техническим направлениям.

Теоретическая часть

Энергетические уровни и зоны

В соответствии с квантовой теорией энергия электрона, вращающегося по своей орбите вокруг ядра, не может принимать произвольных значений. Электрон может иметь только вполне определенные дискретные или квантованные значения энергии и дискретные значения орбитальной скорости [1, 2]. Поэтому электрон может двигаться вокруг ядра только по определенным (разрешенным) орбитам. Каждой орбите соответствует строго определенная энергия электрона, или энергетический уровень. Энергетические уровни отделены друг от друга запрещенными интервалами. Согласно принципу Паули на одном энергетическом уровне не может находиться более двух электронов, причем спины этих электронов должны быть противоположны. В невозбужденном состоянии электроны в атоме находятся на ближайших к ядру орбитах и в таком состоянии находятся до тех пор, пока какое-либо внешнее воздействие не сообщит атому добавочную энергию. При поглощении энергии атомом какой-либо электрон может перейти на один из более высоких свободных уровней, либо вовсе может покинуть атом, став свободным носителем электрического заряда, а атом при этом превращается из нейтрального в положительно заряженный ион [1, 2].

Проводники, полупроводники и диэлектрики

В твердых телах атомы вещества могут образовывать так называемую кристаллическую решетку, когда соседние атомы удерживаются межатомными силами на определенном расстоянии друг от друга в точках равновесия этих сил, называемых узлами кристаллической решетки. Под действием тепла атомы, не имея возможности перемещаться, совершают колебательные движения относительно положения равновесия.

В отличие от газа соседние атомы в твердых телах так близко находятся друг к другу, что их внешние электронные оболочки соприкасаются или, даже, перекрываются. В результате этого в твердых телах происходит расщепление энергетических уровней электронов на большое количество, почти сливающихся, подуровней (рисунок 1) [1], образующих энергетические зоны. Разрешенная зона, в которой при температуре абсолютного нуля все энергетические зоны заняты электронами, называется валентной. Ширина запрещенной зоны является основным параметром, характеризующим свойства твердого тела (рисунок 1). Вещества, у которых ширина запрещенной энергетической зоны $0{,}01 \leq \Delta W \leq 3$ эВ, относятся к полупроводникам, а при $\Delta W \geq 3$ эВ – к диэлектрикам. У металлов (провод-

ников) запрещенная зона отсутствует. В полупроводниковой электронике широкое применение получили германий

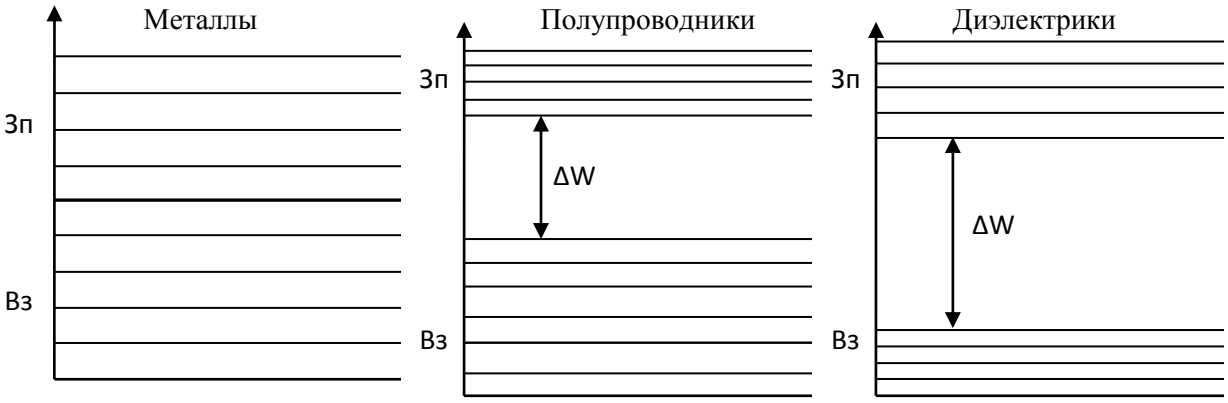

Рис. 1. Энергетическая структура веществ.

Ge ($\Delta W \geq 0{,}67$ эВ) и кремний Si ($\Delta W \geq 1{,}12$ эВ) – элементы 4-й группы периодической системы элементов Менделеева, а также арсенид галлия GaAs ($\Delta W \geq 1{,}43$ эВ) [1] Указанные выше значения ширины запрещенной зоны соответствуют T=300 К. Подобно тому, как в отдельном атоме электроны могут переходить с одного энергетического уровня на другой свободный уровень, электроны в твердом теле могут совершать переходы внутри разрешенной зоны при наличии в ней свободных уровней, а также, переходить из одной разрешенной зоны в другую. Плотность уровней в разрешенных зонах очень велика, поэтому для перемещения электрона с одного уровня на другой, внутри разрешенной зоны, требуется очень малая энергия, порядка $10^{-8}\ldots10^{-4}$ эВ. Последнее может быть следствием тепловых колебаний атомов; ускорений электронов, даже под действием слабых внешних электрических полей; попадания в атом кванта световой энергии фотона, а также, ряда других видов внешних воздействий.

Для перехода электрона из низшей энергетической зоны в высшую требуется затратить энергию, равную ширине запрещенной зоны. При ширине запрещенной зоны в несколько электрон-вольт внешнее электрическое поле практически не может перевести электрон из валентной зоны в зону проводимости, так как энергия, приобретаемая электроном, движущимся ускоренно на длине свободного пробега, недостаточна для преодоления запрещенной зоны. Длиной свободного пробега является расстояние, проходимое электроном между двумя соударениями с атомами кристаллической решетки [1].

Таким образом, способность твердого тела проводить ток под действием электрического поля зависит от структуры энергетических зон и степени их заполнения электронами.

Необходимым условием возникновения электрической проводимости в твердом теле является наличие в разрешенной зоне свободных или не полностью занятых энергетических уровней. Так, в металлах зона про-

водимости частично заполнена и под действием температуры электроны могут переходить из полностью заполненных зон в зону проводимости. Однако их концентрация всегда мала по сравнению с концентрацией валентных электронов. Поэтому концентрация электронов в металлах практически не зависит от температуры и зависимость электропроводности металлов от температуры обусловлена только подвижностью электронов, которая уменьшается с увеличением температуры из-за увеличения амплитуды колебания атомов в кристаллической решетке, что влечет за собой уменьшение длины свободного пробега электрона. У диэлектриков и полупроводников, в отличие от металлов, нет частично заполненных зон. При температуре абсолютного нуля валентная зона полностью заполнена, а зона проводимости совершенно пуста, поэтому эти вещества проводить ток не могут. Однако если этому веществу сообщить достаточное количество энергии, то электроны, приобретая дополнительное количество энергии, могут преодолеть ширину запрещенной зоны и перейти в зону проводимости. В этом случае вещество приобретает некоторую электропроводность, которая возрастает с ростом температуры [1].

Собственная электропроводность полупроводников

Рассмотрим строение полупроводникового материала, получившего наиболее широкое распространение в современной электронике, – кремния (Si) рисунок 2. В кристалле этого полупроводника атомы располагаются в узлах кристаллической решетки, а электроны наружной электронной оболочки образуют устойчивые ковалентные связи, когда каждая пара валентных электронов принадлежит одновременно двум соседним атомам и образует связывающую эти атомы силу [3]. Так как у элементов IV группы на наружной электронной оболочке располагаются по четыре валентных электрона, то в идеальном кристалле полупроводника все ковалентные связи заполнены, и все электроны прочно связаны со своими атомами.

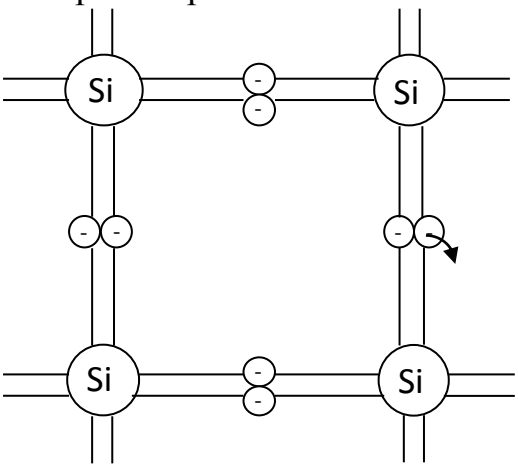

Рис. 2. Кристаллическая решетка кремния.

При температуре абсолютного нуля T = 0 K все энергетические состояния внутренних зон и валентная зона занята электронами полно-

стью, а зона проводимости совершенно пуста. Поэтому в этих условиях кристалл полупроводника является практически диэлектриком. При температуре $T > 0$ K в результате увеличения амплитуды тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки дополнительной энергии, поглощенной каким-либо электроном, может оказаться достаточно для разрыва ковалентной связи и перехода в зону проводимости, где электрон становится свободным носителем электрического заряда рисунок 1. Образующиеся свободные электроны хаотически движутся внутри кристаллической решетки и представляют собой, так называемый электронный газ. Они при своем движении сталкиваются с колеблющимися в узлах кристаллической решетки атомами, а в промежутках между столкновениями они движутся прямолинейно и равномерно. Одновременно с этим у того атома полупроводника, от которого отделился электрон, возникает незаполненный энергетический уровень в валентной зоне, называемый дыркой. Дырка представляет собой единичный положительный электрический заряд и может перемещаться по всему объему полупроводника под действием электрических полей, по законам диффузии в результате разности концентраций носителей заряда в различных зонах полупроводника, а также участвовать в тепловом движении. Таким образом, в идеальном кристалле полупроводника при нагревании могут образовываться пары носителей электрических зарядов «электрон – дырка», которые обуславливают появление собственной электрической проводимости полупроводника [1].

Процесс образования пары «электрон – дырка» называют генерацией свободных носителей заряда. После своего образования пара «электрон – дырка» существует в течение некоторого времени, называемого временем жизни носителей электрического заряда. В течение этого промежутка времени носители участвуют в тепловом движении, взаимодействуют с электрическими и магнитными полями как единичные электрические заряды, перемещаются под действием градиента концентрации, а затем рекомбинируют, т. е. электрон восстанавливает ковалентную связь. При рекомбинации электрона и дырки происходит высвобождение энергии. В зависимости от того, как расходуется эта энергия, рекомбинацию можно разделить на два вида: излучательную и безизлучательную.

Излучательной является рекомбинация, при которой энергия, освобождающаяся при переходе электрона на более низкий энергетический уровень, излучается в виде кванта света – фотона. При безизлучательной рекомбинации избыточная энергия передается кристаллической решетке полупроводника, т. е. избыточная энергия идет на образование фононов – квантов тепловой энергии.

Следует отметить, что генерация пар носителей «электрон – дырка» и появление собственной электропроводности полупроводника может происходить не только под действием тепловой энергии, но и при любом

другом способе энергетического воздействия на полупроводник – квантами лучистой энергии, ионизирующим излучением и т. д. [1]

Примесная электропроводность полупроводников

Как и в металлах, появление электрического тока в полупроводниках связано с возникновением дрейфа носителей заряда. Но если в металлах наличие свободных электронов в кристалле обусловлено самой природой металлической связи, то появление носителей заряда в полупроводниках определяется многими факторами, среди которых наиболее важными являются чистота полупроводника и его температура.

Полупроводники делятся на чистые, или, как их называют, собственные, и примесные, или легированные. Примесные полупроводники в свою очередь, в зависимости от типа вводимой примеси, делятся на донорные, или электронные, и акцепторные, или дырочные. Рассмотрим каждую из этих групп полупроводников отдельно.

Донорные примеси

Донор – это примесный атом или дефект кристаллической решетки, создающий в запрещенной зоне энергетический уровень, занятый в невозбужденном состоянии электроном и способный в возбужденном состоянии отдать электрон в зону проводимости.

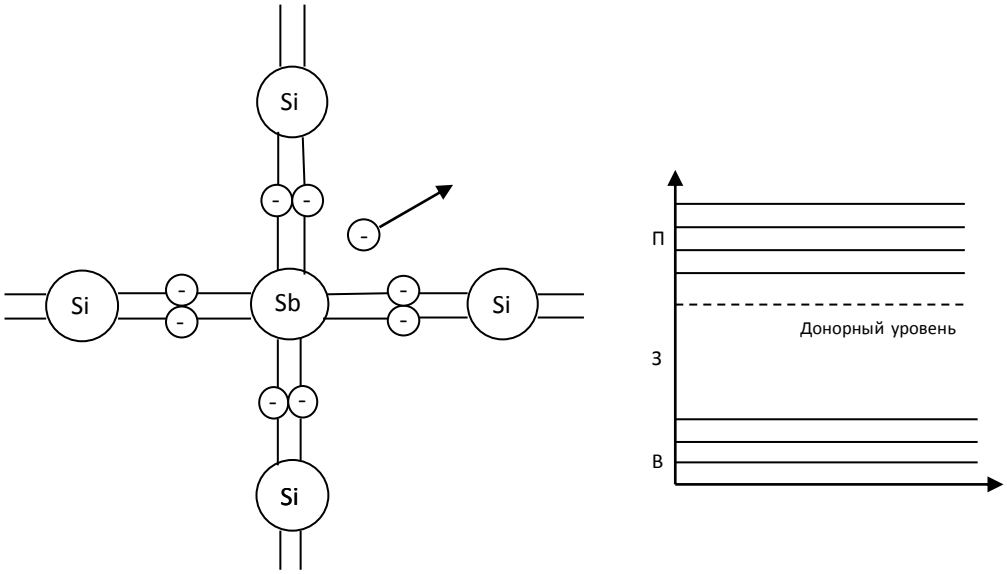

Рисунок 3. Образование электронной проводимости.

Рассмотрим сначала возникновение примесных уровней на примере так называемого донорного полупроводника, получающегося при введении, например, в кристалл четырехвалентного кремния примеси в виде атомов пятивалентного мышьяка (рис. 3). Четыре электрона из пяти валентных электронов атома мышьяка участвуют в образовании ковалент-

ных связей с четырьмя ближайшими соседними атомами кремния и тем самым принимают участие в создании кристаллической решетки. Эти электроны находятся в аналогичных условиях с валентными электронами атомов основного материала - кремния, благодаря чему они практически имеют такие же значения энергии, что и электроны атомов кремния, и располагаются в энергетическом спектре в пределах валентной зоны. Поэтому эти электроны атомов мышьяка изменения в энергетический спектр кремния не вносят. Пятый же электрон в образовании ковалентных связей не участвует. Его связь с ядром атома примеси гораздо слабее по сравнению с другими электронами.

С точки зрения зонной теории создавшаяся ситуация как раз и означает появление в энергетическом спектре кристалла дополнительного разрешенного уровня, соответствующего энергии пятого валентного электрона мышьяка. Располагается он вблизи дна зоны проводимости (рис. 3). При низких температурах, близких к абсолютному нулю, все пятые электроны примесных атомов примеси остаются связанными с атомами примеси то есть, находятся на своем донорном уровне. Зона проводимости при этом остается пустой, и донорный полупроводник, как и собственный полупроводник, при T = 0 К ничем не отличается от типичного диэлектрика. Даже при небольшом повышении температуры, когда увеличение энергии тепловых колебаний решетки делает ее сравнимой с энергией связи, происходит отрыв пятых электронов от атомов мышьяка и переход их в зону проводимости. Донорный полупроводник приобретает проводящие свойства за счет появления свободных электронов в межузловом пространстве кристаллической решетки. Кристалл полупроводника сохраняет свою электрическую нейтральность, так как заряд каждого электрона, перешедшего в зону проводимости, уравновешивается положительным зарядом иона примеси в узле кристаллической решетки. Таким образом, полупроводник получает свойство примесной электропроводности, обусловленной наличием свободных электронов в зоне проводимости.

Так как электронная проводимость является основной проводимостью в кристаллах с донорной примесью, то полупроводники с донорными примесями называют еще электронными полупроводниками или полупроводниками n-типа [2].

Энергетическая диаграмма распределения электронов по уровням в полупроводниках n-типа в отличие от собственных полупроводников изменяется (рисунок 3). Уровень Ферми E_F смещается по оси энергии вверх, к дну зоны проводимости $E_П$. При сообщении электрону небольшого приращения энергии он переходит в зону проводимости.

Акцепторные примеси

Акцептор – это примесный атом или дефект кристаллической решетки, создающий в запрещенной зоне энергетический уровень, свободный от электрона в невозбужденном состоянии и способный захватить элек-

трон из валентной зоны в возбужденном состоянии [1]. Рассмотрим случай, когда в кристалл кремния вводится примесь трехвалентного индия (рисунок 4). Для создания ковалентных связей с четырьмя ближайшими соседними атомами кремния примесному атому не хватает одного электрона, то есть в кристаллической решетке кремния одна двойная связь оказывается незаполненной. Создание полноценной ковалентной связи с четвертым соседним атомом может быть обеспечено переходом к атому индия электрона от другого атома кремния, но для этого электрону должна быть сообщена некоторая дополнительная энергия. Поэтому при температуре, близкой T = 0 K, когда такой дополнительной энергии электрону получить неоткуда, валентные электроны кремния остаются в ковалентных связях, находясь в валентной зоне, а примесные атомы индия так и остаются нейтральными атомами с незаполненными четвертыми связями. Но само присутствие атомов индия в кристалле создает принципиальную возможность электронам, получившим некоторую дополнительную энергию, перейти на более высокие энергетические уровни, обусловленные созданием дополнительных связей атомами индия. Очевидно, что при T = 0 K полупроводник примесной электропроводностью не обладает, так как нет свободных носителей заряда (ни электронов в зоне проводимости, ни дырок в валентной зоне).

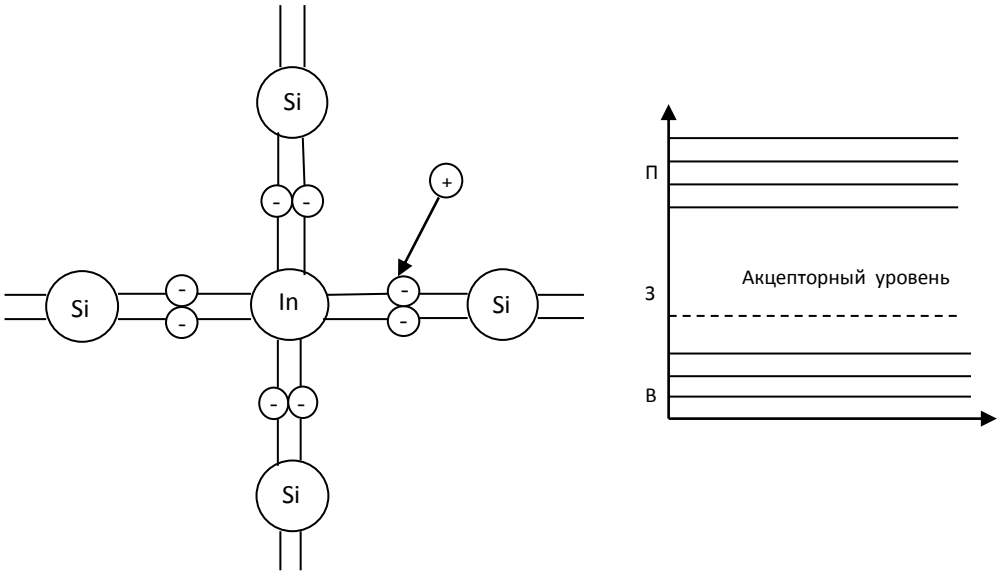

Рис. 4. Образование дырочной проводимости.

Одна из связей остается не заполненной из-за отсутствия необходимого электрона у атома примеси. Поэтому заполнение этой свободной связи может произойти за счет электрона, перешедшего к атому примеси от соседнего атома основного полупроводника при нарушении какой-либо связи. При этом атом примеси, приобретая лишний электрон, становится отрицательно заряженным ионом, а дырка, образовавшаяся в атоме основного полупроводника, имея единичный положительный заряд, может пе-

ремещаться от одного атома полупроводника к другому внутри кристалла, участвуя в тепловом движении; взаимодействуя с электрическими и магнитными полями, а также под действием градиента концентрации [1]. Образование дырок в валентной зоне и означает появление в кристалле дырочной проводимости. Благодаря такому типу проводимости и сами полупроводники получили название дырочных полупроводников или полупроводников p-типа. Примеси, вводимые в полупроводник для захвата электронов из валентной зоны, получили название акцепторов, из-за чего энергетические уровни этих примесей называются акцепторными уровнями, а сами полупроводники с такими примесями - акцепторными полупроводниками. [2].

Отрицательно заряженные ионы акцепторной примеси в акцепторном полупроводнике не перемещаются внутри кристалла, так как находятся в узлах кристаллической решетки. В целом кристалл полупроводника электрически нейтрален, потому что суммарный положительный заряд дырок уравновешивается суммарным зарядом отрицательных ионов примеси. Для акцепторного полупроводника энергетическая диаграмма распределения электронов по уровням имеет вид, представленный на рисунке 4.

Вероятность захвата электрона и перехода его из валентной зоны, что означает возникновение в ней дырки, возрастает в полупроводниках p-типа, поэтому уровень Ферми E_F здесь смещается вниз, к границе валентной зоны.

Следует отметить, что при очень больших концентрациях примесей в полупроводниках уровень Ферми может даже выходить за пределы запрещенной зоны либо в зону проводимости (в полупроводниках n-типа) либо в зону валентную (в полупроводниках p-типа). Такие полупроводники называются вырожденными.

В примесных полупроводниках основными носителями заряда являются: электроны в полупроводниках n-типа, дырки – в полупроводниках p-типа, неосновными – электроны в полупроводниках p-типа, а дырки в полупроводниках n-типа. Существует связь между концентрацией основных и неосновных носителей – закон действующих масс:

$$np = n_i^2. \qquad (1)$$

Дрейф и диффузия зарядов в полупроводниках

В полупроводниковых кристаллах процесс переноса зарядов наблюдается при наличии электронов в зоне проводимости и при наличии дырок в валентной зоне. В этом случае перенос носителей зарядов (при отсутствии градиентов температуры) возможен либо под действием электрического поля – дрейф, либо под действием градиента концентрации носителей заряда – диффузия.

Дрейф носителей заряда

Дрейфом называют направленное движение носителей заряда под действием электрического поля. Электроны, получая ускорение в электрическом поле, приобретают на средней длине свободного пробега добавочную составляющую скорости, которая называется дрейфовой скоростью $\upsilon_{n\,др}$, к своей средней скорости движения [1].

В обычных условиях дрейфовая скорость электронов мала по сравнению с их средней скоростью хаотического теплового движения. Плотность дрейфового тока определяется выражением:

$$j_{n\,\text{др}} = qn\upsilon_{n\,\text{др}}, \tag{2}$$

где n – концентрация электронов.

Подвижностью называется дрейфовая скорость, приобретаемая электроном в электрическом поле с единичной напряженностью:

$$\mu = \frac{\upsilon_{n\,\text{др}}}{E}. \tag{3}$$

Тогда плотность дрейфового тока электронов можно записать в виде:

$$j_{n\,\text{др}} = qn\mu E. \tag{4}$$

Составляющая электрического тока под действием внешнего электрического поля называется дрейфовым током. Так как проводимость полупроводников определяется двумя типами зарядов, то можно выделить электронную и дырочную составляющие полного дрейфового тока. Плотность дрейфового тока при наличии в полупроводнике свободных электронов и дырок равна сумме этих составляющих:

$$j_{\text{др}} = j_{n\,\text{др}} + j_{p\,\text{др}} = qE(n\mu_n + p\mu_p). \tag{5}$$

Удельная электрическая проводимость равна отношению плотности дрейфового тока к величине напряженности электрического поля *E*, вызвавшего этот ток:

$$\sigma = \frac{j_{\text{др}}}{E}. \tag{6}$$

Диффузия носителей заряда

Диффузия в полупроводнике возникает при возникновении градиента концентрации носителей заряда в объеме кристалла и отсутствии перепадов температуры. Диффузия – это движение носителей заряда, вызванное неравномерным распределением концентрации, в результате которого происходит выравнивание концентраций носителей заряда.

Плотность потока частиц при диффузии Φ_m, т.е. число частиц, пересекающих в единицу времени сечение единичной площади, перпендикулярное направлению движения частиц, пропорциональна градиенту концентрации этих частиц – закон Фика:

$$\Phi_m = -D\,grad\,n, \tag{7}$$

где D_m – коэффициент диффузии, равный абсолютному значению отношения плотности потока частиц к градиенту их концентрации.

Знаки правой и левой части формулы (7) различны, т. к. плотность потока частиц направлена противоположно градиенту концентрации. Так как любое упорядоченное движение одноименно заряженных частиц это электрический ток, то умножением правой части выражения (7) на заряд электрона можно получить плотность электронной составляющей диффузионного тока. Направление перемещения электронов противоположно вектору градиента концентрации, а сами электроны отрицательный заряд, т.е. знак минус в правой части пропадает. Тогда направление вектора плотности диффузионного тока электронов будет совпадать с направлением вектора градиента концентрации электронов, и в одномерном случае можно получить:

$$j_{n\,\text{диф}} = qD_n \frac{dn}{dx}. \tag{8}$$

С другой стороны заряд дырок положителен, следовательно, направление вектора плотности диффузионного тока дырок будет совпадать с направлением их диффузионного перемещения, т. е. противоположно направлению вектора градиента концентрации дырок. Тогда, в правой части выражения остается знак минус:

$$j_{p\,\text{диф}} = -qD_p \frac{dp}{dx}. \tag{9}$$

Выражение для полной плотности диффузионного тока в одномерном случае, который обусловлен перемещением электронов и дырок из мест с большей концентрацией в области с меньшей концентрацией, можно записать в виде:

$$j_{\text{диф}} = q(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx}). \tag{10}$$

Избыточная концентрация носителей заряда уменьшается в направлении от места источника этой избыточной концентрации, т.к. одновременно с процессом диффузии носителей заряда происходит процесс их рекомбинации.

Диффузионной длиной L называется расстояние, на котором при одномерной диффузии в полупроводнике без электрического поля избыточная концентрация носителей заряда уменьшается в результате рекомбинации в e раз. Иначе, это расстояние, на которое диффундирует носитель за время жизни [1]. Диффузионная длина L связана со временем жизни носителей соотношениями

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}, L_p = \sqrt{D_p \tau_p}, \tag{11}$$

где τ_n и τ_p– время жизни электронов и дырок, соответственно.

Распределение электронов по энергетическим уровням в полупроводниках

Электроны в металле, располагаются по энергетическим уровням в строгом порядке. Каждый электрон занимает вакантное место самом низ-

ком уровне. Распределение электронов по уровням подчиняется принципу Паули: никакие две частицы не могут находиться в совершенно одинаковых состояниях. Поэтому на каждом энергетическом уровне может расположиться не более двух электронов, имеющих различные направления спинов. По мере заселения нижних уровней происходит заполнение более высоко расположенных уровней. Если в рассматриваемом кристалле имеется N свободных электронов, то в отсутствие теплового возбуждения, то есть при абсолютном нуле температуры, все свободные электроны разместятся попарно на N/2 нижних уровнях. Самый высокий энергетический уровень потенциальной ямы металла, занятый электронами при T = 0, называется уровнем Ферми, а энергия электрона, находящегося на этом уровне, называется энергией Ферми. Все энергетические уровни, расположенные выше уровня Ферми, при T = 0 К являются абсолютно пустыми [2].

В полупроводниках на уровне Ферми, как правило, электронов нет. Но физический смысл уровня остается тем же, что и в случае металлов: это уровень, определяющий среднюю энергию электронов (или носителей вообще), могущих принять участие в проводимости. Именно поэтому уровень его и в случае полупроводников называют уровнем Ферми.

При неизменном температурном состоянии полупроводника распределение электронов по энергетическим уровням подчиняется квантовой статистике Ферми-Дирака. С ее помощью можно определить концентрацию электронов в зоне проводимости, дырок в валентной зоне и определить зависимость удельной электропроводности полупроводника от температуры, наличия примесей и других факторов.

Характер распределения частиц по разным уровням или состояниям в тех или иных условиях определяется так называемой функцией распределения:

$$f_n(E) = \frac{1}{1+e^{\frac{E-E_F}{kT}}}, \qquad (12)$$

где E_F – энергия уровня Ферми (средний энергетический уровень, вероятность заполнения которого равна 0,5 при T равной 0 K).

Функция распределения описывает вероятность занятости того или иного уровня частицами. Если достоверно известно, что данный уровень заселен частицей, то говорят, что вероятность обнаружения частицы на этом уровне равна 1. Если же с полной достоверностью можно сказать, что на рассматриваемом уровне нет частиц, то говорят, что вероятность обнаружения частиц в рассматриваемом состоянии равна 0. Однако во многих случаях нельзя достоверно утверждать, что уровень заполнен или пуст. Тогда вероятность нахождения частицы на рассматриваемом уровне отлична от нуля, но меньше единицы. При этом чем больше вероятность обнаружить частицу на рассматриваемом уровне, тем ближе к единице оказывается значение функции распределения для соответствующего состояния.

Функция $1 - f_n(E)$ определяет вероятность того, что квантовое состояние с энергией E свободно от электрона, т. е. занято дыркой

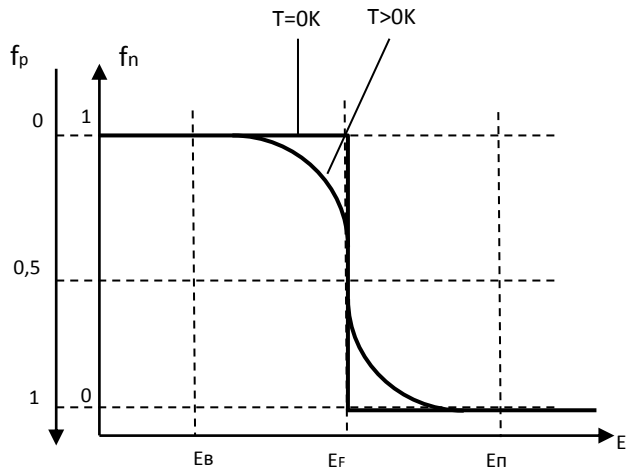

Рис. 5. Функция распределения Ферми.

Вид функции распределения представлен на рисунке 5. При температуре абсолютного нуля функция распределения Ферми имеет ступенчатый характер. Это связано с тем, что при T=0 K все энергетические уровни, находящиеся выше уровня Ферми, абсолютно пусты. При повышении температуры увеличивается вероятность перехода электрона на более высокий энергетический уровень, расположенный выше уровня Ферми. Это приводит к тому, что резкий ступенчатый характер функции распределения становится плавным в небольшой области энергий, близких к энергии Ферми.

Для свободных электронов в металле распределение Ферми по энергиям определяется следующими выражениями:
при $T > 0$

$$dn(E) = \frac{1}{2\pi^2} \cdot \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{3/2} \frac{E^{1/2} dE}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}; \tag{13}$$

при $T = 0$

$$dn(E) = \frac{1}{2\pi^2} \cdot \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{3/2} E^{1/2} dE, \tag{14}$$

где $n(E)$ – концентрация электронов, энергия которых заключена в интервале E, $E+dE$, E_F – уровень Ферми.

Концентрации электронов в зоне проводимости можно определить следующим образом:

$$n = \frac{8}{3\sqrt{\pi}} \left(\frac{2\pi m}{h^2}\right)^{3/2} E_F(0) \left[1 + \frac{\pi^2}{8(E_F / \kappa T)^2} + \ldots\right], \tag{15}$$

где $E_F(0)$ – уровень Ферми при абсолютном нуле температуры.

Из выражения (15) можно получить:

$$E_F = E_F(0)\left[1 - \frac{\pi}{12}\left(\frac{\kappa T}{E_F(0)}\right)\right], \tag{16}$$

где

$$E_F(0) = \left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{2/3} \frac{h^2}{2m}, \tag{17}$$

$E_F(0)$ – энергетический уровень в металле при температуре абсолютного нуля, максимальный заполненный электронами.

Среднюю тепловую энергию электронов в металле можно определить выражением:

$$E_{ср.т.} = \frac{\pi^2}{4}\frac{(\kappa T)^2}{E_F}. \tag{18}$$

Вырожденную температуру можно определить:

$$T_{кр} = \frac{2\pi\hbar^2}{\kappa m} n^{2/3}. \tag{19}$$

В собственном полупроводнике концентрации электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне определются следующими соотношениями:

концентрация электронов

$$n = N_c \exp(E_F - E_c)/(\kappa T), \tag{20}$$

где E_c – уровень соответствующий дну зоны проводимости, N_c – эффективная плотность состояний в зоне проводимости:

$$N_c = 2\left(\frac{2\pi\, m\, kT}{h^2}\right)^{3/2}. \tag{21}$$

концентрация дырок

$$p = N_v \exp(E_v - E_F)/(\kappa T), \tag{22}$$

где E_v – уровень соответствующий потолку валентной зоны, N_v – эффективная плотность состояний в валентной зоне:

$$N_v = 2\left(\frac{2\pi\, mkT}{h^2}\right)^{3/2} \tag{23}$$

С учетом общей электрической нейтральности собственного полупроводника для концентрации носителей можно записать следующее выражение:

$$n = p = n_i = \sqrt{N_c N_v}\exp\left(\frac{E_g}{2\kappa T}\right), \tag{24}$$

где $E_g = E_c - E_v$ – ширина запрещенной зоны.

Уровень Ферми в собственном полупроводнике определяется следующим образом:

$$E_F = \frac{E_c - E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p^*}{m_n^*}.. \qquad (25)$$

В донорных и акцепторных полупроводниках концентрации носителей заряда при различных температурах определяются:

$$n_n = \sqrt{N_д N_c / 2} \exp\left[-\Delta E_д / (2kT)\right], \qquad (26)$$

$$p_p = \sqrt{N_a N_v / 2} \exp\left[-\Delta E_a / (2kT)\right], \qquad (27)$$

где $N_д$, N_a – концентрации донорной и акцепторной примеси;
$\Delta E_g, \Delta E_a$ – энергия ионизации донорной или акцепторной примеси.

Уровень Ферми в примесном полупроводнике определяется следующим образом:

$$E_{Fn} = \frac{E_c - E_g}{2} - \frac{\kappa T}{2} \ln \frac{N_a}{N_v}; \qquad (28)$$

$$E_{Fp} = \frac{E_a - E_v}{2} - \frac{\kappa T}{2} \ln \frac{N_c}{N_д}. \qquad (29)$$

Скорость изменения концентрации носителей в полупроводнике можно определить с помощью уравнения непрерывности. В одномерного случая его можно записать в виде:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + E_x \mu_n \frac{\partial n}{\partial x} + g + \frac{\Delta n}{\tau_n}, \qquad (30)$$

где D_n – коэффициент диффузии;
g – скорость генерации;
Δn – избыточная концентрация электронов;
τ_n – время жизни электронов.

Для дырок можно записать аналогичное выражение. Выражение (30) описывает общий случай: наличие и диффузионного и дрейфового токов, и присутствие процессов генерации и рекомбинации носителей заряда. При уменьшении числа факторов уравнение (30) значительно упрощается.

Электронно-дырочный переход

Важное значение в развитии полупроводниковой техники имеет использование контакта двух примесных полупроводников с различными типами проводимости. Электронно-дырочным называется переход, возникающий в месте контакта двух областей полупроводника с различными типами проводимости: электронной (n) и дырочной (p). Изготовить его путем механического соприкосновения двух полупроводников практически невозможно. Поэтому p-n переход – это внутренняя граница в монокристаллическом полупроводнике. В полупроводниковой технике широко используется вентильное свойство (односторонняя проводимость) p-n переходов.

Электронно-дырочная проводимость возникает в результате разрыва валентных связей, являясь собственной проводимостью, которая обычно невелика. Под воздействием электрического поля, температуры и других внешних факторов электрические свойства полупроводников изменяются в значительно большей степени, чем свойства проводников и диэлектриков [3].

При сплавлении полупроводников различных типов создаётся область объёмного заряда по обе стороны от границы раздела, называемая электронно-дырочным или p-n переходом. При этом возникает так называемый запирающий (барьерный) слой в несколько микрометров, лишенный носителей заряда, с напряженностью электрического поля, которая препятствует диффузии носителей заряда [3].

При комнатной температуре атомы доноров и акцепторов можно считать полностью ионизированными, т.е. в полупроводнике p-типа концентрация подвижных дырок проводимости равна концентрации неподвижных отрицательных ионов ($p_p = N_a$), а в полупроводнике n-типа концентрация электронов проводимости равна концентрации неподвижных положительных ионов ($n_n = N_д$). Концентрация дырок проводимости p_p в полупроводнике p-типа обычно намного больше, чем концентрация дырок проводимости p_n в полупроводнике n-типа, где они являются неосновными носителями заряда.

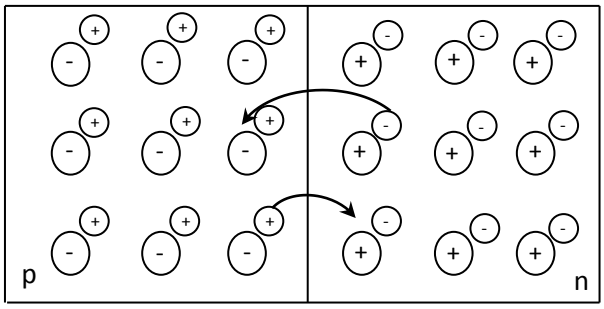

Рис. 6. Образование запирающего слоя.

Электроны, пришедшие в p-область, рекомбинируют с дырками p-области вблизи границы раздела и дырки в n-области – с электронами рисунок 6. В результате в слое n-области вблизи контакта, вследствие рекомбинации, свободные электроны практически отсутствуют. Поэтому в полупроводнике возникает область, состоящая из неподвижных положительных зарядов ионов донорных атомов, а в p-области формируется слой неподвижных отрицательно заряженных ионизированных акцепторов.

Заряды положительно и отрицательно заряженных ионов примеси создают в p-n переходе электрическое поле с разностью потенциалов φ_k, которое сосредоточено в области перехода и практически не выходит за его пределы. Поэтому вне этого слоя свободные носители заряда по-прежнему движутся хаотично и число носителей заряда, ежесекундно наталкивающихся на слой объемного заряда, зависит только от их концентрации и скорости теплового движения.

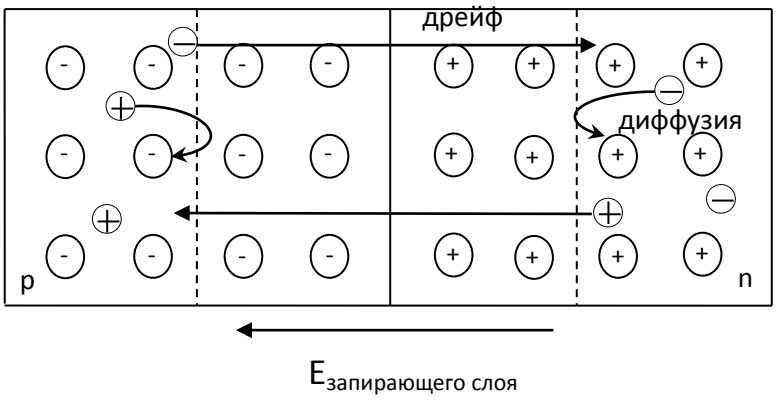

Рис. 7. Электрическое поле запирающего слоя.

Контактное электрическое поле примесных ионов является потенциальным барьером для основных носителей заряда, тогда как неосновные носители заряда (дырки из n-области и электроны из p-области) ускоряются электрическим полем и беспрепятственно проходят через переход, образуя дрейфовый ток, направленный противоположно диффузионному, рисунок 7. Так как в изолированном полупроводнике суммарная плотность тока должна быть равна нулю, то устанавливается динамическое равновесие, при котором диффузионный и дрейфовый потоки электронов и дырок через электронно-дырочный переход компенсируют друг друга. Следовательно, через p-n-переход одновременно перетекают четыре составляющих тока. При этом в изолированном полупроводнике общая плотность тока будет равна нулю:

$$j = -qD_p\left(\frac{dp}{dx}\right) + qp\mu_p E + qD_n\left(\frac{dn}{dx}\right) + qn\mu_n E. \qquad (31)$$

Образование потенциального барьера можно пояснить и с использованием диаграммы энергетических уровней, рисунок 8. Вблизи границы раздела уровень Ферми проходит через середину запрещенной зоны.

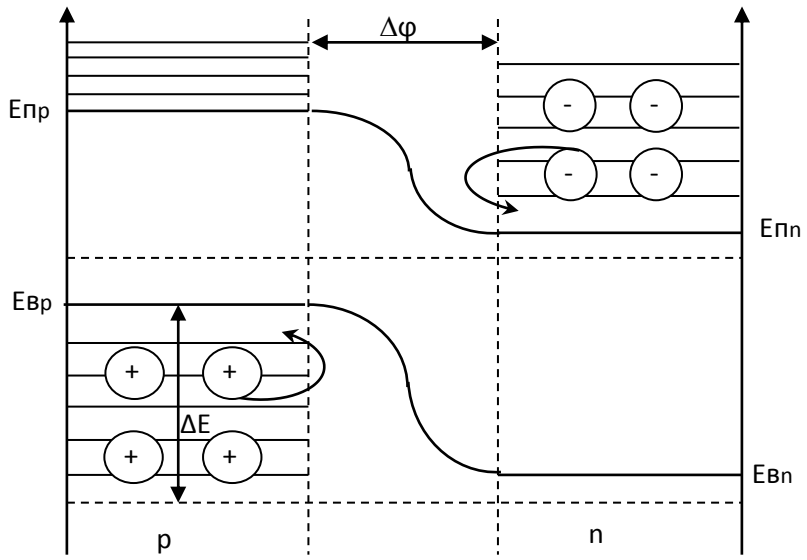

Рис. 8. Диаграмма энергетических уровней p-n-перехода

Поскольку в полупроводнике n-типа уровень Ферми смещается в сторону зоны проводимости, а в полупроводнике p-типа — в сторону валентной зоны, то в дырочной области дно зоны проводимости должно лежать значительно дальше от уровня Ферми, чем дно зоны проводимости в электронной области [4]. Это приводит к тому, что в области p-n-перехода происходит искажение диаграммы энергетических зон, как показано на рисунке 8. Высота потенциального барьера или контактная разность потенциалов в электронно-дырочном-переходе зависит от положения уровня Ферми в p- и n-области. Увеличение концентрации электронов или дырок в любой из областей приводит к перемещению уровня Ферми от середины запрещённой зоны, и следовательно, увеличивает контактную разность потенциалов. Уменьшение концентрации примесей, наоборот, уменьшает ее, т.е. снижает высоту потенциального барьера. Контактную разность потенциалов можно определить по формуле:

$$\Delta\varphi = \varphi_T ln\frac{n_{n0}}{n_{p0}} = \varphi_T ln\frac{p_{p0}}{p_{n0}}, \quad \varphi_T = \frac{kT}{q}, \tag{32}$$

откуда

$$n_{p0} = n_{n0}e^{-\frac{\Delta\varphi}{\varphi_T}}, \tag{33}$$

$$p_{n0} = p_{p0}e^{-\frac{\Delta\varphi_0}{\varphi_T}}. \tag{34}$$

где n_{n0}, p_{p0}, n_{p0}, p_{n0} равновесные концентрации основных и неосновных носителей заряда соответственно в n- и p-области, где $\Delta\varphi$ — высота потенциального барьера в вольтах; φ_T — температурный потенциал.

При T=300 К температурный потенциал φ_T (300 К) ~ 0,026 В. У большинства германиевых переходов φ_T = 0,3-0,4 В; у кремниевых переходов — 0,7-0,8 В.

Вентильные свойства p-n-перехода

При приложении к p-n-переходу некоторого внешнего напряжения — напряжения смещения происходит изменение условий переноса заряда через p-n-переход.

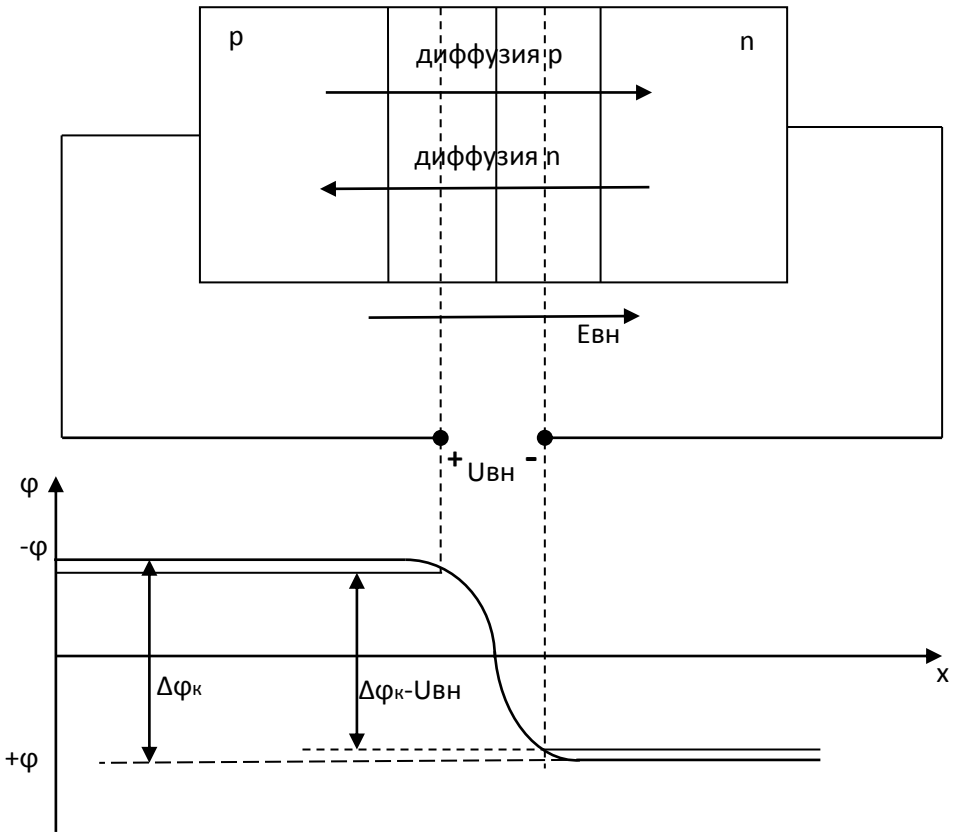

Рис. 9. Прямое смещение p-n-перехода.

Когда к области с дырочным типом проводимости подключается положительный полюс источника внешнего напряжения, а к области с электронным типом — отрицательный (напряжение с такой полярностью будем называть прямым $U_{\text{пр}}$), основные носители заряда под действием внешнего поля перемещаются по направлению к p-n-переходу, рисунок 9. В приконтактных слоях концентрация носителей увеличивается, толщина перехода становится меньше и сопротивление p-n-перехода понижается. В этом случае приложенное к переходу результирующее напряжение определяется: $\Delta\varphi_2 = \Delta\varphi - U_{\text{пр}}$. Это приводит к уменьшению высоты потенциального барьера, а диффузионный ток основных носителей через переход соответственно возрастает. Этот ток через переход будем называть прямым. При $U_{\text{пр}} < \Delta\varphi$ потенциальный барьер ускоряет неосновные носители заряда — составляющая дрейфового тока, а при $U_{\text{пр}} > \Delta\varphi$ — тормозит это движению. При $U_{\text{пр}} >> \Delta\varphi$ p-n-переход исчезает.

Если отрицательный полюс источника напряжения U подключить к p-области, а положительный к n-области, то электрическое поле источника

заставляет основные носители заряда дрейфовать от слоев близких к p-n-переходу в глубь полупроводника (напряжение с такой полярностью будем называть обратным $U_{\text{обр}}$). Перемещение зарядов приводит к обеднению основными носителями приконтактных слоев, что в свою очередь приводит к увеличению ширины запирающего слоя. Потенциальный барьер увеличивается по сравнению с равновесным состоянием и проводимость p-n-перехода падает. Большая часть приложенного внешнего напряжения падает на переходе, падением напряжения в остальном объеме полупроводника практически можно пренебречь. Высота потенциального барьера в переходе увеличивается на величину приложенного обратного напряжения: $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi + U_{\text{обр}}$.

Когда изменяется высота потенциального барьера термодинамическое равновесие нарушается, и соотношение между диффузионным и дрейфовым токами изменяется. Дрейфовый ток через p-n-переход изменяет скорость переноса неосновных носителей заряда, но не влияет на количество переносимых носителей, т.е. он почти не зависит от приложенного внешнего напряжения. Составляющая тока через переход, обусловленная диффузионным перемещением зарядов, зависит от высоты потенциального барьера. Это приводит к тому, что в случае подключения к переходу обратного напряжения величина диффузионного тока через переход уменьшается с увеличением обратного напряжения [1]. При увеличении обратного напряжения общий ток через переход стремится к величине дрейфового тока. Этот ток называется обратным током насыщения p-n-перехода I_0 или тепловым током.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) p-n-перехода

Вольтамперная характеристика p-n-перехода – это зависимость силы тока через p-n-переход от величины приложенного к нему напряжения. ВАХ рассчитывают предполагая, что электрическое поле вне запирающего слоя отсутствует, т. е. все напряжение приложено только к электронно-дырочному-переходу. Выражения для тока текущего через p-n-переход можно записать следующим образом:

$$I = I_0\left(e^{\frac{qU_{\text{вн}}}{kT}} - 1\right). \tag{35}$$

Обратный ток или тепловой ток I_0:

$$I_0 = q\left(\upsilon_p p_{n0} + \upsilon_n n_{p0}\right) = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n}. \tag{36}$$

При положительном напряжении смещения нарастание силы тока, в основном определяемой диффузионной составляющей, через переход происходит по экспоненциальному закону (35). Нелинейность характеристики на начальном участке прямого тока (рисунок 10) связана с уменьшением толщины p-n-перехода и увеличением его проводимости с ростом прямого

напряжения смещения в области малых его значений. При дальнейшем увеличении прямого напряжения характеристика становится практически линейной, так как потенциальный барьер, а вместе с ним и запирающий слой, исчезают, и приложенная разность потенциалов оказывается распределенной по всей длине образца. На данном участке ВАХ выполняется закон Ома.

При обратном напряжении внешнего источника обратный ток на начальном участке сначала растет за счет уменьшения диффузионного тока при увеличении ширины запирающего слоя. При больших напряжениях диффузионный ток падает практически до нуля, и обратный ток становится равным дрейфовому току, который, почти не зависит от приложенного напряжения. Интенсивный рост обратного тока на участке пробоя объясняется нагревом p-n-перехода самим током и другими побочными эффектами.

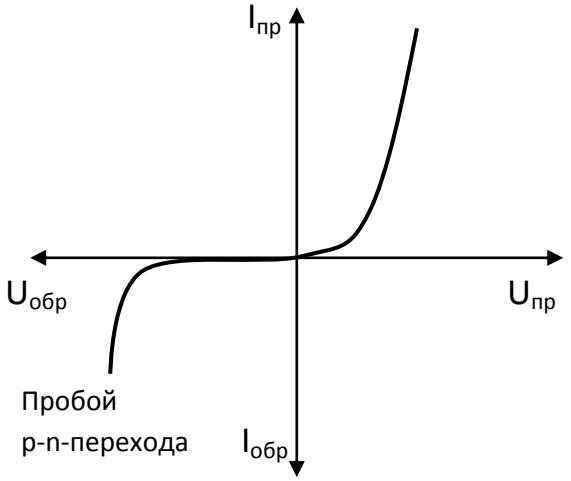

Рис. 10. Вольт-амперная характеристика p-n-перехода

Первая четверть соответствует участку прямой ветви вольт-амперной характеристики, а третья – обратной ветви. Увеличение напряжения прямого смещения приводит к росту тока p-n-перехода. Вначале этот ток возрастает относительно медленно (рис. 10), а затем начинается участок быстрого нарастания прямого тока. Быстрый рост прямого тока приводит к нагреву полупроводникового кристалла. Если количество джоулевого тепла превысит количество тепла, отводимого от полупроводниковой структуры, то в кристалле могут произойти необратимые изменения вплоть до разрушения структуры. Поэтому необходимо исключить перегрев полупроводника ограничивая прямой ток p-n-перехода на приемлемом уровне.

Величина потенциального барьера носителей зарядов, возникающего на p-n переходе может быть также определена, через работы их выхода:

$$\varphi_0 = A_p - A_n = eU_k = kT\ln\frac{P_p}{P_n} = kT\ln\frac{n_n}{n_p}, \qquad (36)$$

или

$$\varphi_0 = kT \ln \frac{N_a N_\partial}{n_i^2},$$

где A_p, A_n – работа выхода в p и n полупроводнике, U_k – контактная разность потенциалов.

Из выражения (36) можно получить зависимость потенциального барьера от ширины запрещенной зоны E_g

$$\varphi_0 = eU_k = E_g - kT \ln \frac{N_c N_\vartheta}{n_n p_p}, \tag{37}$$

где N_c, N_ϑ – эффективные плотности состоянии в зоне проводимости и валентной зоне.

На p-n переходе возникает объемный заряд толщиной d, который зависит от внешнего напряжения U

$$d = d_p + d_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e} \cdot \frac{n_n + p_p}{n_n \cdot p_p}(U_k - U)}, \tag{38}$$

где d_p, d_n – ширины заряда в p и n области.

В отсутствие внешнего электрического поля эти величины можно записать

$$\left.\begin{aligned} d_p &= d\frac{n_n}{n_n + p_p} \\ d_n &= d\frac{p_p}{n_n + p_p} \end{aligned}\right\}. \tag{39}$$

Возникающий диффузионный заряд перехода создает электрическое поле, имеющее напряженность в p-области:

$$E_p = -\frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} N_a (d_p - x).$$

В n-области:

$$E_p = -\frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} N_d (d_n + x).$$

Виды пробоев p-n-перехода

Возможны обратимые и необратимые пробои. Обратимый пробой – это пробой, после которого p-n-переход сохраняет работоспособность. Необратимый пробой ведет к разрушению структуры полупроводника. Существуют четыре типа пробоя:

- лавинный,

- туннельный,
- тепловой,
- поверхностный.

Лавинный и туннельный пробои объединятся под названием – электрический пробой, который является обратимым. К необратимым относят тепловой и поверхностный. Лавинный пробой свойственен полупроводникам, со значительной толщиной p-n-перехода, образованным слаболегированными полупроводниками. При этом ширина обедненного слоя гораздо больше диффузионной длины носителей. Пробой происходит под действием сильного электрического поля с напряженностью порядка 10^2 В/м. В лавинном пробое основная роль принадлежит неосновным носителям, образующимся под действием тепла в p-n-переходе. Эти носители испытывают со стороны электрического поля p-n-перехода ускоряющее действие и начинают ускоренно двигаться вдоль силовых линий этого поля. При определенной величине напряженности неосновные носители заряда на длине свободного пробега могут разогнаться до такой скорости, что их кинетической энергии может оказаться достаточно, чтобы при очередном соударении с атомом полупроводника ионизировать его, т. е. «выбить» один из его валентных электронов и перебросить его в зону проводимости, образовав при этом пару электрон – дырка. Образовавшиеся носители тоже начнут разгоняться в электрическом поле, сталкиваться с другими нейтральными атомами, и процесс, таким образом, будет лавинообразно нарастать. При этом происходит резкий рост обратного тока при практически неизменном обратном напряжении [1-3].

Туннельный пробой происходит в очень тонких p-n-переходах, что возможно при очень высокой концентрации примесей порядка 10^{25} $м^{-3}$, когда ширина перехода становится малой (порядка 0,01 мкм) и при небольших значениях обратного напряжения (несколько вольт), когда возникает большой градиент электрического поля. Высокое значение напряженности электрического поля, воздействуя на атомы кристаллической решетки, повышает энергию валентных электронов и приводит к их туннельному «просачиванию» сквозь «тонкий» энергетический барьер из валентной зоны p-области в зону проводимости n-области. Причем «просачивание» происходит без изменения энергии носителей заряда. Для туннельного пробоя также характерен резкий рост обратного тока при практически неизменном обратном напряжении.

Если обратный ток при обоих видах электрического пробоя не превысит максимально допустимого значения, при котором произойдет перегрев и разрушение кристаллической структуры полупроводника, то они являются обратимыми и могут быть воспроизведены многократно.

Тепловым называется пробой p-n-перехода, обусловленный ростом количества носителей заряда при повышении температуры кристалла. С увеличением обратного напряжения и тока возрастает тепловая мощность, выделяющаяся в p-n-переходе, и, соответственно, температура кристал-

лической структуры. Под действием тепла усиливаются колебания атомов кристалла, и ослабевает связь валентных электронов с ними, возрастает вероятность перехода их в зону проводимости и образования дополнительных пар носителей «электрон – дырка». Если электрическая мощность в p-n-переходе превысит максимально допустимое значение, то процесс термогенерации лавинообразно нарастает, в кристалле происходит необратимая перестройка структуры и p-n-переход разрушается.

Поверхностный пробой. Распределение напряженности электрического поля в p-n-переходе может существенно изменить заряды, имеющиеся на поверхности полупроводника. Поверхностный заряд может привести к увеличению или уменьшению толщины перехода, в результате чего на поверхности перехода может наступить пробой при напряженности поля, меньшей той, которая необходима для возникновения пробоя в толще полупроводника. Это явление называют поверхностным пробоем. Большую роль при возникновении поверхностного пробоя играют диэлектрические свойства среды, граничащей с поверхностью полупроводника.

Емкость p-n-перехода

Электронно-дырочный переход представляет собой обедненную подвижными носителями область полупроводника, близкую по своим свойствам к слою диэлектрика, в котором по разные стороны от некоторой плоскости находятся объемно распределенные неподвижные электрические заряды противоположных знаков. В полупроводнике это заряды ионизированных примесных атомов: электронная область перехода заряжена положительно, а дырочная - отрицательно. Такая структура p-n-перехода позволяет его в известной мере уподобить плоскому конденсатору. Включение обратного напряжения смещения приводит к дальнейшему вытеснению подвижных носителей из приграничных областей, увеличению толщины p-n-перехода и числа некомпенсированных неподвижных ионов примесей по обе стороны от границы раздела. Таким образом на изменение ΔU обратного напряжения смещения p-n-переход откликается изменением заряда ΔQ. А это и есть проявление емкостных свойств. Величина

$$C_{бар} = \frac{\Delta Q}{\Delta U} \qquad (40)$$

называется барьерной емкостью [2,3].

Особенностью барьерной емкости является нелинейный характер ее зависимости от напряжения, рисунок 11. При возрастании обратного напряжения ширина запирающего слоя увеличивается и, следовательно, емкость перехода уменьшается.

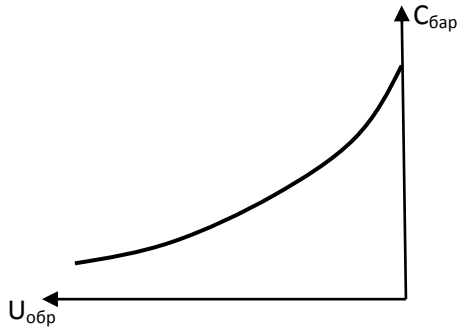

Рис. 11. Вольт-фарадная характеристика p-n-перехода

Гетеропереходы

Под гетеропереходом понимается контакт двух различных по химическому составу полупроводников, при котором кристаллическая решетка одного материала без нарушения периодичности переходит в решетку другого материала.

Различают изотипные и анизотипные гетеропереходы. Если гетеропереход образован двумя полупроводниками одного типа проводимости, то говорят об изотипном гетеропереходе. Анизотипные гетеропереходы образуются полупроводниками с разным типом проводимости.

Существует три модели гетероперехода:

- идеальный гетеропереход;
- неидеальный гетеропереход;
- гетеропереход с промежуточным слоем.

В идеальном гетеропереходе, в отличие от неидеального, на границе раздела материалов отсутствуют локальные энергетические состояния для электронов. Гетеропереход с промежуточным слоем формируется через слой конечной толщины и локальные энергетические состояния могут существовать как в самом промежуточном слое, так и на границах его раздела.

Ширина энергетических зон различных полупроводников различна. Поэтому на границе раздела двух полупроводников получается обычно разрыв дна проводимости. Разрыв дна зоны проводимости определяется различием энергий сродства к электрону двух контактирующих полупроводников (энергия сродства к электрону – разница энергий потолка верхней свободной зоны и дна проводимости). В результате разрывов дна зоны проводимости и потолка валентной зоны высота потенциальных барьеров для электронов и дырок в гетеропереходе оказывается различной. Это является особенностью гетеропереходов, обусловливающей специфические свойства гетеропереходов в отличие p-n-переходов, которые формируются в монокристалле одного полупроводника [2].

Полупроводниковый диод

Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя выводами, в котором используется то или иное свойство выпрямляющего электрического перехода.

Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока. Выпрямительные полупроводниковые диоды изготавливаются, как правило, из кремния или германия. В зависимости от частоты выпрямляемого тока они делятся на низкочастотные и высокочастотные. В зависимости от мощности – на диоды малой, средней и большой мощности, что соответствует предельным значениям выпрямленного тока до 300 мА, от 300 мА, до 10 А и выше 10 А. По конструкции выпрямительные диоды подразделяются на точечные и плоскостные, а в зависимости от технологии изготовления – на сплавные, диффузионные и эпитаксиальные [1-3].

В полупроводниковых диодах выпрямляющим электрическим переходом может быть электронно-дырочный (p-n) переход, либо контакт «металл-полупроводник», обладающий вентильным свойством, либо гетеропереход. В большинстве случаев полупроводниковые диоды с p-n-переходами делают несимметричными, т. е. концентрация примесей в одной из областей значительно больше, чем в другой. Поэтому количество неосновных носителей, инжектируемых из сильно легированной (низкоомной) области, называемой эмиттером диода, в слабо легированную (высокоомную) область, называемую базой диода, значительно больше, чем в противоположном направлении.

Точечные диоды имеют малую барьерную емкость, обусловленную малой площадью p-n-перехода, и применяются, как правило, на высоких и сверхвысоких частотах. Мощные плоскостные диоды имеют большую площадь p-n-перехода, являются низкочастотными и используются в основном в выпрямительных устройствах для питания различной аппаратуры. Такие диоды называются силовыми. Они изготавливаются преимущественно из кремния, поскольку германий характеризуется сильной зависимостью обратного тока через p-n-переход от температуры. Мощные кремниевые диоды рассчитаны на выпрямленный ток от 10 до 500 А и обратное напряжение до 1000 В.

Зависимость тока через диод от напряжения на диоде называется вольт-амперной характеристикой диода (ВАХ). Теоретическое описание ВАХ идеального диода с p–n переходом имеет вид:

$$I = I_0 e^{\frac{U}{\varphi_T}}, \qquad (41)$$

где U – напряжение на p–n-переходе диода, I_0 – ток насыщения, φ_T – тепловой потенциал. ВАХ идеального p-n-перехода приведена на рисунке 12:

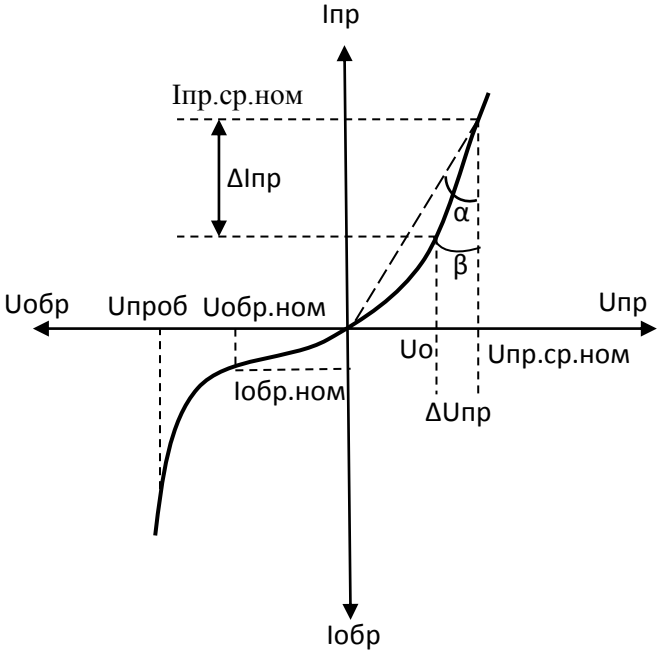

Рис. 12. Вольт-амперная характеристика p-n-перехода

Свойство односторонней проводимости диодов используют при построении выпрямителей – устройств, преобразующих переменное разнополярное напряжение в однополярное напряжение или ток (рисунок 13).

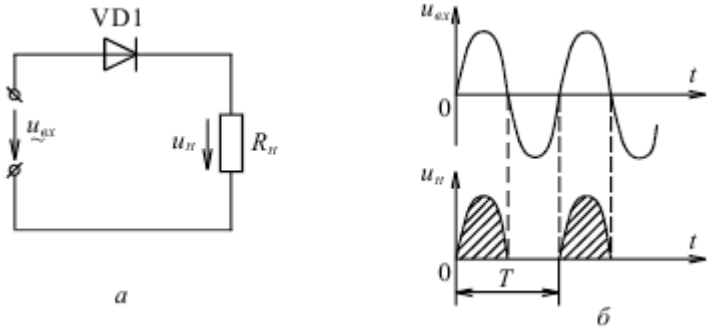

Рис. 13. Схема простейшего выпрямителя. а – однополупериодный выпрямитель; б – кривые входного и выходного напряжений.

В электронных схемах в цепь диода, как правило, включается какая-либо нагрузка, например резистор. Если бы диод обладал линейным сопротивлением, то расчет тока в подобной цепи не представлял бы затруднений. Но диод обладает нелинейным сопротивлением и его сопротивление изменяется при изменении тока. Потому расчет режима диода по постоянному току делается графически. Он основывается на использовании статической ВАХ диода. При этом на ВАХ строится линия нагрузки или нагрузочная характеристика. Она устанавливает связь между током через диод I напряжением на диоде U, сопротивлением нагрузки

$R_н$ и ЭДС источника питания E и определяется выражением: I = (E – U)/$R_н$.

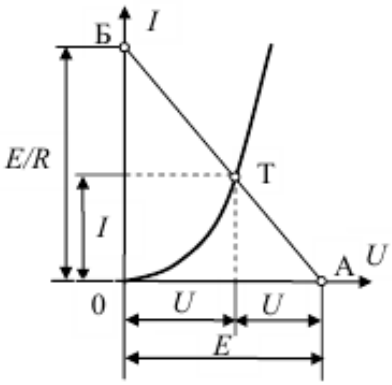

Рис. 14. Нагрузочная прямая ВАХ диода

Построение линии нагрузки производится по точкам ее пересечения с осями координат, рисунок 14. При I = 0 получаем U = E, откладываем на оси напряжений значение E, получаем точку А. При U = 0 получаем I = E/$R_н$, откладываем это значение по оси токов, получаем точку Б. Соединяя эти точки, получаем линию нагрузки. Пересечение линии нагрузки и ВАХ диода дают решение поставленной задачи – рабочую точку.

Основными параметрами диода являются:

- прямое напряжение $U_{пр}$ – значение постоянного прямого напряжения при заданном токе $I_{пр}$;
- обратный ток $I_{обр}$ – значение постоянного тока, протекающего через диод в обратном направлении при заданном обратном напряжении $U_{обр}$;
- сопротивление диода в прямом направлении $R_{пр} = U_{пр} / I_{пр} = tg\alpha$;
- дифференциальное сопротивление $R_{диф} = \Delta U_{пр}/\Delta I_{пр}=tg\beta$.

Предельно допустимые величины:

- максимально допустимое обратное напряжение $U_{обрmax}=(0,7\div0,8)U_{проб}$;
- максимально допустимая мощность, рассеиваемая диодом, P_{max};
- максимально допустимый ток I_{max};
- диапазон рабочих температур.

Туннельный диод

Туннельный диод изготавливается из германия или арсенида галлия с высокой концентрацией примесей (10^{19}–10^{20} см$^{-3}$), т. е. с очень малым удельным сопротивлением, в сотни или тысячи раз меньшим, чем в обычных диодах. Такие полупроводники с малым сопротивлением называют вырожденными. Электронно-дырочный переход в вырожденном

полупроводнике получается в десятки раз тоньше (~10^{-6} см), чем в обычных диодах, а потенциальный барьер примерно в два раза выше [1-3].

Если барьер достаточно тонок, а за ним есть незанятые уровни энергии, то согласно квантовой механике электрон может проникнуть сквозь барьер даже в том случае, когда кинетическая энергия электрона оказывается меньше энергетической высоты потенциального барьера. Существование туннельного перехода сквозь барьер изменяет вид вольт-амперной характеристики p-n-перехода в вырожденных полупроводниках – появляется участок вольт-амперной характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением, рисунок 15.

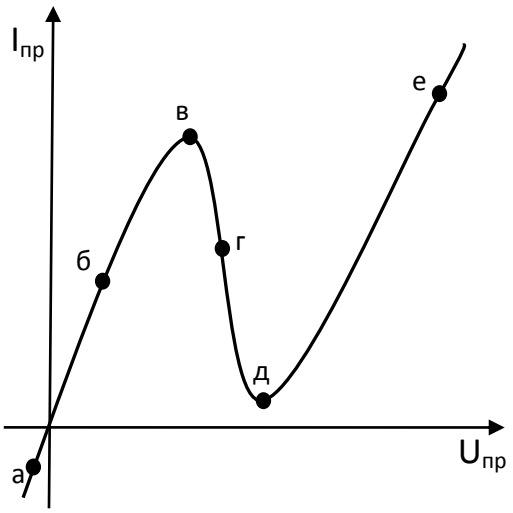

Рис. 15. ВАХ туннельного диода.

При T=0 К распределение носителей по уровням энергии в зонах описывается ступенчатой функцией Ферми и, вследствие этого, ток над барьером равен нулю (нет электронов, способных преодолеть потенциальный барьер). При отсутствии внешнего напряжения нет также электронов, которые могли бы туннелировать из зоны проводимости в n-области на незанятые уровни в валентной зоне p-области, и нет электронов, способных туннелировать из p-области в n-область, таким образом, туннельный ток через переход равен нулю. Когда T>0 К, потоки электронов как туннельные, так и над барьером, справа налево равны потокам слева направо (устанавливается динамическое равновесие, как и в обычном p-n-переходе).

Когда к p-n-переходу приложено внешнее напряжение, увеличивающее барьер (обратное смещение), уровни энергии в зонах сместятся друг относительно друга, и электроны из валентной зоны получат возможность туннелировать на незанятые уровни в зоне проводимости. В результате через p-n-переход потечет ток. Этот ток будет увеличиваться по мере роста обратного напряжения, так как при этом все большее число электронов из валентной зоны получает возможность туннелировать в зону проводимости, рисунок 15 (а).

Когда к p-n-переходу приложено прямое напряжение, уменьшающее высоту потенциального барьера, по мере увеличения напряжения ток через переход нарастает за счет того, что электроны из зоны проводимости получают возможность туннелировать на незанятые состояния в валентной зоне, рисунок 15 (б). Затем, когда напряжение увеличится настолько, что положение уровня Ферми в зоне проводимости окажется против верха валентной зоны, ток достигает максимума рисунок 15 (в), а затем начинает уменьшаться, то есть появляется участок вольт-амперной характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением, рисунок 15 (г). При дальнейшем увеличении прямого напряжения туннельное перемещение электронов из n-области в p-область начнет убывать, так как количество их уменьшается по мере уменьшения степени перекрытия между дном зоны проводимости материала n-типа и потолком валентной зоны материала p-типа. В точке, где эти уровни совпадают, прямой ток p-n-перехода достигнет минимального значения, рисунок 15 (д). При дальнейшем увеличении приложенного напряжения потенциальный барьер уменьшается настолько, что становится существенным переход электронов через барьер, то есть появляется диффузионная компонента тока. Поэтому ток через переход вновь возрастает, рисунок 15 (е).

Рассмотренные процессы позволяют сделать вывод, что туннельные диоды одинаково хорошо проводят ток при любой полярности приложенного напряжения, т. е. они не обладают вентильными свойствами. Более того, обратный ток у них во много раз больше обратного тока других диодов. Это свойство используется в другом типе полупроводникового прибора – обращенном диоде.

Ток в обращенных диодах создается основными носителями, поэтому эти диоды могут работать на более высоких частотах, чем обычные полупроводниковые диоды. Инерционность обращенного диода определяется временем перезарядки его емкости. Как правило, время переключения обращенного диода не превышает 1 нс. Обращенные диоды имеют большую крутизну обратной ветви вольт-амперной характеристики, позволяющую работать при малых уровнях мощности и обеспечивающую высокую чувствительность прибора к входным сигналам.

Варикап. Импульсный диод

Варикапы – это плоскостные диоды, представляющие собой конденсаторы переменной емкости, управляемые не механически, а электрически, т. е. изменением обратного напряжения.

Барьерная емкость, как уже отмечалось ранее, создается областью p-n-перехода с высоким удельным сопротивлением и малой шириной, разделяющей хорошо проводящие p- и n-области. С ростом величины обратного напряжения ширина p-n-перехода увеличивается, так как под действием внешнего поля, создаваемого обратным напряжением, основные носители

в p- и n-областях отходят к краям кристалла, а рекомбинация неосновных носителей p–n-перехода происходит в более глубинных слоях полупроводника. В результате уменьшается емкость $C_б$.

Импульсный диод – это полупроводниковый диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы.

Импульсные режимы – это такие режимы, в которых диоды переключаются с прямого напряжения на обратное, через короткие промежутки времени порядка долей микросекунды, при этом важную роль играют переходные процессы. Основное назначение импульсных диодов – работа в качестве коммутирующих элементов. При прямом напряжении на участке от 0 до t_1 происходит инжекция носителей из эмиттерной области в базовую, и их накопление там, рисунок 16.

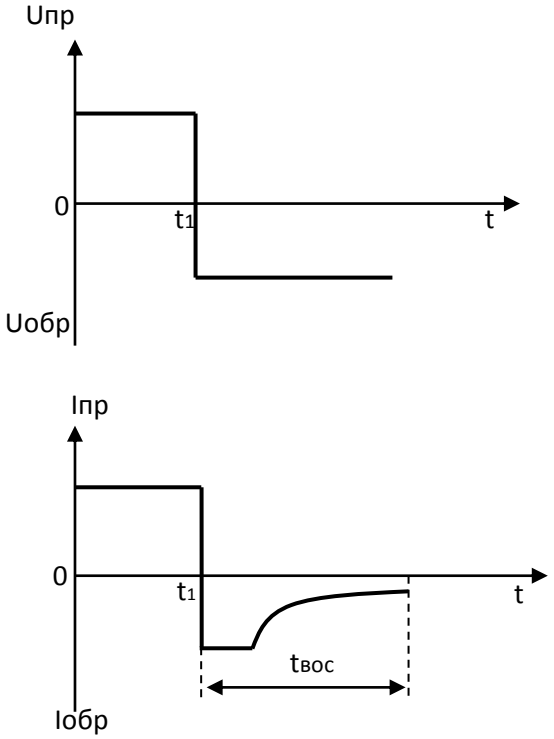

Рис. 16. Переключение импульсного диода.

При смене полярности напряжения на обратную, в первый момент величина обратного тока будет значительна, а обратное сопротивление диода резко уменьшится, так как накопленные в базе неосновные носители под действием изменившегося направления напряженности электрического поля начнут двигаться в сторону p-n-перехода, образуя импульс обратного тока. По мере перехода их в эмиттерную область, их количество уменьшится и через некоторое время обратный ток достигнет нормального установившегося значения, а сопротивление диода в обратном направлении восстановится до нормальной величины. Процесс уменьшения накопленного заряда в базе называется рассасыванием, а время, в течение которого обратный ток изменяется от максимального значения до устано-

вившегося, называется нем восстановления обратного сопротивления $t_{вос.}$, рисунок 16. Чем данное время меньше, тем диод лучше.

Биполярный транзистор

Биполярным транзистором или просто транзистором называют полупроводниковый прибор с двумя p-n-переходами, способный усиливать мощность входных электрических сигналов [1-3].

Транзистор имеет три вывода и трехслойную структуру (рисунок 17), состоящую из чередующихся областей с различными типами проводимости: p–n–p или n–p–n. Название «биполярный» обусловлено тем, что в работе транзистора участвуют носители заряда обеих полярностей (электроны и дырки).

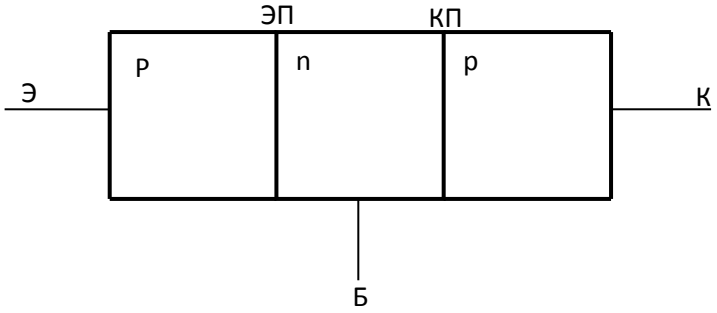

Рисунок. 17. Структура биполярного транзистора

Рассмотрим структуру типа p–n–p. Процесс введения примесей осуществляется так, чтобы в одной p-области концентрация акцепторов была больше, чем в другой. Эта область называется эмиттером, а другая – коллектором. Средняя область n-типа обладает наименьшей концентрацией примесей (доноров). Эта область называется базой. От эмиттера, базы, коллектора делаются выводы. Широко применяют также транзисторы типа n–p–n, в которых средняя область обладает дырочной проводимостью, а две другие – электронной. В соответствии с концентрацией примесей база является высокоомной областью, коллектор – низкоомной, а эмиттер – самой низкоомной. Толщина базы мала (единицы микрометров), площадь p–n-перехода между коллектором и базой в несколько раз больше площади перехода между эмиттером и базой. Первый переход называется коллекторным, второй – эмиттерным.

При работе транзистора к его электродам прикладываются напряжения от внешних источников питания (рисунок 18). В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора, каждый из p-n-переходов может быть смещен в прямом или в обратном направлении, исходя из этого, возможны четыре режима работы транзистора:

1. активный или усилительный (эмиттерный переход – прямое смещение, коллекторный переход – обратное смещение),

2. насыщения (эмиттерный переход – прямое смещение, коллекторный переход – прямое смещение),

3. отсечки (эмиттерный переход – обратное смещение, коллекторный переход – обратное смещение),

4. инверсный (эмиттерный переход – обратное смещение, коллекторный переход – прямое смещение).

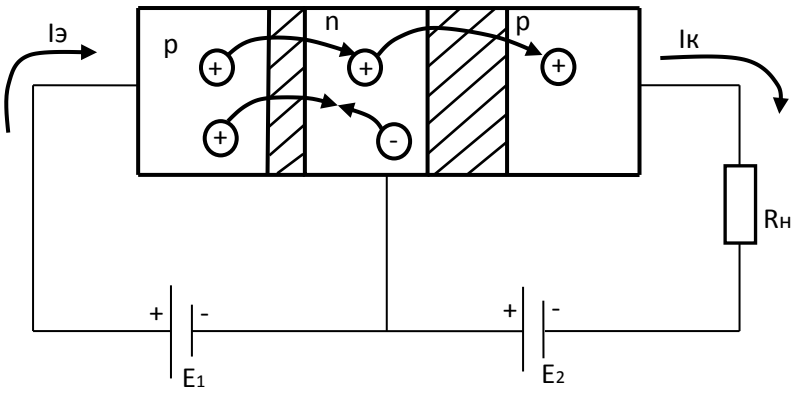

Рис. 18. Физические процессы в биполярном транзисторе

Принцип работы биполярного транзистора, например типа p–n–p, показан на рисунке 18. При прямом напряжении на эмиттерном переходе понижается его потенциальный барьер и дырки инжектируются из эмиттера в область базы, создавая ток эмиттера $I_э$. Так как ширина (10 – 20 мкм) базовой области соизмерима с шириной p–n коллекторного перехода, то основные носители заряда, попавшие в базовую область, взаимодействуют с коллекторным переходом. В базе они становятся неосновными носителями. Большая часть дырок путем экстракции втягивается электрическим полем потенциального барьера в коллекторный переход и диффундирует далее в область коллектора, создавая ток коллектора $I_к$. Значительно меньшая часть дырок в результате рекомбинации с электронами создает ток в цепи базы. Поэтому ток эмиттера и ток коллектора различаются по величине. Коэффициент α, показывающий, какая часть тока эмиттера проходит в коллектор, называют коэффициентом передачи транзистора по току. Обычно α=0,95 – 0,99. Чтобы увеличить коэффициент передачи по току область базы делают тонкой, чтобы меньшее количество носителей рекомбинировало в ней, и, кроме того, площадь коллекторного перехода делают больше площади эмиттерного перехода, чтобы улучшить процесс экстракции носителей из базы.

Через переход «коллектор – база» протекает небольшой, порядка нескольких микроампер, обратный ток $I_{кбо}$, как в обычном диоде при обратном напряжении. Поэтому ток коллектора складывается из двух составляющих: $I_к = \alpha I_э + I_{кбо}$.

Основные параметры биполярных транзисторов:

1. Коэффициент передачи эмиттерного тока:

$h_{21э} = \frac{dI_k}{dI_б}$, при $U_{кэ} = const.$

2. Коэффициент передачи базового тока:

$h_{21б} = \frac{dI_k}{dI_б}$, при $U_{кб} = const.$

3. Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода:

$r_{диф} = \frac{dU_{эб}}{dI_б}$ при $U_{кэ} = const.$

3. Обратный ток коллекторного перехода при заданном обратном напряжении.

4. Объемное сопротивление базы.

5. Выходная проводимость:

$h_{22} = \frac{dI_к}{dU_{кб}}$, при $I_б = const.$

6. Максимально допустимый ток коллектора.

7. Напряжение насыщения коллектор – эмиттер.

8. Наибольшая мощность рассеяния коллектором.

9. Ёмкость коллекторного перехода.

Так как транзистор имеет три вывода, то при подключении источников питания, один из выводов будет являться общим для обоих источников. Следовательно, один из выводов транзистора принадлежит и входной цепи и выходной. По этому признаку различают три способа подключения биполярного транзистора: с общим эмиттером, базой и коллектором.

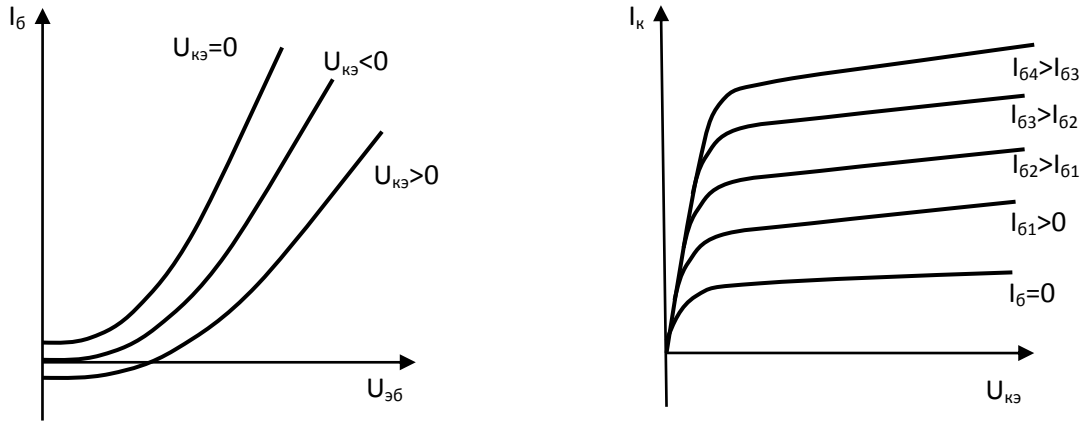

Рис. 19. Входные и выходные характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

Полевой транзистор

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем. В создании электрического тока участвуют только основные носители за-

ряда, поэтому полевые транзисторы иначе называют униполярными транзисторами [1,2,6].

Полевые транзисторы разделяют на два вида: полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом и полевые транзисторы с изолированным затвором.

Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом – это полевой транзистор, управление потоком основных носителей в котором происходит с помощью выпрямляющего электрического перехода, смещенного в обратном направлении. Рассмотрим принцип действия полевого транзистора (рисунок 20).

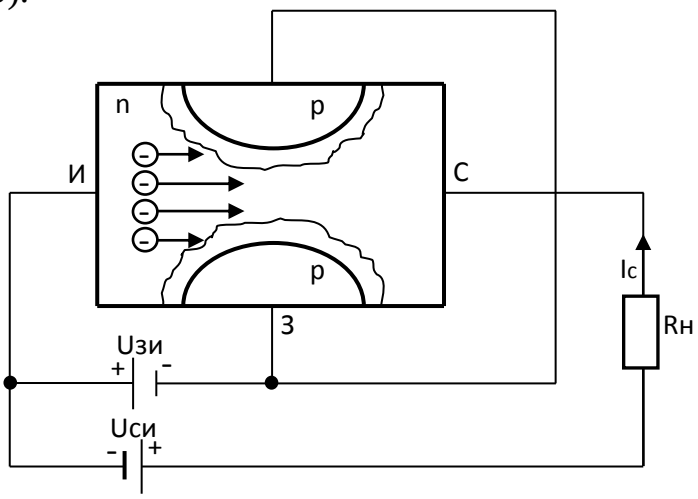

Рис. 20. Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом.

Он представляет собой монокристалл полупроводника n-типа проводимости; по его торцам методом напыления сформированы электроды, а посередине, с двух сторон, созданы две области противоположного типа проводимости и тоже с электрическими выводами от этих областей. Тогда на границе раздела областей с различным типом проводимости возникнет p-n-переход. Электрические выводы от торцевых поверхностей полупроводника называют истоком (И) и стоком (С), а вывод от боковой поверхности противоположного типа проводимости назовем затвором (З). На затвор подают относительно истока такое напряжение $U_{зи}$, которое является обратным для p-n-перехода (рисунок 20). Между стоком и истоком подается напряжение $U_{си}$ такой полярности, чтобы основные носители заряда (в нашем случае электроны) двигались от истока к стоку. При обратном напряжении $U_{зи}$ область p-n-перехода обладает большим сопротивлением, так как она объединена подвижными носителями зарядов. С ростом $U_{зи}$ ширина этой области увеличивается, а проводящий канал сужается. В результате растет сопротивление проводящего канала.

Таким образом, работа полевого транзистора основана на изменении проводимости канала между истоком и стоком под действием поперечного электрического поля, которое создается управляющим напряжением $U_{зи}$. Полевой транзистор может усиливать электрический сигнал, подаваемый на затвор, если нагрузку включить в цепь стока.

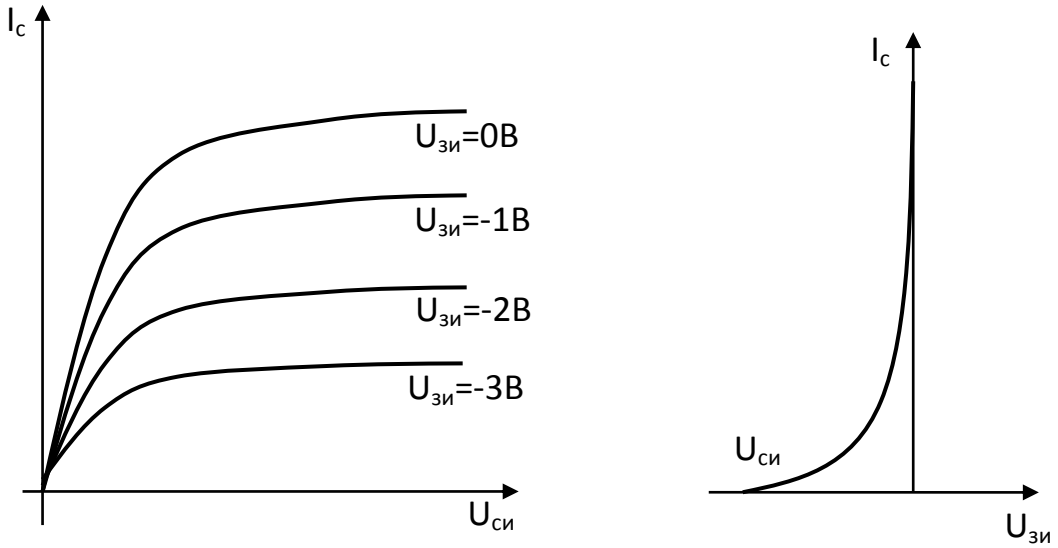

Рис. 21. Выходные и управляющие характеристики полевого транзистора

Основными параметрами полевого транзистора являются:

1. Крутизна сток-затворной характеристики:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{\text{зи}}}, \text{при } U_{\text{си}} = const.$$

2. Внутреннее или дифференциальное сопротивление:

$$R = \frac{\Delta U_{\text{си}}}{\Delta I_c}, \text{при } U_{\text{зи}} = const.$$

3. Входное сопротивление.

4. Статический коэффициент усиления напряжения:

$$\mu = SR = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{\text{зи}}} \frac{\Delta U_{\text{си}}}{\Delta I_c} = \frac{\Delta U_{\text{си}}}{\Delta U_{\text{зи}}}, \text{при } I_{\text{с}} = const.$$

5. Максимально допустимые значения напряжений U_{maxcu}, $U_{maxзu}$, мощности P_{max} и температуры T_{max}.

Полевой транзистор с изолированным затвором называют металл-диэлектрик-полупроводник-транзистором. В нем затвор представляет собой металлический слой, электрически изолированный от полупроводниковой области проводящего канала тонким слоем диэлектрика, что и обусловило название транзистора (МДП-транзистор) [1].

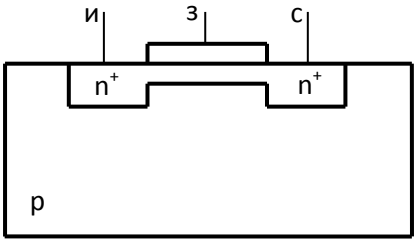

Рис. 22. МДП-транзистор со встроенным каналом.

В МДП-транзисторе со встроенным каналом n-типа исходным материалом является кремниевая пластина p-типа (рисунок 22), называемая

подложкой. В этой пластине создают области n+-типа с большой концентрацией примесей, образующие сток и исток, а между ними – тонкий слой n-типа с малой концентрацией примесей, являющийся токопроводящим каналом. На поверхности пластины создается тонкая пленка SiO_2, которая изолирует металлический затвор канала. Принцип действия МДП-транзистора со встроенным каналом состоит в проводимости канала под действием поперечного электрического поля, создаваемого напряжением на затворе $U_{зи}$.

При $U_{зи}$ = 0 через канал протекает сквозной ток под действием напряжения между стоком и истоком $U_{си}$. Через подложку ток не протекает, так как один из p-n-переходов между стоком, подложкой и истоком находится под обратным напряжением.

При подаче на затвор отрицательного напряжения $U_{зи}<0$ электрическое поле затвора отталкивает электроны, вытесняя их в область подложки. Канал обедняется основными носителями заряда, проводимость его уменьшается.

При подаче на затвор положительного напряжения $U_{зи}>0$ электрическое поле затвора притягивает электроны из p-слоя в канал, обогащая его основными носителями заряда. В результате проводимость канала возрастает.

В отличие от транзистора со встроенным каналом в МДП-транзисторе с индуцируемым каналом первоначально на подложке p-типа создают только области истока и стока с проводимостью n-типа, а канал не создают. Поэтому при отсутствии управляющего напряжения на затворе ($U_{зи}=0$) транзистор остается закрытым независимо от величины и полярности напряжения между стоком и истоком $U_{си}$. Это объясняется тем, что при любой полярности напряжения $U_{си}$ один из p-n-переходов (исток-подложка, сток-подложка) находится под обратным напряжением (рисунок 23).

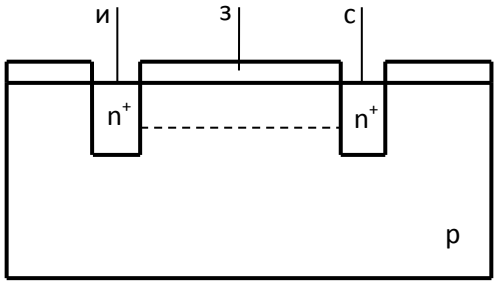

Рис. 23. МДП-транзистор с индуцируемым каналом

При подаче на затвор положительного напряжения $U_{зи}>0$ электрическое поле затвора отталкивает дырки от верхнего слоя p-области в глубину полупроводника, а электроны притягивает в этот слой к границе с диэлектриком. Это приводит к изменению типа электропроводности тонкого слоя у границы на противоположный, т.е. образуется (или индуцируется под действием электрического поля) проводящий канал n-типа. С ростом $U_{зи}$

концентрация электронов в зоне канала возрастает, а следовательно, растет ток стока. С понижением $U_{зи}$ происходят обратные процессы.

При отрицательном напряжении $U_{зи}<0$ канал n-типа не индуцируется, и транзистор остается закрытым. Таким образом, МДП-транзистор с индуцированным каналом n-типа работает только в режиме обогащения канала носителями заряда [1,2,6].

Тиристоры

Тиристором называют полупроводниковый прибор, имеющий три или более p-n-переходов, вольт-амперная характеристика которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением и способный переключаться из закрытого состояния в открытое, и наоборот. Типичной для тиристора является четырехслойная структура полупроводника с чередующимися слоями p-типа и n-типа. На основе этой структуры в зависимости от числа выводов могут быть изготовлены два типа тиристоров: диодные, называемые динисторами, и триодные, называемые тринисторами.

Динистор представляет собой монокристалл полупроводника, обычно кремния, в котором созданы четыре чередующиеся области с различным типом проводимости p_1-n_1-p_2-n_2 (рисунок 24).

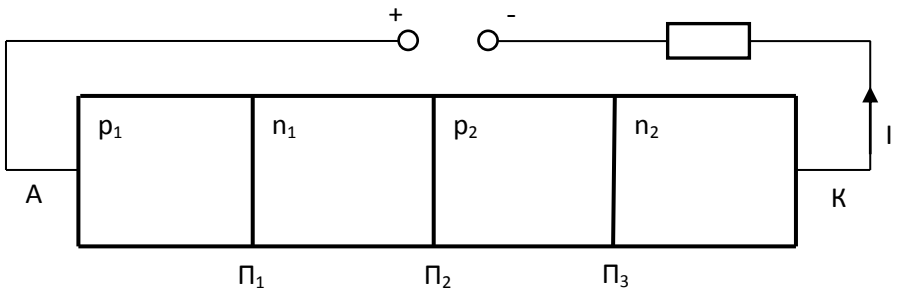

Рис. 24. Структура диодного тиристора.

На границах раздела этих областей возникнут p-n-переходы: крайние переходы $П_1$ и $П_3$ называются эмиттерными, а области, примыкающие к ним, – эмиттерами; средний p-n-переход $П_2$ называется коллекторным. Внутренние n_1- и p_2-области структуры называется базами. Область p_1, в которую попадает ток из внешней сети, называется анодом (А), область n_2 – катодом (К).

Через переходы $П_1$ и $П_3$, работающие в прямом направлении, в области, примыкающие к переходу $П_2$, инжектируются неосновные носители, которые уменьшают сопротивление перехода $П_2$. Вольт-амперная характеристика тиристора, представленная на рисунке 25, показывает, что происходит

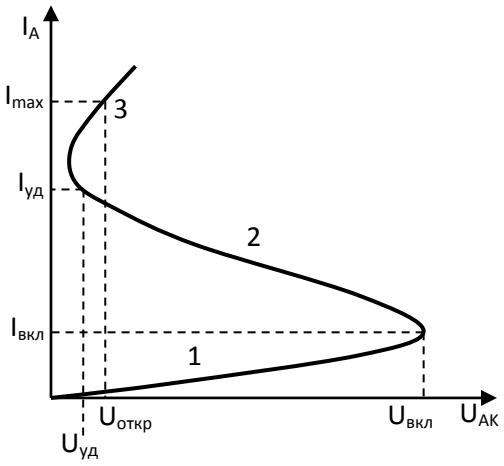

Рис. 25. Вольт-амперная характеристика тиристора

в тиристоре при повышении приложенного к нему напряжения. Сначала ток невелик и растет медленно, что соответствует участку 1 характеристики. В этом режиме тиристор можно считать закрытым («запертым»). На сопротивление коллекторного перехода $П_2$ влияют два взаимно противоположных процесса. С одной стороны, повышение обратного напряжения на этом переходе увеличивает его сопротивление, так как под влиянием обратного напряжения основные носители уходят в разные стороны от границы, т. е. переход $П_2$ все больше обедняется основными носителями. Но, с другой стороны, повышение прямых напряжений на эмиттерных переходах $П_2$ и $П_3$ усиливает инжекцию носителей, которые подходят к переходу $П_2$, обогащают его и уменьшают его сопротивление.

До точки, соответствующей напряжению $U_{вкл}$, перевес имеет первый процесс, и сопротивление растет, но все медленнее и медленнее, так как постепенно усиливается второй процесс. Около данной точки ВАХ при некотором напряжении (десятки или сотни вольт), называемом напряжением включения $U_{вкл}$, влияние обоих процессов уравновешивается, а затем даже ничтожно малое повышение подводимого напряжения создает перевес второго процесса и сопротивление перехода $П_2$ начинает уменьшаться. Тогда возникает лавинообразный процесс быстрого отпирания тиристора. Ток резко, скачком, возрастает (участок 2 на характеристике), так как увеличение напряжения на $П_1$ и $П_3$ уменьшает сопротивление $П_2$ и напряжение на нем, за счет чего еще больше возрастают напряжения на $П_1$ и $П_3$, а это, в свою очередь, приводит к еще большему возрастанию тока, уменьшению сопротивления $П_2$ и т. д.

В результате такого процесса устанавливается режим, напоминающий режим насыщения транзистора: большой ток при малом напряжении (участок 3). Ток в этом режиме, когда прибор открыт («отперт»), определяется для диодного тиристора главным образом сопротивлением нагрузки $R_н$, включенной последовательно с прибором. В открытом состоянии вследствие накопления больших зарядов около перехода $П_2$ напряже-

ние на нем прямое, что, как известно, характерно для коллекторного перехода в режиме насыщения. Поэтому полное напряжение на тиристоре складывается из трех небольших прямых напряжений на переходах и четырех также небольших падений напряжений в n- и p-областях. Так как каждое из этих напряжений составляет доли вольта, то общее напряжение на открытом тиристоре обычно не превышает нескольких вольт и, следовательно, тиристор в этом состоянии имеет малое сопротивление.

Триодный тиристор (тринистор) отличается от динистора наличием вывода от одной из баз – управляющий электрод (рисунок 26). Подавая через этот вывод прямое напряжение на переход, работающий в прямом направлении, можно регулировать значение $U_{вкл}$. Чем больше ток через такой управляющий переход $I_у$, тем ниже $U_{вкл}$.

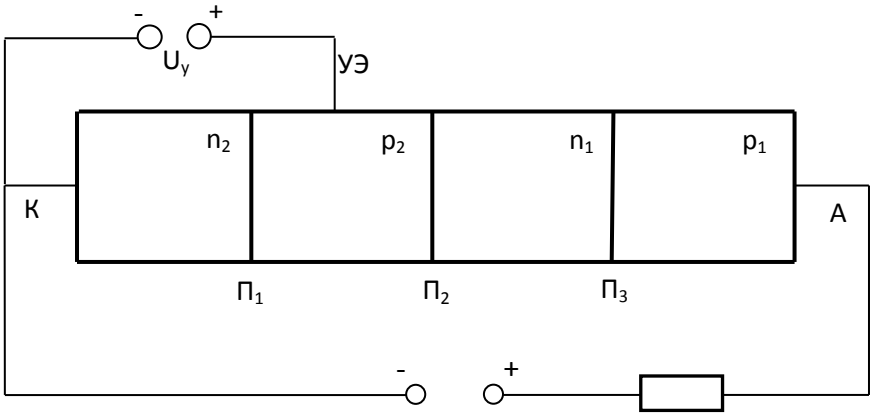

Рис. 26. Структура триодного тиристора.

Чем больше ток управляющего электрода, тем сильнее инжекция носителей от соответствующего эмиттера к среднему коллекторному переходу и тем меньшее требуется напряжение на тиристоре, для того чтобы начался процесс отпирания прибора. Наиболее высокое $U_{вкл}$ получается при отсутствии тока управляющего электрода, когда триодный тиристор превращается в диодный. Наоборот, при значительном токе $I_у$ характеристика триодного тиристора приближается к характеристике прямого тока обычного диода.

После того, как тиристор включился, он сам себя поддерживает в открытом состоянии и в этом случае источник управления уже оказывается ненужным. Для того, чтобы выключить тиристор, необходимо прервать ток, протекающий в его силовой цепи, на короткий промежуток времени, достаточный для рассасывания неосновных носителей в зонах полупроводника и восстановления управляющих свойств. Чтобы снова включить тиристор, необходимо снова пропустить в его цепи управления ток $I_у$, чтобы снова запустить процесс внутренней положительной обратной связи. Таким образом, тиристор представляет собой бесконтактный

ключ, который может быть только в двух устойчивых состояниях: либо в выключенном, либо во включенном [1,2].

Запираемые тиристоры. Симисторы.

Двухоперационные тиристоры или запираемые тиристоры являются полностью управляемыми полупроводниковыми приборами, которые можно, и включить, и выключить по цепи управления. Это достигается благодаря тому, что в областях анода и катода такой прибор состоит из большого числа технологических ячеек, представляющих отдельные тиристоры, которые включены параллельно, рисунок 27.

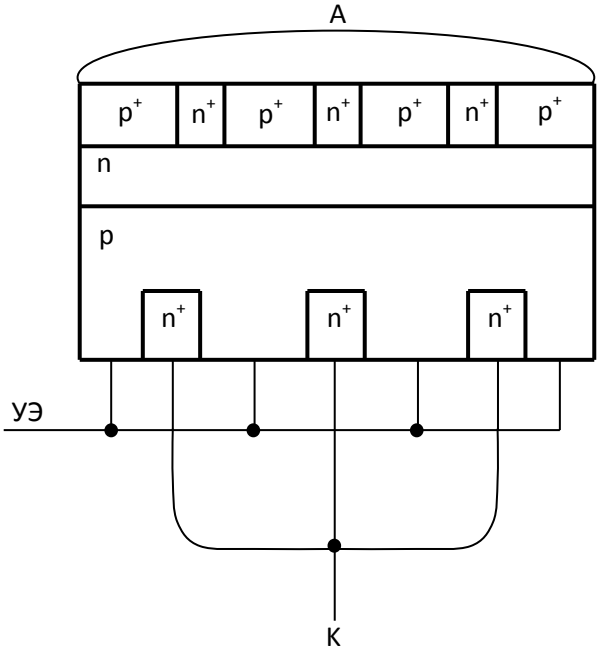

Рис. 27. Структура запираемого тиристора.

Физические процессы, протекающие в запираемых тиристорах, во многом аналогичны уже рассмотренным для однооперационного тиристора. Исключение составляет процесс выключения отрицательным током управления. Во включенном состоянии все переходы тиристора находятся в состоянии насыщения. При достаточной величине и длительности управляющего тока, а также равномерности его распределения по всем ячейкам, избыточная концентрация неосновных носителей заряда сначала снижается до нуля вблизи коллекторного перехода тиристора. При этом коллекторный переход смещается в обратном направлении, воспринимая часть внешнего напряжения. В структуре возникает положительная обратная связь. Вследствие лавинообразного уменьшения зарядов в базовых областях анодный ток начинает снижаться. Действие положительной обратной связи прекращается, и дальнейший спад анодного тока определяется рекомбинацией в n базе тиристора. Вольт-амперная характеристика запираемого тиристора аналогична характеристике незапираемого тиристора.

Симисторы (симметричные тиристоры), выполненные на основе многослойной полупроводниковой структуры это тиристоры, которые отпираются при любой полярности напряжения и проводят ток в оба направления.

Основой в симисторе является монокристалл полупроводника, в котором созданы, пять областей с чередующимся типом проводимости, которые образуют четыре p-n-перехода, рисунок 28. Контакты от крайних областей наполовину шунтируют первый и четвертый p-n-переходы. При полярности внешнего источника напряжения, указанной на рисунке, переход $П_1$ окажется включенным в обратном направлении и ток через него будет исчезающе мал.

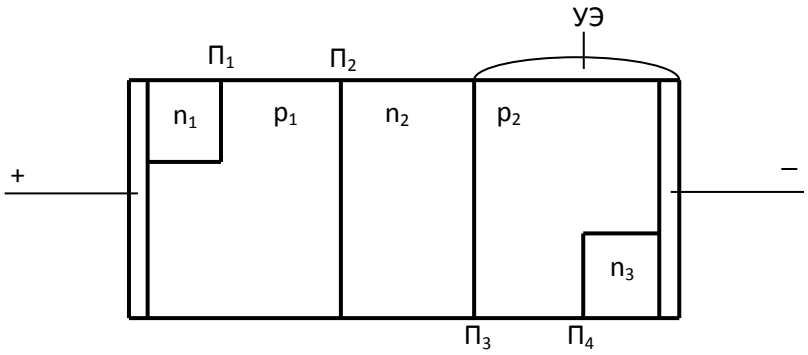

Рис. 28. Структура симметричного тиристора.

Весь ток через полупроводниковую структуру при такой полярности источника будет протекать через область p_1. Четвертый переход $П_4$ будет включен в прямом направлении и через него будет проходить инжекция электронов. Значит, при данной полярности источника рабочая структура симистора представляет собой p_1-n_2-p_2-n_3-структуру, аналогичную структуре обычного тиристора.

При смене полярности на противоположную уже будет закрыт переход $П_4$, а переход $П_1$ будет открыт. Структура симистора становится n_1-p_1-n_2-p_2, то есть опять аналогична структуре обычного тиристора, но направленного в противоположную сторону. Таким образом, в схемном отношении симистор можно представить в виде двух встречно-параллельных тиристоров. Симистор имеет вольт-амперную характеристику аналогичную обычному тиристору, но симметричную относительно начала координат [1,2].

Условные обозначения

	Выпрямительный диод
	Диод Шотки
	Туннельный диод
	Обращенный диод
	Варикап
	Стабилитрон
	Динистор
с з и n с з и p	МДП-транзистор с индуцированным каналом
с з и p с з и n	МДП-транзистор со встроенным каналом
с з и p с з и n	Полевой транзистор с управляющим p-n переходом с каналами p- и n-типа
p э к б n э к б	Биполярный транзистор

Практическая часть

Список задач

1. Определить температуру, при которой в проводнике вероятность найти электрон с энергией 0,5 эВ над уровнем Ферми равна 2%.
2. Плотность металла $\rho=8{,}9\cdot10^3$ кг/м^3, молярная масса $M = 63{,}5$, валентность – 1. Найти концентрацию электронного газа и энергию Ферми ($T = 0$).
3. Определить концентрацию носителей заряда в чистом германии при $T = 300$ К. На сколько градусов нужно повысить температуру от начальной (300 К), чтобы число электронов проводимости в германии увеличилось в двое.
4. Определить положение уровня Ферми в германии n-типа при $T = 300$ К, если на $2\cdot10^6$ атомов германия приходится один атом примеси. Концентрация атомов в германии равна $4{,}4\cdot10^{28}$ м$^{-3}$. Предэкспоненциальный множитель $G = 4{,}83\cdot10^{21} м^{-3}K^{-3/2}$, $E_g = 0{,}72 эВ$, $\Delta E_g = 0{,}01\ эВ$.
5. Найти положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны при $T = 300$ К для кристалла германия, содержащего $5\cdot10^{16}$ см$^{-3}$ атомов мышьяка.
6. Какова вероятность заполнения электронами уровней расположенных на kT; $2kT$; $3kT$ выше и ниже уровня Ферми?
7. На каком расстоянии (в единицах kT) от уровня Ферми находятся уровни, вероятность заполнения которых 0,1 и 0.9?
8. Вычислить среднюю энергию свободных электронов в металлическом натрии при $T = 0$ К. Известно, что 1 м^3 натрия содержит $2{,}53\cdot10^{28}$ атомов.
9. Определить концентрацию n свободных электронов в металле при Т = 0 К. Энергия Ферми 1 эВ.
10. Определить отношение концентраций свободных электронов при Т = 0 К в литии и цезии, если известно, что уровни Ферми в этих металлах соответственно равны 4,72 эВ и 1,53 эВ.
11. Вычислить среднюю кинетическую энергию электронов в металле при $T = 0$ К если уровень Ферми 7 эВ.
12. Определить отношение концентрации $n_{\max}$ электронов в металле (T=0 К), энергия которых отличается от максимальной не более чем на ΔE_k концентрации $n_{\min}$ электронов, энергии которых не превышают значения $E=\Delta E$; ΔE принять равным $0{,}01E_F$.
13. Определить максимальную скорость $V_{\max}$ электронов в металле при Т = 0 К, если E_F =5 эВ.

14. Металл находится при температуре T = 0 К. Определить, во сколько раз число электронов со скоростями $V_{max}/2$ до V_{max} больше числа электронов со скоростями от 0 до $V_{max}/2$.

15. Определить уровень Ферми E_F в собственном полупроводнике, если энергия активации равна 0,1 эВ. За нулевой уровень отсчета кинетической энергии электронов принять дно зоны проводимости.

16. Определить концентрацию свободных носителей заряда в чистом кремнии при T = 300 К.

17. Во сколько раз изменится концентрация собственных носителей заряда в кремнии при увеличении его температуры с 300 до 400 К?

18. Найти положение уровня Ферми в собственном полупроводнике относительно средины запрещенной зоны при Т=300 К, если эффективная масса электрона в два раза больше эффективной массы дырки.

19. В чистом полупроводнике при Т=300 К концентрация собственных носителей составляет $1{,}5\cdot10^{16}$ м$^{-3}$; эффективные массы электронов проводимости и дырок одинаковы. Определить E_F.

20. При какой температуре концентрация собственных носителей в кремнии будет равна концентрации собственных носителей в германии при Т=300 К.

21. Какова вероятность найти электрон на дне зоны проводимости в собственном германии (E_q= 0,72 эВ), если температура образца равна: а) 30 К; б) 300 К; в). температура плавления 937 ºС?

22. Какова вероятность найти электрон на дне зоны проводимости при Т=300 К: а) в собственном германии (E_g=0,72 эВ); б) собственном кремнии (E_g=1,12 эВ); в) в алмазе (E_g= 5,6 эВ)? Что означают эти результаты?

23. Уровень Ферми полупроводника находится на 0,3 эВ ниже дна зоны проводимости. Какова вероятность того, что при комнатной температуре энергетические уровни, расположенные на расстоянии $3kT$ выше дна зоны проводимости, заняты электронами? Какова вероятность того, что потолок валентной зоны, содержит дырки, если E_g=1,1 эВ?

24. Вычислить положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости при T=400 К для кристалла германия, содержащего $5\cdot10^{16}$ атомов сурьмы в 1 см^3 .

25. Определить удельное электрическое сопротивление кремния при температуре 300 К, если концентрация донорной примеси равна 10^{20} м$^{-3}$. Подвижность электронов в кремнии при 300 К принять равной 0,14 м^2/(В·с).

26. Концентрация носителей в кремнии равна $5\cdot10^{10}$ см$^{-3}$, подвижность электронов μ_n=0,15 м^2/(В·с) и дырок μ_p=0,05 м^2/(В·с). Определить сопротивление кремниевого стержня длиной 5 см и сечением 2 мм^2.

27. Определить удельное электрическое сопротивление кремния р-типа при температуре 300 К, если концентрация акцепторной примеси 10^{20} м$^{-3}$. Подвижность дырок при температуре 300 К принять равной 0,05 м^2/(В·с).

28. Образец германия содержит примесь фосфора $2\cdot10^{20}$ м$^{-3}$. Определить: а) удельное сопротивление и тип проводимости при 300 К; б) концентрацию германия, необходимую для изменения типа проводимости, чтобы удельное сопротивление стало равным 0,006 Ом·м. Принять μ_n=0,39 м^2/(В·с); μ_p= 0,19 м^2/(В·с) при T=300 К.

29. Определить удельную электропроводимость кремния при T=300 К, если N_a=$2{,}3\cdot10^{19}$ м^3; $N_д$=$2{,}2\cdot10^{19}$ м$^{-3}$.

30. Ток j=10^3А/м^2 течет через кристалл германия n-типа с ρ=0,05 Ом·м. За какое время электроны пройдут расстояние $5\cdot10^{-5}$ м?

31. Образец кремния р-типа длиной 5 м, шириной 2 мм, толщиной 1 мм и имеет сопротивление 100 Ом. Определить концентрацию примеси и отношение электронной проводимости к дырочной. Принять n_i=$2{,}5\cdot10^{16}$м$^{-3}$; μ_n=0,12 м^2/(В·с); μ_p= 0,025 м^2/(В·с) Т=300 К.

32. Термистор из собственного кремния имеет сопротивление 600 Ом при 300 К. Вычислить его сопротивление при 325 К, предполагая, что ширина запрещенной зоны кремния 1,1 эВ и что подвижности носителей μ_n и μ_p не изменяются в этом интервале температур.

33. Определить относительное положение уровня Ферми в кремниевом полупроводнике р-типа и концентрацию неосновных носителей заряда, если концентрация акцепторной примеси 10^{16} см$^{-3}$, а T=300 К.

34. В кристалле германия n-типа на каждые 10^8 атомов германия приходится один атом донорной примеси. Полагая, что эффективная масса электрона $m_n^* = m_e$, найти положение уровня Ферми относительно дна зона проводимости (Т=300 К).

35. В кристалле кремния р-типа на каждые 10^8 атомов кремния приходится один атом акцепторной примеси. Найти положение уровня Ферми при комнатной температуре относительно валентной зоны.

36. Определить концентрацию электронов и дырок при T=300 К: а) в собственном кремниевом полупроводнике; б) в кристалле кремния, содержащем $5\cdot10^{17}$ атомов сурьмы в 1 см^3.

37. Определите: а) удельное сопротивление собственного германия при T=300 К; б) чему будет равно удельное сопротивление, если к этому образцу добавить донорную примесь так, чтобы один атом донорной примеси приходился на каждые 10^8 атомов германия?

38. Определить: а) удельное сопротивление собственного кремния при T=300 К; б) каково будет удельное сопротивление этого кремния, если к этому образцу добавить донорную примесь так, чтобы один атом донорной примеси приходился на каждые 10^8 атомов германия?

39. Образец собственного кремния имеет удельное сопротивление 2000 Ом·м при комнатной температуре и концентрации электронов проводимости n_i=$1{,}4\cdot10^{16}$ м$^{-3}$. Определить удельное сопротивление образца, легированного акцепторной примесью с концентрацией 10^{21} и 10^{23} м$^{-3}$. Предположите, что подвижность остается одинаковой как для собственного, так и для примесного кремния и равной μ_p = 0,25 μ_n.

40. Определить концентрацию неосновных носителей заряда, их подвижность в образце германиевого полупроводника p-типа, если концентрация акцепторной примеси 10^{-16} см$^{-3}$, а коэффициент диффузии электронов D_n=93 см^2/с (T=300 К).

41. Определить удельную проводимость образца кремния при T=300 К, если концентрация акцепторов в полупроводнике N_a=2,3·10^{13} см$^{-3}$.

42. Покажите, что полупроводник имеет минимальную удельную проводимость при данной температуре, когда концентрация электронов $n = n_i\sqrt{\mu_p / \mu_n}$. Чему равна концентрация дырок в этих условиях?

43. Изменение удельной проводимости германия показало, что она изменяется с температурой по закону exp(-4350/T). Требуется определить ширину запрещенной зоны германия.

44. Определить среднюю скорость дрейфа электронов и дырок в германии при 300 К, если к образцу приложено электрическое поле с напряженностью E=10, 100 и 1000 В/см.

45. Решить предыдущую задачу для кремния.

46. Определите длину диффузионного смещения электрона при T=300 К в кристалле германия n-типа, если подвижность электронов 3900 см^2/(В·с), а время их жизни τ_n=100 мкс.

47. Образец дырочного антимонида индия имеет подвижность электронов 6,2 м^2/(В·с) при T=290 К. Вычислить диффузионную длину неосновных носителей заряда, если их время жизни τ = 3 ·10^{-8}с.

48. Имеется сплавной p-n переход с $N_д$= $10^3/N_a$, причем на каждые 10^8 атомов приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов (T=300 К). Плотность атомов N и ионизированных атомов n_i соответственно принять 4,4·10^{22} см$^{-3}$ и 2,5·10^{13} см$^{-3}$.

49. Определить ширину p-n перехода в кремнии при температуре 350 К в отсутствие внешнего напряжения, если концентрация дырок и электронов соответственно 1,0·10^{21} м$^{-3}$ 2,0·10^{27} м$^{-3}$.

50. Определить максимальную напряженность электрического поля p-n перехода в кремнии, если концентрация донорной и акцепторной примесей 1,0·10^{21} м$^{-3}$. Ширина p-n перехода 0,3 мкм. Примесь полностью ионизирована.

51. При изменении прямого напряжения на ΔU=0,1 В прямой ток германиевого диода изменяется на $\Delta I_{пр}$=10 мА, а при изменении обратного напряжения на $\Delta U_{обр}$=10 В, обратный ток изменяется на 40 мкА. Определить дифференциальные сопротивления диода при прямом и обратном напряжении.

52. В германиевом p-n переходе подвижности электронов и дырок равны μ_n=0,39, μ_p=0,19 м^2/(Вс). Концентрация носителей при T=300 К, n_i=2,5·10^{19}м$^{-3}$, p_n=3,91·10^{17}м$^{-3}$. Найти: а) плотность обратного тока насыщения, а также отношение дырочной составляющей обратного тока насыщения к электронной, если L_p=L_n=1·10^{-3} м, б) напряжение, при котором плотность прямого тока j=10А/м^2.

53. Имеется сплавной кремниевый p-n переход с $N_д = 10^3 N_a$, причем на каждые 10^8 атомов кремния приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов при T=300 К (плотность атомов N и ионизированных атомов n_i принять равными $4{,}4 \cdot 10^{22}$ см$^{-3}$ и $2{,}5 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$ соответственно).

54. Удельное сопротивление p-области германиевого p-n перехода ρ_p= 2 Ом·см, а удельное сопротивление n-области ρ_n=1 Ом·см. Вычислить контактную разность потенциалов при T=300 К.

55. Решить предыдущую задачу для кремниевого p-n перехода с такими же концентрациями примеси.

56. Удельное сопротивление p-области германиевого p-n перехода ρ_p=2 Ом·см. Вычислить контактную разность потенциалов при T=300 К.

57. Решить предыдущую задачу для кремниевого диода с такими же значениями удельных сопротивлений p- и n- областей.

58. В германиевом p-n переходе удельная проводимость p-области $\sigma_p=10^4$ См/м и удельная проводимость n-области 10^2 См/м. Подвижности электронов и дырок соответственно равны μ_n=0,39 м^2/(В·с), μ_p=0,19 м^2/(В·с). Концентрация собственных носителей в германии при T=300 К, $n_i=2{,}5 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$. Вычислить контактную разность потенциалов.

59. p-n переход выполнен из собственного германия с концентрацией n_i=10 см$^{-3}$, легированного акцепторной примесью $N_a=5 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ и донорной примесью $N_д=5 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$. Коэффициенты диффузии для неосновных электронов и дырок соответственно равны 100 и 50 см^2/с, диффузионная длина $L_n=L_p$=0,8 см. Определить: контактную разность потенциалов; плотность обратного тока насыщения при T=300 К.

60. Определить контактную разность потенциалов кремниевого p-n перехода при T=300 К, если $N_a=2 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$ и $N_д=5 \cdot 10^{12}$ см$^{-3}$.

61. Для кремниевого диода с резким p-n переходом начертить в полулогарифмическом масштабе распределение концентрации носителей заряда в переходе, если $N_д=10^{15}$ см$^{-3}$, а $N_a=10^{16}$см$^{-3}$. Определить численные значения ординат, указать n- и p- области, а также область, обедненную носителями заряда и потенциала в переходе.

62. Выполнить такие же построения, как и в предыдущей задаче, для германиевого диода с резким p-n переходом и такими же концентрациями примесей.

63. Вычислить барьерную емкость германиевого полупроводникового p-n перехода с площадью поперечного сечения S=1 мм^2 и шириной запирающего слоя $2 \cdot 10^{-4}$ см; ε=1,6.

64. Найти барьерную емкость германиевого p-n перехода, если удельное сопротивление p-области ρ_p=3,5 Ом·см. Контактная разность потенциалов U_k=0,35 В. Приложенное обратное напряжение $U_{обр}$=-5 В, площадь поперечного сечения – 1 мм^2.

65. Определить ширину p-n перехода в кремнии при T=300 К при отсутствии внешнего напряжения, если концентрация примесей в n- и p- обла-

стях соответственно $N_д$=0,1·10^{21} м$^{-3}$; N_a=20·10^{21} м$^{-3}$. Считать примеси ионизированными.

66. Решить предыдущую задачу при наличии прямого напряжения 0,5 В.

67. Определить ширину p-n перехода в германии, если концентрация примесей при T=300 К, $N_д$=0,2·10^{-21}м$^{-3}$ N_a=20·10^{21}м$^{-3}$.

68. Решить предыдущую задачу с учетом наличия прямого напряжения $U_{пр}$=0,35 В.

69. Решить задачу 69 с учетом наличия обратного напряжения $U_{обр}$= -3,5 В.

70. Удельная проводимость p-области германия с резким p-n переходом σ_p=10 См/см, а удельная проводимость n-области σ_n=1 См/см, относительная диэлектрическая проницаемость ε=16. В равновесном состоянии U_k=0,35 В. Найти: а) барьерную емкость перехода, имеющего площадь поперечного сечения S=0,05 мм^2, $U_{обр}$ = 5 и 10 В.

71. Решить предыдущую задачу для кремния.

72. Определить барьерную емкость p-n перехода в германии, кремнии и арсениде галлия, если концентрация доноров в n-области равна концентрации акцепторов в p-области N_{Ge}=2,0·10^{-21} м$^{-3}$, N_{Si}=1,5·10^{21} м$^{-3}$, N_{GaAs}=4,0·10^{21}м$^{-3}$.

73. Решить задачу 74 с учетом наличия смещения $U_{пр}$=2 В.

74. Решить задачу 74 с учетом наличия обратного смещения $U_{обр}$= -2,5 В.

75. В равновесном состоянии высота потенциального барьера сплавного p-n перехода равна 0,2 В, концентрация акцепторных примесей N_a=3·10^{14} см$^{-3}$. Вычислить ширину p-n перехода для обратных напряжений, равных 0,1 и 10 В; для прямого напряжения 0,1В; найти барьерную емкость, соответствующую обратным напряжениям, равным 0,1 и 10 В, если площадь перехода 1 мм^2.

76. Кремниевый p-n переход имеет S=1 мм^2, $C_б$=300 пФ, если подводится $U_{обр}$= -10 В. Найти: изменение емкости, если обратное напряжение становится $U_{обр}$= -20 В; максимальную напряженность электрического поля в обедненном слое при $U_{обр}$=-10 В (ε=12).

77. Определить диффузионную емкость и высоту потенциального барьера p-n перехода германиевого диода, если ρ_p=10^{15} см$^{-3}$, n_n=10^{16} см$^{-3}$. Обратный ток насыщения I_0=5 мкА; $U_{пр}$=0,2 В; τ=100 мкс.

78. Определить максимальную напряженность диффузионного поля p-n перехода в кремнии, германии, арсениде галлия, если концентрации доноров n и акцепторов в n- области равны T_{Ge}=10^{21} м$^{-3}$; N_{Si}=2·10^{21} м$^{-3}$; N_{GaAs}=3·10^{21} м$^{-3}$.

79. Построить график зависимости барьерной емкости германиевого p-n перехода от приложенного напряжения в диапазоне -3,5 В<U≤0,5 В; $N_д$= $N_д$=2·10^{21} м^3.

80. Построить график зависимости барьерной емкости кремниевого p-n перехода от приложенного напряжения в диапазоне 2 В<U≤1 В.

81. Построить график зависимости барьерной емкости арсенидгаллиевого p-n перехода от приложенного напряжения в диапазоне -3 В<U≤1,5 В.

82. У германиевого диода p-n переход имеет площадь поперечного сечения 10^{-6} м^2. Расстояние от границы до каждого контакта 0,1 мм. Удельное сопротивление p-области $4{,}2\cdot10^{-4}$ Ом·м и время жизни неосновных носителей зарядов p-области $2{,}08\cdot10^{-8}$ Ом·м и время жизни τ_p=150 мкс. Определить обратный ток насыщения диода, если подвижность электронов μ_n=0,3 м^2/(В·с), подвижность дырок μ_p=0,15 м^2/(В·с), $n_i=2{,}5\cdot10^{19}$ при 300 К.

83. В германиевом p-n переходе удельные сопротивления: $\rho_p=4{,}2\cdot10^{-2}$ Ом·м и $\rho_n=2{,}08\cdot10^{2}$ Ом·м; μ_p=0,15 м^2/(В·с); μ_n=0,3 м^2/(В·с); $n_i=2{,}5\cdot10^{19}$ м$^{-3}$. Время жизни неосновных носителей заряда τ_n=75 мкс τ_p=150 мкс. Площадь поперечного сечения $S=10^{-6}$ м^2 (T=300 К). Определить плотность обратного тока насыщения.

84. Кремниевый p-n переход имеет $\sigma_p=10^3$ См/м; σ_n=20 См/м. Время жизни неосновных носителей τ_n=1 мкс. Определить: отношение дырочной составляющей тока и электронной составляющей в p-n переходе; б) плотность обратного тока насыщения и плотность тока текущего при $U_{пр}$=0,3 В; T=300 К; $n_i=1{,}4\cdot10^{16}$ м$^{-3}$; μ_n=0,12 м^2/(В·с); μ_p=0,05 м^2/(В·с).

85. Материал p-n перехода имеет $\rho_p=1{,}3\cdot10^3$ Ом·м, $\rho_n=4{,}6\cdot10^{-3}$ Ом·м при T=300 К. Времена жизни неосновных носителей τ_p=100мкс; τ_n=150 мкс; S=1 мм^2. Вычислить обратный ток насыщения, если $\mu_p=4{,}8\cdot10^{-2}$ м^2/(В·с); μ_n=0,135 м^2/(В·с). Протяженность n- и p- областей много больше диффузионной длины. Чему будет равен обратный ток насыщения, если в таком же p-n переходе создать p- и n- области длиной 50 мкм каждая?

86. Ток, текущий в идеальном p-n переходе при большом обратном напряжении и T=300 К, равен $2\cdot10^{-7}$А. Найти ток, текущий при прямом напряжении, равном 0,1 В.

87. Вычислить прямое напряжение при токе диода 1 мА, если обратный ток насыщения I_o при T=300 К равен: а) 1 мкА; б) 1 мА.

88. Рассчитать и построить вольт-амперную характеристику идеального полупроводникового диода, если обратный ток насыщения I_0=10 мкА. Расчет проводить в интервале напряжений от -10 до 10 В с шагом 0,5 В. Провести расчеты и построить ВАХ для температуры Т=300 К+ΔT. N – последней цифры номера зачетной книжки:

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΔT	-30	-20	-10	10	20	30	40	50	60	70

Использованная литература: [5,6].

Лабораторные работы

Лабораторная работа № 1
«Исследование характеристик полупроводниковых диодов»

Цель работы: закрепление знаний о принципах работы полупроводниковых диодов, изучение методов снятия их ВАХ, анализ результатов измерений.
Приборы и оборудование: макетная плата для монтажа без пайки, набор перемычек, мультиметр (2 шт.), лабораторный блок питания.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя диоды для выполнения работы.
2. Из справочников выписать в отчет основные параметры исследуемого диода:
   - максимальное постоянное обратное напряжение;
   - максимальное импульсное обратное напряжение;
   - максимальный прямой (выпрямленный за полупериод) ток;
   - максимально допустимый прямой импульсный ток;
   - максимальный обратный ток;
   - максимальное прямое напряжение.
3. Выставить на лабораторном блоке питания напряжение 12 В.
4. Собрать на макетной плате схему согласно рис.1., **не подключая ЛБП к схеме.**

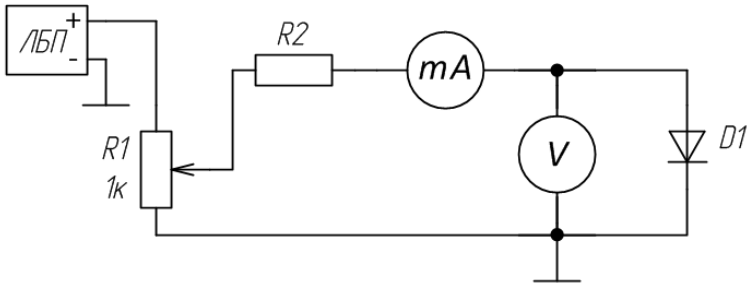

Рис.1. Схема исследования полупроводникового диода в прямом включении

Номинал резистора R2 выбирается в пределах 100 – 470 Ом.
4. После проверки схемы преподавателем подключить к схеме ЛБП и произвести измерения для построения ВАХ, регулируя падение напряжения на диоде потенциометром R1 в пределах показаний вольтметра 0..0.8 В, заполняя таблицу значений измеренных напряжений и токов. Особое внимание следует уделить тем точкам, в которых происходит резкое изменение измеряемых величин, увеличив в этих интервалах количество контрольных измерений.

5. Для получения обратной ветви ВАХ необходимо изменить полярность включения диода и исключить из схемы резистор R2 (либо, при необходимости, уменьшить его номинал). Выставить на ЛБП напряжение 30 В и повторить п.4 в пределах показаний вольтметра 0..30 В.
6. По полученным контрольным точкам построить ВАХ исследуемого диода.
7. По полученной ВАХ рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления исследуемого диода в точках, указанных преподавателем.
8. Повторить п.п. 2-7 для всех остальных диодов.
9. Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы полупроводникового диода.
2. Перечислите основные параметры полупроводникового диода.
3. Перечислите основные максимально допустимые параметры полупроводникового диода.
4. Нарисуйте ВАХ полупроводникового диода, проведите ее краткий анализ.
5. Приведите несколько вариантов применения полупроводниковых диодов.

Лабораторная работа № 2
«Исследование характеристик стабилитронов»

Цель работы: закрепление знаний о принципах работы стабилитронов, практическое исследование их характеристик и параметров.
Приборы и оборудование: макетная плата для монтажа без пайки, набор перемычек, мультиметр (2 шт.), лабораторный блок питания.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя стабилитроны для выполнения работы.
2. Из справочников выписать в отчет основные параметры исследуемого стабилитрона:
   - минимальное напряжение стабилизации;
   - номинальное напряжение стабилизации;
   - максимальное напряжение стабилизации;
   - статическое сопротивление;
   - минимальный ток стабилизации;
   - максимальный ток стабилизации;
   - мощность рассеяния.

3. Выставить на лабораторном блоке питания напряжение 12 В.
4. Собрать на макетной плате схему согласно рис.1., **не подключая ЛБП к схеме.**

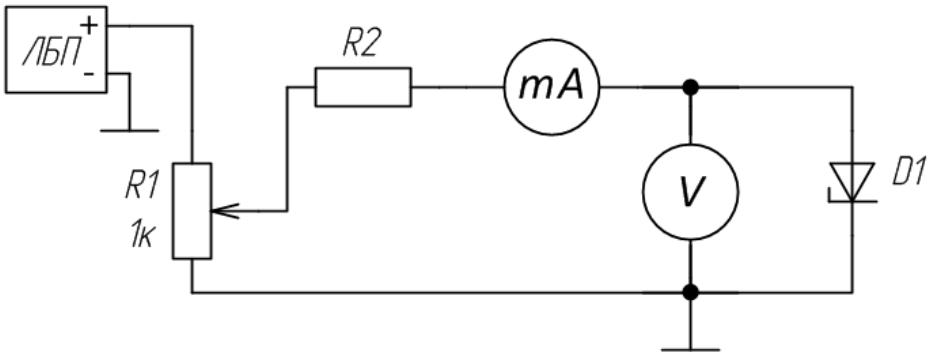

Рис.1. Схема исследования стабилитрона в прямом включении

Номинал резистора R2 выбирается в пределах 100 - 470 Ом.
4. После проверки схемы преподавателем подключить к схеме ЛБП и произвести измерения для построения ВАХ, регулируя падение напряжения на стабилитроне потенциометром R1 в пределах показаний вольтметра 0..0.8 В, заполняя таблицу значений измеренных напряжений и токов. Особое внимание следует уделить тем точкам, в которых происходит резкое изменение измеряемых величин, увеличив в этих интервалах количество контрольных измерений.
5. Для получения обратной ветви ВАХ необходимо изменить полярность включения стабилитрона, при необходимости изменив номинал резистора

R2. Выставить на ЛБП напряжение 30 В и повторить п.4, вращая ручку движка потенциометра R1 от крайнего правого до крайнего левого положений.
6. По полученным контрольным точкам построить ВАХ исследуемого стабилитрона.
7. На полученной ВАХ отметить основные параметры исследуемого стабилитрона, сравнить полученные значения со справочными данными.
8. Повторить п.п. 2-7 для всех остальных стабилитронов.
9. Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы стабилитрона.
2. Перечислите основные параметры стабилитрона.
3. Перечислите основные максимально допустимые параметры стабилитрона.
4. Нарисуйте ВАХ стабилитрона, проведите ее краткий анализ.
5. Приведите несколько вариантов применения стабилитрона.

Лабораторная работа № 3
«Исследование характеристик варикапов»

Цель работы: закрепление знаний о принципах работы диодов с изменяемой емкостью, изучение методов снятия их характеристик, анализ результатов измерений.

Приборы и оборудование: макетная плата для монтажа без пайки, набор перемычек, мультиметр, генератор стандартных сигналов, осциллограф, LCR-метр, лабораторный блок питания.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя варикапы для выполнения работы.
2. Из справочников выписать в отчет основные параметры исследуемого варикапа:
   - минимальная общая емкость;
   - максимальная общая емкость;
   - добротность;
   - максимальное постоянное обратное напряжение;
   - постоянный обратный ток;
   - обратная рассеиваемая мощность.
3. Собрать на макетной плате схему согласно рис.1, **не подключая ЛБП и генератор к схеме.**
4. Подключить генератор к осциллографу, выставить амплитуду синусоидального сигнала 1В, частоту – 100 кГц. На ЛБП выставить напряжение 15 В. Вместо осциллографа допускается применение мультиметра.
5. После проверки схемы преподавателем подключить к схеме ЛБП и генератор, произвести измерения для построения вольт-фарадной характеристики варикапа, регулируя напряжение смещения потенциометром R1 в пределах показаний вольтметра 0..15 В с шагом 1В, заполняя таблицу значений показаниями вольтметра и осциллографа.

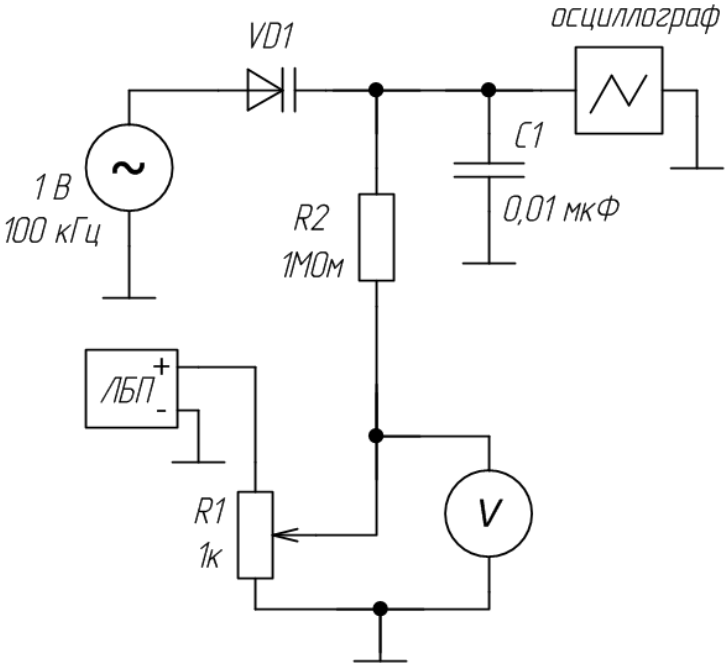

Рис.1. Схема снятия вольт-фарадной характеристики варикапа

6. Емкость варикапа в каждой контрольной точке определяется по формуле:

$$C_в = \frac{U_{вых} \cdot C_1}{U_{ген} - U_{вых}}$$

7. По полученным контрольным точкам построить вольт-фарадную характеристику исследуемого варикапа.
8. Собрать на макетной плате схему согласно рис.2, не подключая ЛБП. На ЛБП выставить напряжение 15 В.
9. После проверки схемы преподавателем подключить к схеме ЛБП, произвести измерения для построения вольт-фарадной характеристики варикапа, регулируя напряжение смещения потенциометром R1 в пределах показаний вольтметра 0..15 В с шагом 1В, заполняя таблицу значений показаниями вольтметра и LCR-метра (на частоте измерения 10-100 кГц).
10. По полученным контрольным точкам построить вольт-фарадную характеристику исследуемого варикапа. Сравнить характеристики, полученные различными способами, сделать выводы.

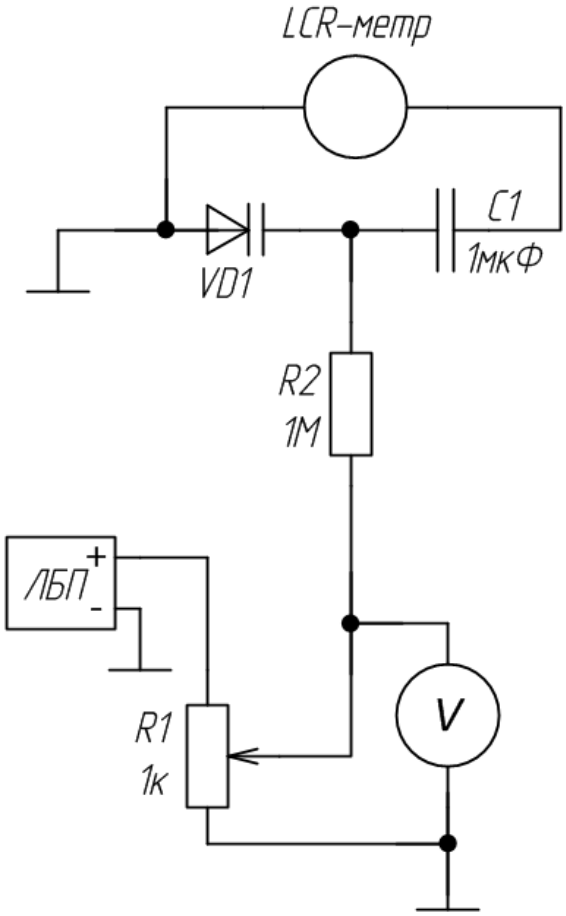

Рис.2. Схема снятия вольт-фарадной характеристики варикапа с использованием LCR-метра

11. Повторить п.п. 2-10 для всех остальных варикапов.
12. Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы варикапа.
2. Перечислите основные параметры варикапа.
3. Перечислите основные максимально допустимые параметры варикапа.
4. Нарисуйте вольт-фарадную характеристику варикапа, проведите ее краткий анализ.

Лабораторная работа № 4
«Исследование характеристик тиристоров»

Цель работы: закрепление знаний о принципах работы и основных параметрах тиристоров, изучение методов управления тиристорами.
Приборы и оборудование: макетная плата для монтажа без пайки, набор перемычек, мультиметр (2 шт.), лабораторный блок питания (2 шт.), генератор стандартных сигналов.

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя тиристоры для выполнения работы.
2. Из справочников выписать в отчет основные параметры исследуемого тиристора:
   – постоянное обратное напряжение;
   – постоянный импульсный ток в открытом состоянии;
   – неотпирающее постоянное напряжение управления;
   – отпирающий постоянный ток управления;
   – запирающий импульсный ток управления и т.п.

3. Собрать на макетной плате схему согласно рис.1., **не подключая ЛБП к схеме.**

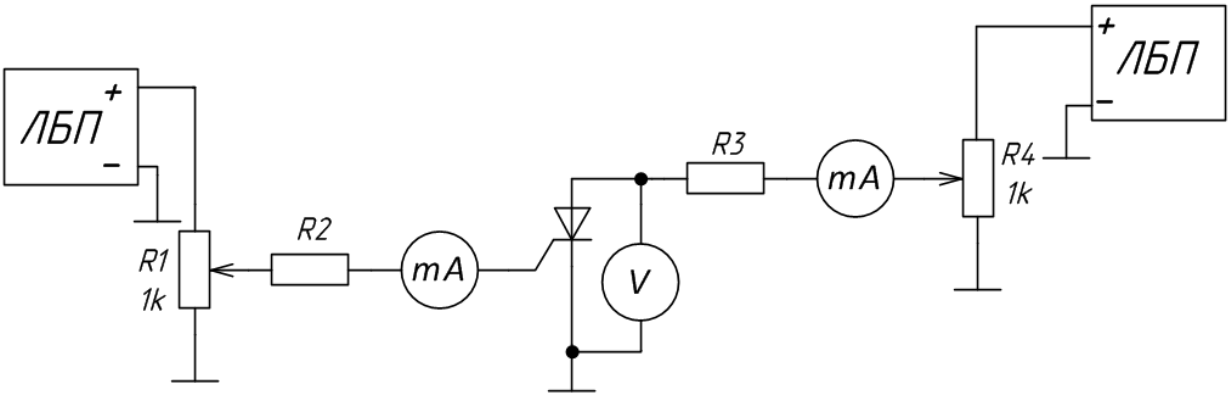

Рис.1. Схема исследования тиристора

Номинал резисторов R2 и R3 выбираются в соответствии с предельно допустимыми параметрами исследуемого тиристора.

4. После проверки схемы преподавателем подключить к схеме ЛБП. Вращая движок потенциометра R1, определить величину управляющего тока, при котором тиристор открывается. Измерить падение напряжение на открытом тиристоре.

При проведении измерений необходимо контролировать выход текущих показателей измеряемых величин за пределы максимально допустимых.

5. Отключить управляющее напряжение от схемы, и вращая движок потенциометра R4, определить величину тока выключения тиристора.
6. Повторить п.п. 2-5 для всех остальных тиристоров.
7. Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы тиристора.
2. Перечислите основные параметры тиристора.
3. Перечислите основные максимально допустимые параметры тиристора.
4. Нарисуйте ВАХ тиристора, проведите ее краткий анализ.
5. Поясните особенности применения тиристоров в цепях постоянного и переменного тока.
6. Приведите несколько схем выключения тиристоров.

Лабораторная работа № 5
«Исследование характеристик биполярных транзисторов»

Цель работы: закрепление знаний о принципах работы биполярных транзисторов, изучение методов снятия их ВАХ, анализ результатов измерений.

Приборы и оборудование: макетная плата для монтажа без пайки, набор перемычек, мультиметр (3 шт.), лабораторный блок питания (2 шт.).

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя биполярные транзисторы для выполнения работы.
2. Из справочников выписать в отчет основные параметры исследуемого транзистора:
   - структура;
   - предельно допустимые параметры;
   - статический коэффициент передачи тока;
   - граничная частота коэффициента передачи тока.
3. Выставить на лабораторном блоке питания напряжение 5 В.
4. Собрать на макетной плате схему для снятия входной характеристики транзистора, подключенного по схеме с ОЭ, согласно рис.1., **не подключая ЛБП к схеме.** На данном этапе исследования не задействуем цепь питания коллектора, показанную пунктирной линией ($U_{кэ}$ = 0 В). Номинал резистора R2 ограничивает ток базы и выбирается исходя из максимально допустимых параметров конкретного транзистора.

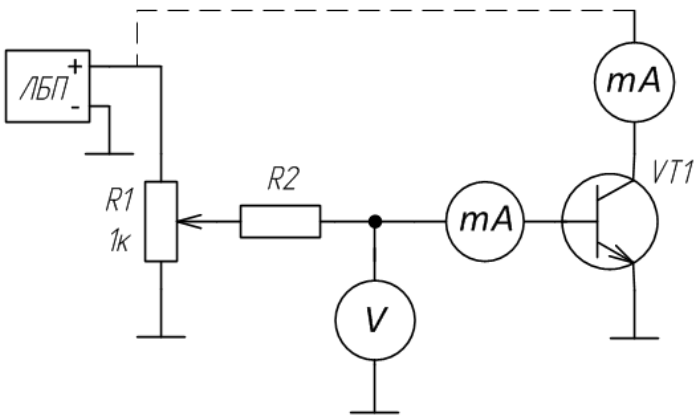

Рис.1. Схема снятия входной характеристики биполярного транзистора, подключенного по схеме с ОЭ

5. После проверки схемы преподавателем подключить к схеме ЛБП и произвести измерения для построения входной характеристики транзистора,

регулируя падение напряжения на переходе база-эмиттер в пределах показаний вольтметра 0..0.8 В, заполняя таблицу значений измеренных напряжений и токов. Особое внимание следует уделить тем точкам, в которых происходит резкое изменение измеряемых величин, увеличив в этих интервалах количество контрольных измерений.

6. Задействовать цепь питания коллектора, указанную на рис.1 пунктирной линией и повторить измерения (п.5) для $U_{кэ}$ = 5 В. При этом амперметром, включенным в коллекторную цепь, контролируется ток, который не должен превысить предельно допустимый коллекторный ток для данного транзистора.

7. По полученным контрольным точкам построить входную характеристику исследуемого транзистора при $U_{кэ}$ = 0 В и $U_{кэ}$ = 5 В.

8. Для построения семейства выходных характеристик собирается схема, показанная на рис.2.

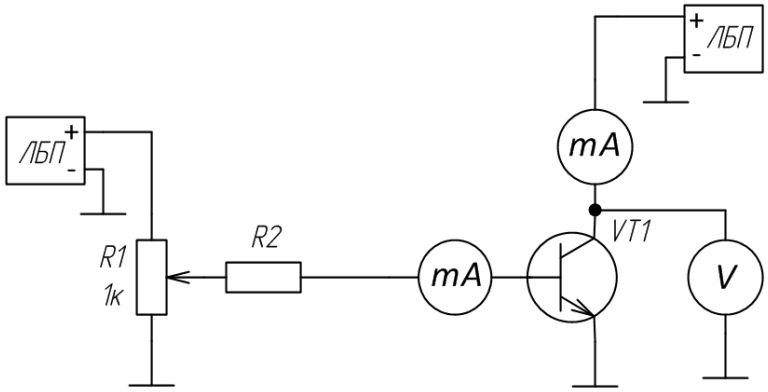

Рис.2. Схема снятия семейства выходных характеристик биполярного транзистора, подключенного по схеме с ОЭ

9. Снятие семейства выходных характеристик производится по нескольким фиксированным значениям тока базы, указанных преподавателем. Установка необходимых величин базового тока производится потенциометром R1. Измерения $U_{кэ}$ и $I_к$ производятся регулировкой напряжения коллектор-эмиттер лабораторным блоком питания, в пределах, не превышающих максимально допустимых параметров для исследуемого транзистора.

10. По полученным контрольным точкам построить семейство выходных характеристик исследуемого транзистора

11. Повторить п.п. 2-10 для всех остальных транзисторов.

12. Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы биполярного транзистора.
2. Перечислите основные параметры биполярного транзистора.
3. Перечислите основные максимально допустимые параметры биполярного транзистора.

4. Нарисуйте входные и выходные ВАХ биполярного транзистора, проведите их краткий анализ.
5. Приведите несколько вариантов применения биполярных транзисторов.

Лабораторная работа № 6
«Исследование характеристик полевых транзисторов»

Цель работы: закрепление знаний о принципах работы полевых транзисторов, изучение методов снятия их ВАХ, анализ результатов измерений.
Приборы и оборудование: макетная плата для монтажа без пайки, набор перемычек, мультиметр (3 шт.), лабораторный блок питания (2 шт.).

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя полевые транзисторы для выполнения работы.
2. Из справочников выписать в отчет основные параметры исследуемого транзистора:
   - предельное напряжение сток-исток VD_{SS};
   - максимальный ток стока (I_D);
   - предельное напряжение затвор-исток (V_{GS});
   - сопротивление сток-исток открытого канала ($R_{DS(on)}$);
   - максимальная мощность (P_D).
3. Собрать на макетной плате схему для снятия выходной характеристики транзистора согласно рис.1., **не подключая ЛБП к схеме.** Резистор R2 выбирается порядка 1кОм.

4. После проверки схемы преподавателем подключить к схеме ЛБП и произвести измерения для построения семейства выходных характеристик транзистора для различных напряжений $U_{зи}$, устанавливаемых потенциометром R1. Регулируя напряжение сток-исток при помощи ЛБП, заполняется таблица значений измеренных напряжений $U_{си}$ и токов $I_с$. Особое внимание следует уделить тем точкам, в которых происходит резкое изменение измеряемых величин, увеличив в этих интервалах количество контрольных измерений.

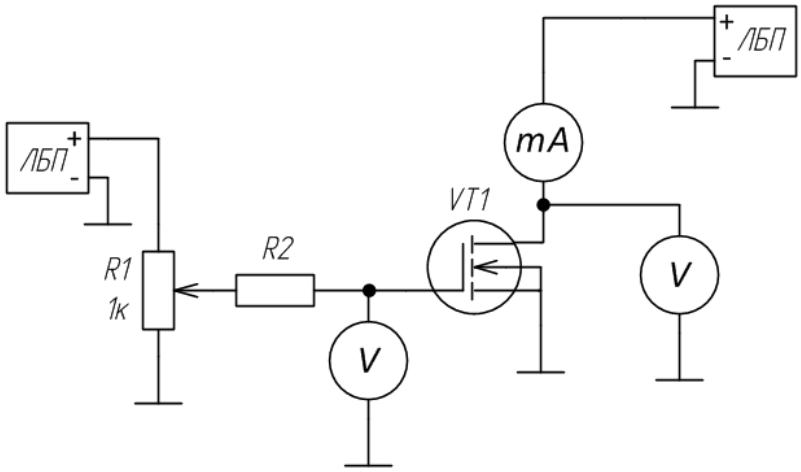

Рис.1. Схема снятия выходной характеристики полевого транзистора

При проведении измерений необходимо контролировать выход текущих показателей измеряемых величин за пределы максимально допустимых, включая рассеиваемую мощность.

5. По полученным контрольным точкам построить семейство выходных характеристик исследуемого транзистора.
6. Для измерения сопротивления сток-исток открытого канала $R_{DS(on)}$ отключить ЛБП от стока транзистора и подключить щупы LCR-метра в режиме измерения сопротивления. Увеличивая потенциометром R1 напряжение $U_{зи}$, измерить величину $R_{DS(on)}$, сравнить со справочными данными.
7. Повторить п.п. 2-6 для всех остальных транзисторов.
8. Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы полевого транзистора.
2. Перечислите основные параметры полевого транзистора.
3. Перечислите основные максимально допустимые параметры полевого транзистора.
4. Нарисуйте ВАХ полевого транзистора, проведите ее краткий анализ.
5. Приведите несколько вариантов применения полевых транзисторов.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы полевого транзистора.
2. Перечислите основные параметры полевого транзистора.
3. Перечислите основные максимально допустимые параметры полевого транзистора.
4. Нарисуйте ВАХ полевого транзистора, проведите ее краткий анализ.
5. Приведите несколько вариантов применения полевых транзисторов.

Лабораторная работа № 7
«Расчет и исследование электронных ключей на биполярном транзисторе»

Цель работы: получение практических навыков в расчете и исследовании электронных ключей на биполярных транзисторах.
Приборы и оборудование: макетная плата для монтажа без пайки, набор перемычек, мультиметр (2 шт.), лабораторный блок питания (2 шт.).

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на расчет электронного ключа (величина управляющего напряжения, параметры нагрузки).
2. Произвести расчет электронного ключа. Рассмотрим примерный порядок расчета электронного ключа на биполярном транзисторе, типовая схема которого показана на рис.1.

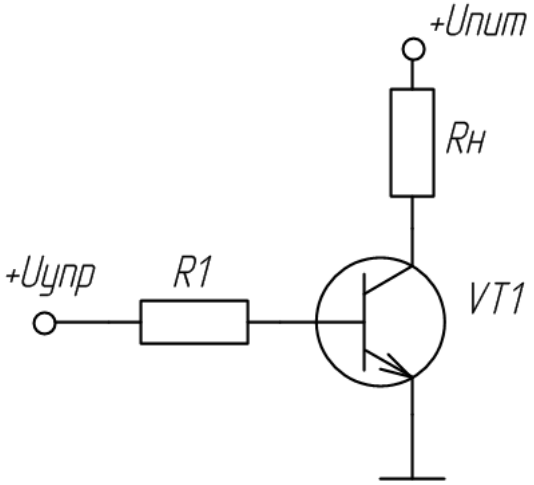

Рис.1. Типовая схема электронного ключа на биполярном транзисторе

К примеру, электронный ключ должен управлять включением-выключением светодиода с падением напряжения 3В и максимальным током 20 мА. Напряжение питания схемы составляет 12 В, управляющее напряжение $U_{упр} = 5$ В.
Выбираем из справочников транзистор, предельно допустимые параметры которого соответствуют заданным условиям. В данном случае для решения поставленной задачи подойдет любой биполярный транзистор. В справочнике находим следующие параметры транзистора:

- $U_{кэ.нас} = 0.4$ В;
- $U_{бэ.нас} = 1$ В;
- $h_{21э} = 100$.

Зададимся необходимым током коллектора $I_к$=10мА (меньше максимально допустимого для нагрузки). Таким образом, последовательно с нагрузкой необходимо включение в схему гасящего резистора. Падение напряжение на гасящем резисторе:

$U_{R\text{г}} = U_{\text{пит}} - U_{\text{н}} - U_{\text{кэ.нас}} = 12 - 3 - 0.4 = 8.6$ В

Определяем величину $R_{\text{г}}$:

$$R_{\text{г}} = \frac{U_{R\text{г}}}{I_{\text{к}}} = \frac{8.6\ \text{В}}{10\ \text{мА}} = 860\ \text{Ом}$$

Т.к. $I_k = I_{\text{б}} \cdot h_{21\text{э}}$, ток базы составит 10мА/100 = 100 мкА.

Определим номинал резистора R1:

$$R_1 = \frac{U_{\text{упр}} - U_{\text{бэ.нас}}}{I_{\text{б}}} = \frac{5\text{В} - 1\text{В}}{100\ \text{мкА}} = 40\text{кОм}$$

3. На макетной плате собрать схему рассчитанного электронного ключа, с ЛБП подать напряжение питания. Работоспособность ключа проверяется подачей-снятием управляющего напряжения.
4. Произвести необходимые измерения (ток базы, ток нагрузки), сравнить полученные измерения с результатами расчета.
5. Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Поясните особенности различных схем включения биполярных транзисторов.
2. Кратко охарактеризуйте режимы работы биполярных транзисторов.
3. Поясните, по каким параметрам выбирается транзистор для построения электронного ключа на биполярном транзисторе.
4. Поясните принцип работы электронного ключа на биполярном транзисторе.

Лабораторная работа № 8
«Расчет и исследование электронных ключей на полевом транзисторе»

Цель работы: получение практических навыков в расчете и исследовании электронных ключей на полевых транзисторах.
Приборы и оборудование: макетная плата для монтажа без пайки, набор перемычек, мультиметр (2 шт.), лабораторный блок питания (2 шт.).

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на расчет электронного ключа (величина управляющего напряжения, параметры нагрузки).
2. Произвести расчет электронного ключа. Рассмотрим примерный порядок расчета электронного ключа на полевом транзисторе, типовая схема которого показана на рис.1.

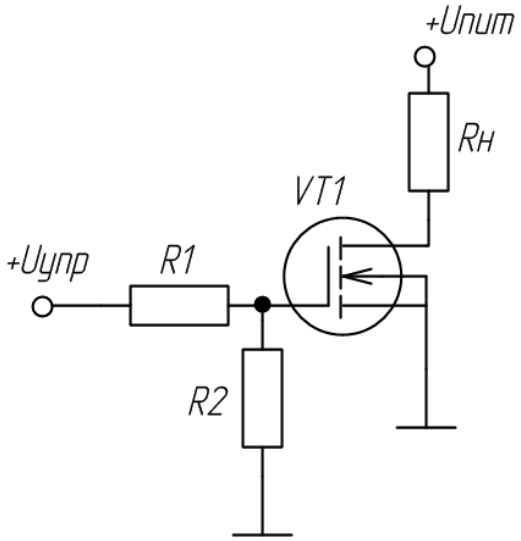

Рис.1. Типовая схема электронного ключа на полевом транзисторе

К примеру, электронный ключ должен управлять включением-выключением светодиода с падением напряжения 3В и максимальным током 20 мА. Напряжение питания схемы составляет 12 В, управляющее напряжение $U_{упр} = 5$ В.

Полевой транзистор выбирается из справочников в соответствии с предельными параметрами, а также величиной управляющего напряжения, при котором указывается величина $R_{DS(on)}$, которое должно быть ниже или равным заданному в условии. Временными параметрами электронного ключа в рамках данной лабораторной работы пренебрегаем. Т.к. сопротивление канала полевого транзистора в открытом состоянии $R_{DS(on)}$ достаточно мало, во многих случаях его величиной при расчете гасящего резистора можно пренебречь.

Падение напряжение на гасящем резисторе:
$U_{Rг} = U_{пит} - U_н = 12 - 3 = 9$ В
Определяем величину $R_г$:

$$R_{\text{г}} = \frac{U_{R\text{г}}}{I_{\text{к}}} = \frac{9\ \text{В}}{10\ \text{мА}} = 900\ \text{Ом}.$$

Величина R1 выбирается исходя из предельного тока источника управляющего сигнала и рассчитывается по закону Ома.

Резистор R2 предназначен для ускорения разряда емкости затвора транзистора и выбирается в пределах 10 кОм – 100 кОм.

3. На макетной плате собрать схему рассчитанного электронного ключа, с ЛБП подать напряжение питания. Работоспособность ключа проверяется подачей-снятием управляющего напряжения.
4. Произвести необходимые измерения (минимальная величина управляющего напряжения, ток через нагрузку), сравнить полученные измерения с результатами расчета.
5. Удалить из схемы резистор R2, проверить работоспособность ключа, сделать выводы.
6. Оформить отчет по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Поясните особенности различных схем включения полевых транзисторов.
2. Кратко охарактеризуйте режимы работы полевых транзисторов.
3. Поясните, по каким параметрам выбирается полевой транзистор для построения электронного ключа.
4. Поясните принцип работы электронного ключа на полевом транзисторе.

Оформление отчета по лабораторным работам

Отчет по лабораторным работам должен содержать: титульный лист (общий для всех лабораторных работ), название и номер работы, её цель, приборы, оборудование и электронные компоненты, применяемые в ходе выполнения экспериментальной части, результаты исследования (измеренные значения, таблицы, графики, осциллограммы и т.п.) и выводы.
Полученные данные эксперимента студент частично обрабатывает в лаборатории, а окончательно – в ходе самостоятельной подготовки.

Отчет печатается на стандартном листе бумаги формата А4. Размер полей: левое поле - 35 мм, правое - не менее 10 мм, верхнее и нижнее - не менее 20 мм. Шрифт Times New Roman размером 14, межстрочный интервал - 1,5. Нумерация страниц отчета – сквозная (первой страницей является титульный лист, номер страницы на титульном листе не проставляется).

Для построения графиков рекомендуется применять соответствующее программное обеспечение (Excel из пакета Microsoft Office, MicroLab Origin, OpenOffice Calc, Mathcad, MATLAB и др.). При построении графиков необходимо на осях координат указывать обозначения откладываемых величин, единицы их измерений. Вдоль осей координат наносятся деления и проставляются в масштабе числовые значения.

Отчет, подписанный студентом с проставленной датой выполнения, представляется преподавателю на следующее лабораторное занятие. При защите работы студент должен объяснить любой выполненный эксперимент или расчет и ответить на дополнительные вопросы преподавателя по данной теме. Контрольные вопросы, знание ответов на которые обязательны, приведены в описании лабораторных работ.

Студенты, не представившие отчет и не получившие зачет по предыдущей работе, к выполнению последующих работ не допускаются. Отработка пропущенных лабораторных работ производится на индивидуальных занятиях по согласованию с преподавателем.

Список литературы

1. Глазачев, А. В. Физические основы электроники: учебное пособие / А. В. Глазачев, В. П. Петрович; Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 243 с.

2. Поляков А.М. Разгаданный полупроводник. – М.: Просвещение, 1981. – С. 160.

3. Основы электроники: учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 296 с.

4. Грецов, М. В. Физический практикум. Оптика, элементы физики твердого тела, атомная и ядерная физика: учеб. пособие / М. В. Грецов, С. С. Жуков; ВолгГТУ. – Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 147 с.

5. Сборник задач по дисциплине «Физические основы микроэлектроники». – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 91 с.

6. Физические основы электроники: сборник задач и примеры их решения: учебно-методическое пособие / А.В. Аристов, В.П. Петрович. – Томск: Изд-во Томского политех. университета, 2015. – 100 с.

Содержание

Введение 3

Теоретическая часть 5

Энергетические уровни и зоны 5

Проводники, полупроводники и диэлектрики 5

Собственная электропроводность полупроводников 7

Примесная электропроводность полупроводников 9

Дрейф и диффузия зарядов в полупроводниках 12

Распределение электронов по энергетическим уровням в полупроводниках 14

Электронно-дырочный переход 19

Вентильные свойства p-n-перехода 22

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) p-n-перехода 23

Виды пробоев p-n-перехода 25

Емкость p-n-перехода 27

Гетеропереходы 28

Полупроводниковый диод 29

Туннельный диод 31

Варикап. Импульсный диод. 33

Биполярный транзистор 35

Полевой транзистор 37

Тиристоры 41

Запираемые тиристоры. Симисторы. 44

Условные обозначения 46

Практическая часть 47

Список задач 47

Лабораторные работы 54

Лабораторная работа №1 «Исследование характеристик полупроводниковых диодов» 54

Лабораторная работа №2 «Исследование характеристик стабилитронов» 56
Лабораторная работа №3 «Исследование характеристик варикапов» 58
Лабораторная работа №4 «Исследование характеристик тиристоров» ... 61
Лабораторная работа №5 «Исследование характеристик биполярных транзисторов» 63
Лабораторная работа №6 «Исследование характеристик полевых транзисторов» 66
Лабораторная работа №7 «Расчет и исследование электронных ключей на биполярном транзисторе» 68
Лабораторная работа №8 «Расчет и исследование электронных ключей на полевом транзисторе» 70
Оформление отчета по лабораторным работам 72
Список литературы 73

Учебно-методическое пособие

Денис Владимирович Кузнецов,
Евгений Александрович Арнаутов,
Александр Валентинович Сидоров

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебно-методическое пособие
для подготовки к лабораторным и практическим занятиям

Технический редактор – О. А. Ядыкина
Техническое исполнение – В. М. Гришин
Печатается в авторской редакции

Формат 60 x 84 /16. Гарнитура Times. Печать трафаретная.
Печ.л. 4,8 Уч.-изд.л. 4,6
Тираж 300 экз. Заказ 113

Отпечатано с готового оригинал-макета на участке оперативной полиграфии
Елецкого государственного университета им. И. А. Бунина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»
399770, г. Елец, ул. Коммунаров, 28,1