

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕРМАНИЕВЫХ И КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ

1. Цель работы

Исследовать характеристики и параметры силовых диодов в диапазоне температур 20-40 °С, исследовать частотную характеристику одного из диодов, измерить барьерную ёмкость и снять её зависимость от напряжения.

2. Теоретическая часть

2.1. Физика образования р-п-перехода

P-n-переход - переходный слой между областями полупроводника с p- и n-типом проводимости, в котором существует диффузионное электрическое поле. Этот переходный слой имеет и другие названия - область пространственного заряда (ОПЗ) и обеднённый слой.

В полупроводнике p-типа электрическая нейтральность обеспечивается тем, что заряд основных носителей (дырок) компенсируется зарядом неподвижных отрицательных ионов примеси и зарядом неосновных носителей (электронов). В полупроводнике n-типа заряд основных носителей (электронов) компенсируется зарядом неподвижных положительных ионов примеси и зарядом неосновных носителей (дырок).

При образовании p-n-перехода вначале происходит преимущественный переход электронов из n-области в p-область, а дырок из p-области в n-область. Переходы происходят за счет диффузии, которая стремится выровнять концентрации носителей одинакового типа в различных областях. Уходя из n-области в p-область, электрон оставляет нескомпенсированный положительный ион донорной примеси вблизи металлургической границы p-n-перехода. Перешедший в p-область электрон рекомбинирует с дыркой вблизи металлургической границы, что приводит к появлению в p-области нескомпенсированного отрицательного заряда неподвижного иона акцепторной примеси. К точно такому же результату приводит переход дырки из p-области в n-область. Таким образом, переход любого основного носителя приводит к появлению у металлургической границы перехода пары разделенных в пространстве ионов разной полярности, нескомпенсированных подвижными носителями заряда. Образуется область, в которой возникает электрическое поле между разноименными неподвижными зарядами ионов примесей (область пространственного заряда).

Переход из p-области неосновного носителя (электрона) приводит к тому, что дырка, ранее компенсировавшая поле его заряда в p-области, теперь будет компенсировать поле неподвижного отрицательного иона вблизи металлургической границы. Электрон, перешедший в n-область, компенсирует электрическое поле положительного иона. В результате в ОПЗ исчезает пара нескомпенсированных ионов примеси разного знака. Переход неосновного носителя (дырки) из n-области в p-область дает точно такой же результат.

Таким образом, переход через ОПЗ любого неосновного носителя приводит к компенсации двух противоположных по знаку неподвижных зарядов в ОПЗ, что уменьшает электрическое поле, появившееся за счет переходов через ОПЗ основных носителей.

Электрическое поле в ОПЗ обуславливает появление разности потенциальных энергий подвижных носителей заряда в р- и n- областях. Потенциальная энергия электронов в р-области будет выше, чем в n-области, так как р-область заряжается отрицательно, а n-область - положительно. Для дырок потенциальная энергия будет больше в n-области. Другими словами, между р- и n-областями возникает потенциальный барьер. Этот барьер увеличивают переходы через ОПЗ основных носителей и уменьшают переходы неосновных. Равновесное значение высоты потенциального барьера установится при равенстве встречных потоков основных и неосновных носителей. В момент начала образования р-n-перехода поток основных носителей намного больше потока неосновных, что приводит к росту потенциального барьера. Однако электрическое поле в ОПЗ тормозит основные носители заряда и ускоряет неосновные при их движении в направлении поля. Подвижные носители имеют различную кинетическую энергию в направлении барьера вследствие распределения электронов и дырок по кинетическим энергиям. Поэтому по мере роста потенциального барьера часть основных носителей с энергией, меньшей высоты барьера, не будет его преодолевать. Поэтому поток основных носителей, преодолевающих потенциальный барьер, будет уменьшаться. По мере уменьшения потока основных носителей, преодолевших барьер, рост барьера будет замедляться. Для неосновных носителей поле в ОПЗ является ускоряющим, поэтому их поток в направлении ОПЗ не меняется. Следовательно, при некоторой высоте потенциального барьера встречные потоки основных и неосновных носителей станут равными, и высота потенциального барьера перестанет изменяться. Высота установившегося потенциального барьера при отсутствии внешнего напряжения на р-n-переходе, деленная на заряд электрона, называется контактной разностью потенциалов j_k . Тогда высота барьера будет $e j_k$, где e – заряд электрона.

На рис. 1 изображены энергетическая диаграмма р- и n-областей и функции распределения по кинетическим энергиям в потоках электронов и дырок, движущихся к р-n-переходу в момент начала его образования. Здесь E_x - составляющая кинетической энергии носителя заряда в направлении р-n-перехода. Для электронов ось энергий направлена вверх, а для дырок - вниз. Функция dn

dn
/dE

x
описывает распределение электронов в потоке по кинетическим энергиям в n-области,
 dn

- n_p
 $/dE$
 x
 - распределение электронов по энергиям в потоке в p-области, dn
- p_p
 $/dE$
 x
 - распределение дырок по энергиям в потоке в p-области, dp
- p_n
 $/dE$
 x
 - распределение дырок по энергиям в потоке в n-области. Площади под кривыми функций распределения равны соответствующим потокам электронов (n
- n_n
 - поток электронов из n-области, n
- n_p
 - поток электронов из p-области) и дырок (p
- p_p
 - поток дырок из p-области, p
- p_n
 -
 поток дырок из n-области), падающих на барьер. E
- ϵ
 - энергия дна зоны проводимости, E
- ν
 - энергия потолка валентной зоны. E
- f_n
 и E
- f
 p
 - уровни Ферми в полупроводниках n- и p- типов соответственно. Из рис. 1 видно, что в момент начала образования p-n-перехода потенциальный барьер отсутствует и потоки основных носителей, проходящих металлургическую границу, намного больше встречных потоков неосновных носителей.

На рис. 2 изображены энергетическая диаграмма p-n-перехода и функции распределения по кинетическим энергиям в потоках электронов и дырок после выравнивания встречных потоков носителей одного типа. Из рисунка видно, что уровень Ферми в p- и n- областях занимает одинаковое положение. Это объясняется тем, что вследствие переходов носителей при объединении p- и n- областей работа по удалению электрона в вакуум из образовавшейся структуры становится одинаковой для p- и n- областей. Действительно, p-область заряжается отрицательно и поэтому работа по удалению электрона из неё в вакуум уменьшается. А n-область заряжается положительно и работа по удалению электрона из неё в вакуум увеличивается.

Равенство встречных потоков электронов из n - и p - областей выражается в равенстве площадей под кривой функции распределения в p -области и части площади, лежащей выше линии e_j (штрих-пунктирная линия) на функции распределения в n -области. Равенство встречных потоков дырок из p - и n - областей выражается в равенстве площадей под кривой функции распределения в n -области и части площади, лежащей ниже линии e_j (штрих-пунктирная линия) на функции распределения в p -области.

Для анализа зависимости контактной разности потенциалов в p - n -переходе от ширины запрещенной зоны материала, концентрации примесей и температуры достаточно рассмотреть условие равенства встречных потоков носителей одного типа, например электронов, поскольку концентрации основных и неосновных носителей при тепловом равновесии однозначно связаны.

Рассмотрим зависимость контактной разности потенциалов от ширины запрещенной зоны полупроводника, из которого выполнен p - n -переход. Будем сравнивать переходы с одинаковым уровнем легирования p - и n - областей при одной и той же температуре. Потоки электронов из n -областей к металлургической границе в момент образования p - n -перехода будут одинаковыми в полупроводниках с различной шириной запрещенной зоны, так как их величина определяется концентрацией электронов (определяется концентрацией примесей, которая должна быть одинаковой для сравниваемых полупроводников) и температурой. Однако встречные потоки электронов из p -областей существенно различны. Так как концентрация электронов в p -области полупроводника с большей шириной запрещенной зоны меньше, то и поток электронов будет меньше. Следовательно, равенство встречных потоков электронов при большей ширине запрещенной зоны установится при большей высоте потенциального барьера. Поэтому контактная разность потенциалов в p - n -переходе тем больше, чем шире запрещенная зона.

При одинаковой ширине запрещенной зоны контактная разность потенциалов растет с увеличением уровня легирования. Повышение уровня легирования n -области приводит к увеличению потока электронов к металлургической границе из n -области, так как увеличивается концентрация электронов. Это ведет к увеличению контактной разности потенциалов, поскольку поток электронов из p -области постоянен, если в ней не меняется уровень легирования. Если одновременно увеличивать уровень легирования в p -области, то это приведет к уменьшению потока электронов из неё и, следовательно, к еще большему росту контактной разности потенциалов.

Повышение температуры приводит к одинаковому повышению скоростей электронов во встречных потоках. По этой причине потоки увеличиваются в одинаковое число раз. Концентрация электронов как неосновных носителей в р-области увеличивается экспоненциально, а в n-области концентрация практически не меняется, так как определяется концентрацией примеси. Поэтому с ростом температуры поток электронов из р-области увеличивается в большей степени. Равенство встречных потоков электронов по этой причине нарушается и устанавливается вновь при меньшей высоте потенциального барьера. Следовательно, с ростом температуры контактная разность потенциалов уменьшается. Величина контактной разности потенциалов составляет 0,35 – 0,6 В для германия, 0,8 – 1,2 В для кремния и 1,15 – 1,5 В для арсенида галлия [3].

Таким образом, контактная разность потенциалов в р-n-переходе увеличивается с ростом ширины запрещенной зоны и концентрации основных носителей (легирующей примеси) и уменьшается с ростом температуры.

2.2. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

на основе р-n-перехода

Полупроводниковый диод на основе р-n-перехода содержит ОПЗ, области р- и n-типа за пределами ОПЗ, называемые р-базой и n-базой соответственно, и металлические выводы. Его вольт-амперная характеристика зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника, концентрации легирующих примесей, температуры, уровня инжекции носителей в базы и ширины базовых областей. Характеристика несимметричная. Различают прямую (внешнее напряжение приложено плюсом к р-области и минусом к n-области) и обратную (внешнее напряжение приложено минусом к р-области и плюсом к n-области) ветви вольт-амперной характеристики. Рассмотрим идеализированную вольт-амперную характеристику для диода с плоским и резким р-n-переходом и широкой базой (ширина базы много больше диффузионной длины). Идеализация состоит в том, что в объяснении вида вольт-амперной характеристики учитывается только нарушение

равенства потоков при приложении внешнего напряжения.

При отсутствии напряжения на диоде потоки основных носителей, преодолевших потенциальный барьер, и встречные им потоки неосновных носителей равны. Поэтому результирующий поток n и, следовательно, ток $I = en$ равны нулю.

При приложении прямого напряжения U происходит уменьшение высоты потенциального барьера до величины $e(j_k - U)$, так как полярность прямого напряжения противоположна контактной разности потенциалов и предполагается, что все напряжение прикладывается к ОПЗ. Потоки основных носителей, преодолевших барьер, становятся больше потоков неосновных носителей (n

n_p
 $> n$
 n_p
 $, a n$
 p_p
 $> n$
 p_n)
 . К потоку основных носителей, преодолевавших барьер при отсутствии напряжения, добавляется поток носителей с энергией в диапазоне от $e(j_k - U)$ до $e(j_k$
 k
 $- U)$ до $e(j_k$
 k
 . До подачи прямого напряжения эти носители не могли преодолеть потенциальный барьер, а теперь преодолевают пониженный барьер. Поле в ОПЗ, хотя и уменьшается по величине, для неосновных носителей остается ускоряющим, поэтому их потоки не изменяются. Результирующий поток i , следовательно, прямой ток, определяемый разницей потоков основных и неосновных носителей, становятся отличными от нуля. При увеличении прямого напряжения до величины, когда постоянным потоком неосновных носителей можно пренебречь ($U > 3kT/e$, что при 300 К составляет 0,072 В), прямой ток увеличивается по экспоненциальному закону. Это объясняется тем, что распределение носителей в потоке по кинетическим энергиям подчиняется экспоненциальному закону. Число носителей, преодолевающих барьер, экспоненциально растет с понижением высоты барьера.

В зависимости от площадей р-п-переходов в диодах величины прямых токов могут быть в пределах от единиц миллиампер до сотен ампер. В токе имеются электронная и дырочная компоненты, обусловленные инжекцией электронов в р-область и дырок в п-область. Как правило, одна из областей кристалла (для кремниевых диодов это р-область) имеет концентрацию легирующих примесей на несколько порядков больше.

Поэтому в прямом токе преобладает инжекция носителей в слаболегированную область (эту область называют базой диода). При широкой базе инжектированные носители рекомбинируют в объеме базы, не достигая электродов. Инжекция неосновных носителей в базу приводит к появлению в базе электрического поля, которое вызывает перемещение основных носителей в базу. Следовательно, в базе текут диффузионный ток неосновных носителей и дрейфовый ток основных. Если база имеет размер меньше диффузионной длины, то инжектированные носители рекомбинируют в основном на металлическом вводе диода и в базе в установившемся режиме протекает только диффузионная компонента тока.

При приложении обратного напряжения (диапазон от нуля до сотен вольт) высота потенциального барьера увеличивается (рис.3), так как полярность обратного напряжения совпадает с контактной разностью потенциалов (знак обратного напряжения отрицателен). При этом потоки неосновных носителей не изменяются, так как поле в ОПЗ остается для них ускоряющим. Потоки основных носителей, преодолевающих потенциальный барьер, экспоненциально убывают с ростом высоты барьера. При обратном напряжении, большем по абсолютной величине $3kT/e$ (0.072 В при $T = 300$ К), поток основных носителей почти в 10 раз меньше потока неосновных и им можно пренебречь. Поэтому результирующий поток будут определять потоки неосновных носителей. Результирующий поток и, следовательно, ток меняют направление на противоположное. Потоки неосновных носителей не зависят от величины обратного напряжения. Поэтому, когда можно пренебречь потоками основных носителей, преодолевших барьер (при обратном напряжении, большем 0,072 В), обратный ток определяется только потоками неосновных носителей и поэтому не зависит от обратного напряжения.

Величины обратных токов диодов зависят от ширины запрещенной зоны полупроводникового материала, степени легирования, площади р-п-перехода и температуры и находятся в пределах от долей наноампера до сотен микроампер.

Как отмечалось ранее, при одинаковой степени легирования р- и п-областей контактная разность потенциалов р-п-перехода больше в полупроводнике с большей запрещенной зоной. Рассмотрим график функции распределения в потоке основных носителей, например электронов, который будет одинаков для полупроводников с различной шириной запрещенной зоны при одинаковом уровне легирования, например, кремния и германия (рис. 4). Пунктиром отмечена высота потенциального барьера для кремния $e\varphi_{kSi}$ и для германия $e\varphi_j$

к

Ge

при отсутствии напряжения на диодах. При приложении к обоим диодам одного и того

же прямого напряжения U потенциальный барьер уменьшится на величину этого напряжения. При этом результирующий поток электронов, равный заштрихованной площади под кривой, для кремния (1) окажется меньше, чем для германия (2). Это связано с тем, что носителей с меньшими энергиями, как следует из вида функции распределения, в потоке всегда больше. Аналогично можно показать, что и результирующий поток дырок в диоде с меньшей шириной запрещенной зоны будет больше. Следовательно, при одинаковом прямом смещении ток в диоде с меньшей шириной запрещенной зоны будет больше. Поэтому прямая ветвь вольт-амперной характеристики в диодах с меньшей шириной запрещенной зоны идет выше.

Обратный ток в диодах определяется потоками неосновных носителей. Потоки неосновных носителей определяются следующими выражениями:

$$n_{np} = (1/4) n_{p0} V_n S, \quad (1)$$

$$n_{pn} = (1/4) p_{n0} V_p S, \quad (2)$$

где n_{np} - поток электронов из p-области, n_{p0} - равновесная концентрация электронов в p-области, V_n - среднеарифметическая тепловая скорость электронов, S - площадь p-n-перехода, p

n_{pn} - поток дырок из n-области, p

p_{n0} - равновесная концентрация дырок в p-области, V_p

p - среднеарифметическая тепловая скорость дырок.

В диоде с большей шириной запрещенной зоны концентрация неосновных носителей меньше, так как требуется большая энергия для ионизации атомов основного вещества кристалла, а концентрация фононов, ионизирующих атомы, с ростом энергии убывает. Тепловые скорости носителей одного типа одинаковы, так как определяются температурой кристалла. Поэтому поток неосновных носителей, а следовательно, и обратный ток будут при одинаковых обратных напряжениях меньше в диоде с большей шириной запрещенной зоны.

При повышении температуры контактная разность потенциалов уменьшается. Поэтому с ростом температуры прямая ветвь вольт-амперной характеристики располагается выше. Объяснение такое же, как и для диодов с разной шириной запрещенной зоны.

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики определяется потоками неосновных носителей. С ростом температуры по экспоненциальному закону увеличивается концентрация неосновных носителей и, как корень из температуры, растет их тепловая скорость. Поэтому потоки неосновных носителей с ростом температуры увеличиваются. Следовательно, с ростом температуры увеличивается обратный ток диода.

Приведенное объяснение вольт-амперной характеристики диода базируется на идеализированной модели, которая не учитывает ряд факторов. Так на начальной части прямой ветви характеристики (для кремниевого диода смещение до 0,2 В) в токе преобладает компонента, обусловленная рекомбинацией носителей в ОПЗ. Её в основном создают носители, не способные преодолеть потенциальный барьер, поэтому она растет с увеличением ширины запрещенной зоны полупроводника. При большем прямом смещении преобладает инжекционная компонента тока. В области высокого уровня инжекции (концентрация инжектированных носителей больше концентрации основных) существенна часть внешнего напряжения, падающая на сопротивлении базы, причем для диодов с тонкой базой (ширина базы меньше диффузионной длины) величина этого сопротивления зависит от уровня инжекции. В этой области прямая ветвь реальной характеристики идет ниже идеальной. Обратный ток диода, кроме компоненты тока, обусловленной потоками неосновных носителей из p- и n- областей, называемой током насыщения или тепловым током, содержит ток генерации, обусловленный генерацией носителей в ОПЗ. Ток генерации обусловлен тепловой генерацией электронно-дырочных пар в ОПЗ, где они разделяются электрическим полем. Ток генерации увеличивается с ростом обратного напряжения (пропорционально корню квадратному из напряжения), поскольку с ростом обратного напряжения по такому закону увеличивается объем ОПЗ (объем, где генерируются носители). Соотношение между током насыщения и током генерации зависит от ширины запрещенной зоны. Так для германиевых диодов ток насыщения намного больше тока генерации, а для кремниевых, арсенид-галлиевых, фосфид-галлиевых диодов в обратном токе преобладает ток генерации. Кроме этого, имеют место токи утечки между электродами по поверхности кристалла. При некотором обратном напряжении может наступить пробой диода, выражающийся в резком (на порядки) увеличении тока при незначительном превышении напряжения пробоя.

Несимметричность вольт-амперной характеристики обуславливает выпрямляющие

свойства диода (одностороннюю проводимость). При обратной полярности напряжения сопротивление диода на 5 – 11 порядков больше (отношение обратного и прямого статических сопротивлений определяется выражением $\exp[eU/(kT)]$), чем при прямой полярности. Поэтому в прямом направлении течет на несколько порядков больший ток, чем в обратном направлении. Грубо говоря, диод проводит ток в одном направлении.

2.3. Барьерная емкость диода

При приложении к диоду внешнего напряжения происходит изменение размера области пространственного заряда. Если приложено прямое напряжение, то область пространственного заряда уменьшается, так как в n-базу вводятся дополнительные электроны, а в р-базу – дырки, которые компенсируют часть зарядов неподвижных ионов в ОПЗ. Наоборот, при приложении обратного напряжения область пространственного заряда увеличивается, поскольку выводится часть электронов из n-базы и часть дырок из р-базы, обнажая часть неподвижных ионов примеси. Таким образом, при приложении внешнего напряжения к диоду заряд двойного слоя в ОПЗ изменяется, причем положительный и отрицательный заряды остаются равными друг другу. Изменение заряда под действием напряжения говорит о наличии свойства емкости у р-n-перехода, а следовательно, и у диода. Для характеристики этого свойства диода используется дифференциальный (малосигнальный) параметр, который называют барьерной ёмкостью р-n-перехода $C_{бар} = dQ/dU$. Здесь dQ - приращение заряда в ОПЗ при изменении напряжения на р-n-переходе на dU . Приращение заряда на величину dQ происходит как в р-, так и в n-области. Для резкого плоского р-n-перехода $C_{бар} = See_0/d$, где S – площадь р-n-перехода, d - ширина ОПЗ. Поскольку ширина ОПЗ зависит от постоянного напряжения, приложенного к р-n-переходу, то $C_{бар}$

уменьшается с ростом обратного напряжения. Наличие барьерной ёмкости является одной из причин инерционности диода.

2.4. Диффузионная ёмкость диода

Кроме барьерной ёмкости инерционность диода определяется конечным временем установления распределения концентрации неосновных носителей в базе диода при изменении напряжения или тока. Время установления распределения концентрации определяется тепловой скоростью носителей. Эта инерционность проявляет себя подобно ёмкости. Для её оценки используют дифференциальный параметр, который называют диффузионной ёмкостью диода $C_{\text{диф}} = dQ_{\text{инж}}/dU$. Здесь $dQ_{\text{инж}}$ - приращение инжектированного в базу заряда при изменении напряжения на р-п-переходе на dU . Следует отметить, что поскольку заряд неосновных носителей в базе полностью компенсируется основными носителями, то C

диф

не является истинной ёмкостью. В отличие от барьерной ёмкости по ней не протекает ток смещения. Диффузионная ёмкость экспоненциально растёт с увеличением прямого смещения на р-п-переходе. Для кремниевого диода при напряжении, большем 0,5 В, она превышает барьерную ёмкость. При обратном смещении её действием можно пренебречь.

2.5. Частотная характеристика выпрямления

Частотная характеристика выпрямления диода - это зависимость отношения среднего выпрямленного тока к среднему значению выпрямленного тока на частоте 50 Гц от частоты переменного напряжения синусоидальной формы. Инерционность процессов установления распределения неосновных носителей в базе и перезарядки барьерной ёмкости приводит к тому, что это отношение с ростом частоты становится меньшим единицы. На низких частотах, когда период переменного напряжения много больше

времени жизни неосновных носителей для диода с толстой базой или времени пролета для диода с тонкой базой, переходные процессы, связанные с установлением распределения концентрации неосновных носителей в базе (рекомбинация или пролет базы), успевают установиться для каждого момента времени изменения синусоидального напряжения. При этом ток протекает только в положительном полупериоде напряжения (к моменту смены знака напряжения неосновные носители, введённые в положительный период, успевают рекомбинировать или пролететь базу). На повышенной частоте, когда период напряжения соизмерим с временем жизни или временем пролёта, часть введённых в базу носителей к моменту смены знака напряжения на диоде не успевает рекомбинировать или пролететь базу. Это приводит к тому, что часть этих носителей во время отрицательного полупериода напряжения увлекается назад через р-п-переход, создавая всплеск обратного тока, который спадает по мере их ухода из базы. В результате средний выпрямленный ток диода уменьшается, так как из прямого тока вычитается обратный, а усреднение за период даёт уменьшение выпрямленного тока. На очень высоких частотах, когда период напряжения много меньше времени жизни неосновных носителей или времени пролёта, введённые в базу носители в положительный полупериод полностью выводятся назад в отрицательный, и диод теряет выпрямительные свойства. Перезаряд барьерной ёмкости через сопротивление нагрузки дополнительно сужает частотный диапазон выпрямленных токов. Таким образом, частотная характеристика выпрямления имеет спадающий с ростом частоты вид. Обычные выпрямительные диоды работают до частот в несколько кГц. Выпрямительные диоды с тонкой базой и диоды на основе перехода металл-полупроводник работают до частот в несколько сот кГц.

3. Задание и методика выполнения

3.1. Собрать схему по рис. 5. Снять вольт-амперные характеристики германиевого диода типа Д7А - Д7Ж при комнатной и повышенной (40 °С) температурах. Для снятия прямого участка вольт-амперной характеристики удобно установить значения тока в соответствии с рядом 0,1; 0,2; 0,5; 1 мА и т.д.

3.2. Снять вольт-амперную характеристику кремниевого диода типа Д226 при комнатной

температуре.

3.3. Собрать схему по рис. 6, снять зависимость выпрямленного тока от частоты, зарисовать осциллограммы напряжения на нагрузке. Напряжение на выходе генератора - 5 В.

3.4. Собрать схему по рис. 7, снять зависимость барьерной ёмкости диода от обратного напряжения.

Измерение барьерной ёмкости диода в настоящей работе осуществляется по величине ёмкостного тока в последовательной цепи, содержащей низкочастотный генератор, источник обратного смещения, диод и измерительный резистор. Если на выходе генератора поддерживать напряжение 1 В на частоте 160 кГц, то падение напряжения (в мВ) на измерительном резисторе будет численно равно ёмкости конденсатора (в пФ). Постоянное обратное смещение на диоде должно быть не менее 1,5 В, иначе в цепи может появиться прямой ток.

Диоды, исследуемые в лабораторной работе, в соответствии с их конструктивно-технологическими данными имеют пробивные напряжения от 400 до 900 В. Как следствие, они имеют достаточно широкий р-п- переход и небольшую барьерную ёмкость. В связи с этим при сборке схемы по рис.7 необходимо стремиться к уменьшению монтажной ёмкости. Для этого необходимо собирать схему с использованием коротких проводников, некоторые соединения выполнять без проводников. Используемый диод можно с помощью однополюсной вилки включить непосредственно в гнездо генератора, второй вывод диода - к свободной клемме на монтажном столе, далее присоединить измерительный резистор и т.д.

4. Обработка результатов измерений

4.1. Построить вольт-амперные характеристики германиевого и кремниевого диодов на одном рисунке в удобном (линейном) масштабе.

4.2. По вольт-амперным характеристикам определить сопротивление базы диода.

4.3. Построить график зависимости выпрямленного тока от частоты.

4.4. Зарисовать осциллограммы тока через диод на низкой и высокой частоте.

4.5. Построить график зависимости барьерной ёмкости от обратного напряжения.

5. Контрольные вопросы

5.1. Почему возникает разность потенциалов в месте контакта двух полупроводников с различным типом проводимости и от чего зависит её величина?

5.2. Изобразите энергетические диаграммы p-n-перехода при его включении в прямом и обратном направлениях?

5.3. Как распределяются плотность объёмного заряда и напряжённость электрического

поля в плоском резком p-n-переходе?

5.4. Какова природа обратного тока диода?

5.5. Почему температура окружающей среды влияет на вольт-амперную характеристику полупроводникового диода?

5.6. Как зависит ширина области пространственного заряда в диоде от величины и полярности приложенного напряжения?

5.7. Что такое барьерная ёмкость p-n-перехода и как она зависит от величины приложенного напряжения? Как она влияет на частотные свойства диода?

5.8. Каковы физические механизмы пробоя p-n-перехода?

5.9. С какой целью применяется последовательное включение полупроводниковых диодов?

5.10. Почему с помощью полупроводниковых диодов можно выпрямлять переменный ток?

5.11. Чем объяснить отличия в ходе вольт-амперных характеристик германиевых и кремниевых диодов?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ В СХЕМЕ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

1. Цель работы

Снять статические вольт-амперные характеристики сплавного транзистора типа П215, исследовать частотные свойства, определить некоторые параметры и их зависимость от режима работы.

2. Теоретическая часть

Биполярный транзистор - это полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими р-п-переходами. Взаимодействие переходов состоит в том, что ток одного перехода

(обычно эмиттерного) управляет током другого перехода (обычно коллекторного). Взаимодействие обеспечивается тем, что ширина базы транзистора делается много меньшей диффузионной длины инжектируемых в неё носителей тока. Поэтому носители, инжектированные в базу из эмиттерного перехода, почти без потерь на рекомбинацию достигают коллекторного перехода, определяя его ток. Транзистор может работать в активном режиме (эмиттерный переход смещен в прямом, а коллекторный - в обратном направлении), режиме насыщения (оба перехода смещены в прямом направлении), отсечки (оба перехода смещены в обратном направлении) и в инверсном режиме (эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный - в прямом).

Транзистор может выполнять функцию ключа в цифровых и аналоговых схемах и функцию активного элемента аналоговых усилительных схем. Транзисторный ключ находится в открытом состоянии, когда в цепи эмиттер-коллектор протекает ток, а напряжение между коллектором и эмиттером составляет доли вольта. Обычно это состояние соответствует режиму насыщения. В закрытом состоянии ток в цепи эмиттер-коллектор не протекает и к коллекторному переходу приложено напряжение источника питания.

Усилительные свойства транзистора объясняются тем, что в активном режиме к коллекторному переходу можно приложить обратное напряжение намного большее по абсолютной величине, чем к эмиттерному переходу, при практически одинаковом токе эмиттерного и коллекторного переходов. Это означает, что в коллекторной цепи можно установить источник намного большей мощности, чем в эмиттерной, которая является управляющей. Таким образом, с помощью транзистора можно управлять током источника большей мощности, чем мощность источника управления, что характерно для процесса усиления.

Существует три схемы включения транзистора в усилительное устройство. Включение производят по схемам с общей базой, с общим эмиттером и с общим коллектором. Общим называется электрод транзистора, относительно которого измеряются входные и выходные по отношению к транзистору переменные напряжения. В схеме с общей базой таким электродом является база. Включение транзистора по схеме с общей базой приведено на рис. 1.

Входная статическая характеристика транзистора в схеме с общей базой (рис. 2, а) представляет собой зависимость тока эмиттера I_e от напряжения эмиттер-база $U_{эб}$ при постоянном напряжении на коллекторе U

кб
 . Ход её такой же, как и у диода на прямой ветви, однако есть отличие, которое определяется действием коллекторного напряжения. На рис. 2, а приведены входные характеристики р-п-р транзистора при напряжении коллектор-база, равном нулю, и напряжении коллектор-база, меньшем нуля. Различие в характеристиках можно объяснить следующим образом. Концентрация инжектированных дырок у эмиттерного конца базы

P

n
 (0)

описывается следующим выражением:

$$, \quad (1)$$

где P_{n0} – концентрация неосновных носителей в базе, e – заряд электрона, $U_{эб}$ – напряжение между эмиттером и базой,

k

– постоянная Больцмана,

T

– температура кристалла. Концентрация дырок у коллекторного конца базы

P

n
 (W)

описывается следующим выражением:

$$, \quad (2)$$

где $U_{кб}$ – напряжение между коллектором и базой. Дырочная компонента тока эмиттера

I

э
р
, практически равная току эмиттера, определяется следующим выражением:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{р}} \left(1 - \frac{D_p}{L_p} \frac{W}{L_p} \right) \quad (3)$$

где D_p – коэффициент диффузии дырок в базе, S – площадь эмиттерного р-п-перехода, а значение производной берётся при $x=0$ (рис. 2, б). При приложении обратного напряжения к коллекторному переходу концентрация дырок

p
 n
(
 W)
становится меньше, чем

p
 0
, и область ОПЗ, расширяясь, уменьшает размер базы. Это приводит к увеличению градиента концентрации дырок у коллекторного и эмиттерного переходов и, следовательно, к увеличению тока эмиттера с ростом коллекторного напряжения.

Выходная статическая характеристика транзистора в схеме с общей базой (рис. 3, а) представляет собой зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-база при постоянном токе эмиттера. Характеристика имеет два характерных участка. Практически параллельный оси абсцисс участок, соответствующий активному режиму, и падающий участок, соответствующий режиму насыщения. Граница участков соответствует напряжению коллектор-база, равному нулю. На рис. 3, б представлено распределение концентрации инжектированных в базу дырок в активной части базы, с помощью которого можно объяснить ход части характеристики, соответствующей активному режиму. При напряжении коллектор-база, равном нулю, распределение концентрации дырок в базе соответствует прямой 1. При приложении обратного смещения к коллекторному переходу за счет уменьшения концентрации дырок у коллекторного конца базы и уменьшения размера базы за счет расширения ОПЗ увеличивается градиент концентрации дырок (прямая 2). Это приводит к увеличению тока коллектора, который пропорционален этому градиенту. Одновременно по этой же причине увеличивается ток эмиттера. Однако характеристика снимается при постоянном токе эмиттера. Поэтому необходимо уменьшить ток эмиттера до прежней величины. Это делается путем уменьшения напряжения эмиттер-база, что приводит к уменьшению концентрации дырок у эмиттерного конца базы и снижению градиента концентрации

дырок. Ток коллектора восстанавливается почти до прежней величины. Реально все же происходит незначительное увеличение тока коллектора за счет уменьшения тока рекомбинации в базе, т.к. уменьшается инжектированный в базу заряд, пропорциональный площади под прямой 3, рис. 3, б. Поскольку ток рекомбинации намного меньше тока коллектора, то увеличение тока коллектора практически незаметно.

Ток коллектора в активном режиме определяется током эмиттера. При изменении температуры ток эмиттера изменяется по такому же закону, как ток в диоде на прямой ветви. Поскольку ток эмиттера необходимо по условию снятия выходной характеристики поддерживать постоянным, то и ток коллектора будет оставаться почти постоянным. Незначительное увеличение его с ростом температуры определяется уменьшением тока рекомбинации, т.к. время жизни носителей в базе растет с увеличением температуры, и они в несколько большем количестве доходят до коллекторного перехода.

В режиме насыщения ток коллектора убывает с ростом прямого напряжения на коллекторном переходе. Поскольку ток эмиттера поддерживается постоянным за счет повышения прямого напряжения на эмиттерном переходе, то объяснить уменьшение тока коллектора с помощью возникающего при этом распределения концентрации дырок в активной части базы, расположенной под эмиттерным переходом (рис. 4, а), нельзя. Действительно, прямое смещение на коллекторном переходе приводит к увеличению размера базы и повышению концентрации дырок у коллекторного конца базы, по сравнению со случаем, когда напряжение коллектор-база равно нулю. Это приводит к уменьшению градиента концентрации дырок (прямая 2, рис. 4, а) по сравнению со случаем, когда напряжение коллектор-база равно нулю (прямая 1, рис. 4, а), что вызывает уменьшение тока коллектора, но одновременно уменьшается ток эмиттера. Для поддержания постоянным тока эмиттера увеличивается напряжение эмиттер-база, что восстанавливает прежнее значение градиента концентрации (прямая 3, рис. 4, а) и, следовательно, составляющей тока коллектора, определяемой экстракцией дырок из активной части базы в коллектор.

Спад тока коллектора объясняется инжекцией дырок в пассивную часть базы и электронов из базы в коллектор. Она создает составляющую тока коллектора, противоположную по направлению той, что обусловлена экстракцией дырок из активной части базы (рис. 4, б). Эта составляющая замыкается через выводы базы и растет экспоненциально с ростом прямого напряжения на коллекторном переходе. В то же время составляющая тока, обусловленная экстракцией дырок из базы, поддерживается практически постоянной за счет постоянства эмиттерного тока. Поэтому с ростом прямого напряжения на коллекторном переходе результирующий ток коллектора уменьшается. Следует отметить, что площадь пассивной части базы в 1,5 – 3 раза

больше площади активной части базы, что также обеспечивает быстрый спад тока коллектора.

Частотная характеристика транзистора в схеме с общей базой представляет собой зависимость дифференциального коэффициента передачи тока эмиттера от частоты тока эмиттера. Характеристика снимается путем подачи в цепь эмиттера переменной составляющей тока эмиттера и измерения переменной составляющей тока коллектора при изменении частоты тока эмиттера. Характеристика снимается в режиме малого сигнала, когда величины переменных токов много меньше величин постоянных токов в тех же цепях. Эта характеристика отражает инерционные свойства транзистора. Более наглядно эти свойства отражает переходная характеристика, которая однозначно связана с частотной характеристикой. В данном случае переходная характеристика - это реакция тока коллектора на скачок тока эмиттера, которая количественно оценивается с помощью постоянной времени переходного процесса t . Постоянная времени складывается из трёх основных составляющих:

$$t = t_{пр} + t_{э} + t_{к}, \quad (4)$$

где $t_{пр}$ – среднее время пролёта дырками базы, $t_{э}$ – постоянная времени перезарядки барьерной ёмкости эмиттерного перехода, t

^к
– постоянная времени перезарядки барьерной ёмкости коллекторного перехода.

Вначале рассмотрим реакцию токов базы и коллектора на скачок тока эмиттера без учета барьерных емкостей (рис. 5, а). Поскольку в схеме с общей базой управляющим параметром является ток эмиттера, то первичным процессом будет введение дырок из эмиттера в базу. Нарушение электронейтральности базы при введении дырок приведет к появлению электрического поля, которое обеспечит ввод из электрода базы такого же количества электронов. В результате электронейтральность базы будет непрерывно восстанавливаться. До тех пор, пока дырки за счет диффузии не достигнут коллекторного перехода, ток эмиттера будет замыкаться через ввод базы. Сколько дырок будет входить в базу из эмиттера, столько же электронов будет вводиться из электрода базы. При этом ток коллектора будет равен нулю. Когда дырки достигнут коллекторного перехода, появится ток коллектора. Поскольку ток эмиттера поддерживается неизменным, то количество дырок в базе не будет изменяться. Вместо экстрагированных в коллекторный переход дырок из эмиттера в базу вводится такое же количество дырок. Поскольку электроны в базе удерживаются в потенциальной яме

(рис. 5, в), то необходимость ввода в базу электронов отпадает и ток базы должен бы упасть до нуля. Однако из-за рекомбинации и инжекции электронов в эмиттер заряд электронов в базе со временем уменьшается, и его необходимо пополнять. Поэтому ток базы уменьшается до уровня, необходимого для восполнения потерь. Если бы время прохождения базы электронами было одинаковым для всех дырок, то ток коллектора увеличился бы скачком. Реально дырки проходят базу за различное время. Поэтому вначале в коллектор попадут "быстрые" дырки и ток коллектора будет плавно увеличиваться, по мере подхода всё более "медленных" дырок, а ток базы плавно уменьшаться. Время, в течение которого приращение тока коллектора увеличится до 0,67 от установившегося значения, соответствует среднему времени пролета базы $t_{пр}$.

Наряду с временем пролёта в постоянную времени нарастания тока коллектора вносят вклад времени заряда барьерных емкостей транзистора. Постоянная времени заряда эмиттерной ёмкости определяется соотношением $t_э = C_э R_э$, где $R_э$ - дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода в рабочей точке. Постоянная времени заряда коллекторной ёмкости определяется соотношением $t_к$

$t_к = C_к$

$(R_к$

$+ R_б$

$+ R_н$

), где $R_к$

- сопротивление тела базы, $R_б$

- сопротивление тела коллектора, $R_н$

- сопротивление нагрузки. Определяющим обычно является сопротивление нагрузки. Наибольший вклад в постоянную времени вносит время заряда коллекторной емкости. Поэтому остальными составляющими обычно пренебрегают.

Используем вместо одиночной ступеньки тока переменную составляющую тока эмиттера в форме меандра (рис. 6). На частоте f_1 , когда длительность полупериода меандра больше постоянной времени t , амплитуда тока коллектора D_I

соответствует установившемуся значению при одиночной ступеньке тока эмиттера. С ростом частоты, когда длительность полупериода меандра становится соизмеримой с

временем t , амплитуда тока коллектора уменьшается, так как он не успевает вырасти до стационарного значения. Поскольку коэффициент передачи тока на малом сигнале a

m равен отношению приращения тока коллектора к приращению тока эмиттера, то очевидно, что с ростом частоты он будет убывать, поскольку приращение тока коллектора уменьшается, а приращение тока эмиттера поддерживается неизменным. Замена формы переменной составляющей тока эмиттера на синусоидальную, принятую при измерении коэффициента передачи, принципиально вид зависимости не изменит. Поэтому при представлении транзистора четырехполюсником коэффициент передачи тока h

216

падает с ростом частоты входного тока.

1. 3. Задание и методика выполнения

3.1. Собрать схему по рис. 7. Снять семейство входных характеристик при напряжениях на коллекторе: 0 В (коллектор соединить с базой), - 5 В.

3.2. Снять семейство выходных характеристик при токах эмиттера: 0 мА (цепь эмиттера разорвать), 50 мА, 100 мА.

3.3. Включить термостат. Снять семейства статических характеристик по пп. 3.1, 3.2 при температуре 40 °С.

3.4. Собрать схему по рис.8. Снять частотную зависимость коэффициента

передачи тока при напряжении на коллекторе - 5 В и токе эмиттера 50 мА. Точность

приборов в лаборатории не достаточно для измерения абсолютного значения коэффициента передачи тока. Поэтому исследуется частотная зависимость относительного коэффициента передачи: $h_{216} = h_{216}(f) / h_{216}(f_0)$. На частоте 1 кГц устанавливается такое напряжение на выходе генератора, при котором переменная составляющая тока коллектора имеет единичное значение (например, 1 мА), и в дальнейшем во всем диапазоне изменения частоты U

$z_{г}$
 $=const$.

3.5. В том же режиме снять зависимость входного сопротивления от частоты. С этой целью милливольтметр переменного тока подключить между базой и эмиттером, на выходе генератора установить напряжение 5 В и снять зависимость входного напряжения от частоты.

4. Обработка результатов измерений

Входное сопротивление транзистора определяется по отношению переменной составляющей входного напряжения (в мВ) к переменному току в цепи эмиттера (в мА). Так как в измерительном режиме переменный ток в цепи эмиттера равен 1 мА, входное сопротивление численно равно входному напряжению в мВ.

5. Контрольные вопросы

5.1. Чем обусловлены усилительные свойства транзисторов?

5.2. Что характеризуют интегральный и дифференциальный коэффициенты передачи тока эмиттера? В каких случаях используется каждый из них?

5.3. Почему напряжение коллектор-база влияет на входную характеристику транзистора в схеме с общей базой?

5.4. Объясните выходную характеристику транзистора в схеме с общей базой. Почему она слабо зависит от температуры?

5.5. Зачем нужны статические характеристики транзистора?

5.6. Какие факторы определяют частотные свойства транзисторов в схеме с общей базой? Назовите основной фактор.

5.7. Какая из структур биполярного транзистора - р-п-р или п-р-п при одинаковой конструкции прибора обеспечит его более высокое быстродействие?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

1. Цель работы

Исследовать вольт-амперные и частотные характеристики транзистора, определить его параметры.

2. Теоретическая часть

В схеме с общим эмиттером общим электродом, относительно которого измеряются входные и выходные переменные напряжения, является эмиттер. Включение транзистора по схеме с общим эмиттером приведено на рис. 1.

Входная статическая характеристика р-п-р транзистора в схеме с общим эмиттером (рис. 2, а) представляет собой зависимость тока базы I_b от напряжения база-эмиттер $U_{бэ}$ при постоянном напряжении между коллектором и эмиттером U

кэ
. Ход её такой же, как и у диода на прямой ветви. При напряжении между коллектором и

эмиттером, равно нулю, и отрицательном напряжении на базе оба перехода транзистора смещены в прямом направлении. Транзистор находится в режиме насыщения, и через вывод базы течет ток двух прямо смещённых переходов. При увеличении отрицательного напряжения между коллектором и эмиттером, когда это напряжение станет равным напряжению между базой и эмиттером, напряжение на коллекторном переходе станет равным нулю. Это приведет к резкому уменьшению тока базы, поскольку прекратится инжекция носителей тока в базу через коллекторный переход. Дальнейшее увеличение напряжения смещает коллекторный переход в обратном направлении, и незначительное уменьшение тока базы происходит за счет уменьшения толщины базы при увеличении коллекторной ОПЗ (эффект Эрли). Уменьшение толщины базы приводит к уменьшению инжектированного в базу заряда (его величина пропорциональна площади прямоугольного треугольника, образованного линией распределения концентрации дырок в базе, пунктирной линией и осью ординат на рис. 2, б) по сравнению со случаем, когда напряжение между коллектором и базой равно нулю. Это ведет к уменьшению тока рекомбинации, являющегося компонентом тока базы.

С ростом температуры увеличивается время жизни носителей в базе, что приводит к уменьшению тока рекомбинации, а следовательно, и уменьшению тока базы. Ток базы также уменьшается за счёт увеличения обратного тока перехода коллектор-база (этот ток имеет противоположное направление к другим компонентам тока базы). Но одновременно увеличивается инжекция через эмиттерный переход, что увеличивает ток базы. Поэтому входные характеристики при различных температурах пересекаются, но в основной части характеристики с ростом температуры ток базы увеличивается. Выходная характеристика в схеме с общим эмиттером (рис. 3,а) - это зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при постоянном токе базы. Крутой участок характеристики соответствует режиму насыщения ($\frac{1}{2}U_{кэ} < \frac{1}{2}U_{бэ} < \frac{1}{2}U$), а более пологий - активному режиму ($\frac{1}{2}U$

кэ
 $\frac{1}{2} > \frac{1}{2}U$

бэ
 $\frac{1}{2}$). Рост тока на участке, соответствующем активному режиму, может быть объяснен с помощью графика распределения концентрации дырок в активной части базы (рис. 3, б). При U

кэ
 $= U$

бэ
, т.е. когда напряжение коллектор-база равно нулю (начало участка активного режима), распределение концентрации дырок соответствует прямой 1. При увеличении напряжения U

кэ
за счет расширения коллекторной ОПЗ и уменьшения концентрации дырок у коллекторного конца базы распределение будет соответствовать прямой 2. При этом градиент концентрации дырок и, следовательно, ток коллектора увеличиваются.

Заштрихованная площадь под этой прямой пропорциональна инжектированному заряду и, следовательно, току рекомбинации, который является частью базового тока. Из рисунка видно, что площадь под прямой 1 больше, чем под прямой 2. Следовательно, ток базы с ростом U

^{кэ} будет уменьшаться. Поскольку выходная характеристика снимается при постоянном токе базы, то для восстановления тока базы до прежней величины увеличивается напряжение на эмиттерном переходе до величины, восстанавливающей площадь под прямой 3 до прежнего значения. Это приводит к увеличению градиента концентрации дырок у коллекторного перехода и, следовательно, к дополнительному увеличению тока коллектора. Таким образом, в отличие от схемы с общей базой в схеме с общим эмиттером в активном режиме с ростом напряжения U

^{кэ} происходит более заметный рост тока коллектора.

В режиме насыщения коллекторный переход смещен в прямом направлении. Поэтому ОПЗ коллекторного перехода уменьшается, а концентрация дырок у коллекторного конца базы увеличивается по сравнению со случаем нулевого напряжения на коллекторном переходе. Это приводит к увеличению площади под прямой распределения концентрации дырок в базе. Следовательно, увеличиваются инжектированный в базу заряд и ток рекомбинации, а поэтому и ток базы. Одновременно уменьшается градиент концентрации дырок в базе, что приводит к уменьшению коллекторного тока. Поскольку ток базы следует поддерживать неизменным, уменьшают напряжение между базой и эмиттером. Это приводит к дополнительному снижению тока коллектора. Инжекция через коллекторный переход в пассивной части базы дополнительно увеличивает ток базы в режиме насыщения. Это требует резкого снижения напряжения $U_{бэ}$ и, следовательно, градиента концентрации в активной части базы, что приводит к уменьшению тока коллектора. Следует добавить, что составляющая тока коллектора, текущая в пассивную часть базы, имеет направление, противоположное току, текущему в коллектор из активной части базы, что также уменьшает результирующий ток коллектора. В результате действия всех перечисленных причин в режиме насыщения коллекторный ток резко падает при уменьшении по модулю напряжения между коллектором и эмиттером.

Частотная характеристика транзистора в схеме с общим эмиттером представляет собой зависимость дифференциального коэффициента передачи тока базы от его частоты. Характеристика снимается путем подачи в цепь базы переменной составляющей тока базы с постоянной амплитудой и измерения переменной составляющей тока коллектора при изменении частоты тока базы. Характеристика снимается в режиме малого сигнала, когда величины переменных токов много меньше величин постоянных токов в тех же цепях. Эта характеристика отражает инерционные свойства транзистора. Более наглядно эти свойства отражает переходная характеристика, которая однозначно

связана с частотной характеристикой. В данном случае переходная характеристика это реакция тока коллектора на скачок тока базы, которая количественно оценивается с помощью постоянной времени переходного процесса t . Постоянная времени складывается из трёх основных составляющих:

$$t = t_n + t_{\text{э}}^* + t_{\text{к}}^* , \quad (1)$$

где t_n - время жизни электронов в базе, $t_{\text{э}}^*$ - постоянная времени перезарядки барьерной ёмкости эмиттерного перехода в схеме с общим эмиттером, $t_{\text{к}}^*$

$t_{\text{к}}^*$ - постоянная времени перезарядки барьерной ёмкости коллекторного перехода в схеме с общим эмиттером.

Вначале рассмотрим реакцию токов эмиттера и коллектора на скачок тока базы без учета барьерных емкостей (рис. 4, а). Поскольку в схеме с общим эмиттером управляющим параметром является ток базы, то первичным процессом будет введение электронов в базу из электрода базы. Нарушение электронейтральности базы при введении электронов приведет к появлению электрического поля, которое обеспечит ввод из эмиттера такого же количества дырок. В результате электронейтральность базы будет непрерывно восстанавливаться. До тех пор, пока дырки за счет диффузии не дойдут до коллекторного перехода, ток эмиттера будет замыкаться через ввод базы. Когда дырки дойдут до коллекторного перехода, появится ток коллектора. Эта задержка и среднее время пролета для современных транзисторов пренебрежимо малы по сравнению с инерционностью основного процесса в схеме с общим эмиттером. Поскольку ток базы поддерживается постоянным, то количество дырок, инжектируемых из эмиттера в базу, непрерывно увеличивается. Это происходит потому, что электроны накапливаются в потенциальной яме (рис. 4, в). Если бы отсутствовали механизмы потерь электронов в базе, то заряд электронов в базе линейно увеличивался во времени, что вызывало бы линейный рост токов эмиттера и коллектора (наклонные пунктирные линии на рис. 4, а). Однако по мере накопления электронов в базе растет скорость рекомбинации (она пропорциональна произведению концентраций электронов и дырок) и увеличивается их инжекция из базы в эмиттер. Рост скорости ухода электронов по мере увеличения накопленного заряда приводит к тому, что все большая часть вводимых в базу электронов идет на восполнение потерь и меньшая на накопление. Поэтому скорость роста токов эмиттера и коллектора уменьшается. При некотором накопленном заряде скорости поступления и ухода электронов становятся равными. Это означает, что эмиттерный и коллекторный токи перестают изменяться. Время, в течение которого приращение тока коллектора увеличится до 0,67 установившегося значения, соответствует среднему времени жизни электрона в базе t_n .

Наряду с временем жизни в постоянную времени нарастания тока коллектора вносят вклад времена заряда барьерных емкостей транзистора. Постоянная времени заряда эмиттерной ёмкости определяется соотношением $t_{\text{э}}^* = C_{\text{э}} r_{\text{э}}$, где $r_{\text{э}}$ - дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода в рабочей точке. Дифференциальное сопротивление в схеме с общим эмиттером примерно в b

m
раз больше, чем в схеме с общей базой, где b

m
- дифференциальный коэффициент передачи тока базы (для мощных транзисторов он имеет величину порядка 10, а для транзисторов малой мощности порядка 50).

Постоянная времени заряда коллекторной ёмкости определяется соотношением $t_{\text{к}}^*$

k
 $= b$

m
 C

k
 $(R$

b
 $+ R$

k
 $+ + R$

n
) , где R

b
- сопротивление тела базы, R

k
- сопротивление тела коллектора, R

n
- сопротивление нагрузки. Увеличение примерно в b

m
раз постоянной времени заряда барьерной емкости коллекторного перехода объясняется тем, что в цепи базы включен источник переменного тока с большим внутренним сопротивлением. Поэтому заряд емкости происходит через эмиттерный переход. Это вызывает протекание тока коллектора в b

m
раз большего, чем ток заряда. Ввиду того, что ток от источника питания коллектора ограничен сопротивлением нагрузки, то большая часть тока идет в цепь коллектора транзистора и меньшая на заряд емкости. В схеме с общей базой в цепи эмиттера стоит источник переменного тока с большим внутренним сопротивлением, что исключает заряд емкости через эмиттерный переход. Поэтому в схеме с общей базой весь ток идет на

заряд емкости. Наибольшим сопротивлением, через которое происходит заряд коллекторной ёмкости, является сопротивление нагрузки. Наибольший вклад в постоянную времени вносит время заряда коллекторной емкости. Поэтому остальными составляющими обычно пренебрегают.

Используем вместо одиночной ступеньки тока переменную составляющую тока базы в форме меандра (рис. 5). На частоте f_1 , когда длительность полупериода меандра больше среднего времени пролета, амплитуда тока коллектора D_I

к

f_1

соответствует установившемуся значению при одиночной ступеньке тока базы. С ростом частоты, когда длительность полупериода меандра становится соизмеримой с постоянной времени переходного процесса t , амплитуда тока коллектора уменьшается, поскольку переходный процесс не успевает завершиться. Поскольку коэффициент передачи тока на малом сигнале b

м

равен отношению приращения тока коллектора к приращению тока базы, то с ростом частоты он будет убывать, поскольку приращение тока коллектора уменьшается, а приращение тока базы остается неизменным. Замена формы переменной составляющей тока эмиттера на синусоидальную, принятую при измерении коэффициента передачи, принципиально вид зависимости не изменит. Поэтому при представлении транзистора четырехполюсником коэффициент передачи тока h

21э

падает с ростом частоты входного тока. Поскольку в схеме с общим эмиттером постоянная времени переходного процесса примерно в b

м

раз больше, чем в схеме с общей базой, то предельная частота будет в b

м

раз меньше.

3. Задание и методика выполнения

3.1. Собрать схему, приведенную на рис. 6.

3.2. Снять семейство входных характеристик при напряжениях на коллекторе: 0 В (коллектор замкнуть с эмиттером), - 0,5 В, - 5 В.

3.3. Снять семейство выходных характеристик при токах базы: 0 мА (цепь базы разорвать), 0,5 мА, 1 мА.

3.4 Повторить выполнение пп. 3.2, 3.3 при температуре 40 °С.

3.5. Собрать схему, приведенную на рис. 7.

Схема с ОЭ позволяет измерить абсолютное значение коэффициента усиления тока $h_{21э}$

$h_{21э}$
. Если на выходе генератора установить напряжение 0,5 В, входной ток будет равен 0,1 мА. В результате усиления в цепи коллектора будет протекать переменная составляющая тока 0,1 А

$h_{21э}$
а на измерительном резисторе 10 Ом выделится напряжение, равное $h_{21э}$

$h_{21э}$
(мВ).

3.6. Снять зависимость коэффициента усиления от частоты при токе коллектора 50 мА, $U_k = -5$ В.

3.7. Присоединить вольтметр переменного тока ВЗ-38 к входным электродам транзистора и снять зависимость входного напряжения от частоты в том же режиме.

4.Обработка результатов измерений

Методика эксперимента исключает необходимость расчёта коэффициента усиления. Входное сопротивление определяется десятикратным увеличением показаний вольтметра ВЗ-38, полученных при выполнении п.3.7.

4. Контрольные вопросы

5.1. В чём заключаются основные отличия входных и выходных характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером от аналогичных характеристик в схеме с общей базой? Чем это обусловлено?

5.2. Как объяснить зависимость интегрального коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером от температуры?

5.3. Объясните зависимость интегрального коэффициента передачи тока базы от тока коллектора.

5.4. Какие факторы определяют частотные свойства транзисторов в схеме с общим эмиттером? Назовите основной фактор.

5.5. Почему в схеме с общим эмиттером предельная частота ниже, чем в схеме с общей базой? Можно ли использовать транзистор в схеме с общим эмиттером на частотах выше предельной?

5.6. Чем определяются допустимые режимы работы транзистора?

5.7. Назовите достоинства и недостатки работы транзисторного ключа в режиме насыщения.

5.8. Почему величина сопротивления резистора, включенного между базой и эмиттером, влияет на напряжение пробоя транзистора?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВЫХ

ТРАНЗИСТОРОВ

1. Цель работы

Исследовать вольт-амперные характеристики и параметры полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом в диапазоне рабочих температур.

2. Теоретическая часть

Полевой транзистор - это полупроводниковый прибор, в котором управление потоком носителей в проводящем канале осуществляется электрическим полем. В полевом транзисторе с управляющим р-п-переходом управление потоком носителей происходит

за счет изменения размеров канала с помощью р-п-перехода, смещенного в обратном направлении. Обычно подложка электрически соединяется с затвором, и р-п-переход подложка-канал действует как дополнительный затвор (рис. 1, б, в). При подаче на р-п-переход затвор-канал обратного смещения ОПЗ, расположенная в канале, увеличивается, уменьшая ширину канала. Уменьшение ширины канала приводит к увеличению его сопротивления, что в свою очередь уменьшает ток между стоком и истоком. Поскольку управляющий р-п-переход смещен в обратном направлении вследствие малого обратного тока, мощность, идущая на управление потоком носителей в канале, много меньше мощности источника, включенного между стоком и истоком. Поэтому полевой транзистор используют как активный элемент в усилительных схемах. В усилительных схемах полевой транзистор может быть включен по схемам с общим затвором, общим стоком и общим истоком. В данной работе исследуются статические характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком. Поскольку полевой транзистор является прибором, управляемым напряжением, то для его применения представляют интерес сток-затворная и выходная характеристики.

Выходная характеристика (рис.1, а) - это зависимость тока стока I_c от напряжения сток-исток $U_{си}$ при постоянном напряжении на затворе $U_{зи}$

$U_{зи}$
 . Крутой участок характеристики является сублинейным, т.е. ток стока растет медленнее напряжения $U_{си}$

$U_{си}$
 . Это объясняется тем, что напряжение $U_{зи}$

$U_{зи}$
 влияет на форму канала. Это напряжение распределяется по длине канала, поскольку канал обладает сопротивлением и по нему течет ток. Поэтому обратное смещение, следовательно, и ОПЗ увеличиваются по направлению от истока к стоку (заштрихованные области на рис. 1, б), а ширина канала уменьшается. При этом увеличивается сопротивление канала. Поскольку с ростом $U_{си}$

$U_{си}$
 ширина ОПЗ увеличивается пропорционально , то сопротивление канала увеличивается в меньшей степени, чем напряжение сток-исток. Этим объясняется рост тока на крутом участке характеристики.

При некотором напряжении на стоке $U_{си.нас}$, зависящем от напряжения $U_{зи}$, ОПЗ, расширяющиеся от затвора и подложки, смыкаются (рис. 1, в). Поскольку потенциальная энергия носителей у края ОПЗ, примыкающего к каналу, выше чем у края ОПЗ, примыкающего к стоку, то носители беспрепятственно будут проходить через ОПЗ, аналогично тому, как носители проходят через ОПЗ коллекторного перехода биполярного транзистора. Поскольку ОПЗ обеднена собственными носителями заряда, она имеет намного большее сопротивление, чем оставшаяся часть канала. Поэтому при

дальнейшем увеличении U

си

почти все напряжение будет падать на ОПЗ. Поскольку здесь практически нет собственных носителей тока, то это не будет приводить к увеличению тока. Носители поступают из оставшейся части канала. Поэтому напряжение на оставшейся части канала и её сопротивление будут определять ток стока. Увеличение тока на пологой части характеристики объясняется уменьшением длины оставшейся части канала за счёт расширения ОПЗ. При увеличении напряжения затвор-исток происходит уменьшение напряжения U

си-нас

на длине канала, которое обеспечивает протекание тока, и уменьшение поперечных размеров оставшейся части канала, что увеличивает его сопротивление. Это приводит к уменьшению тока стока, поэтому характеристика при большем U

зи

идёт ниже (рис.1, а).

С ростом температуры уменьшается контактная разность потенциалов, поэтому уменьшается размер ОПЗ, что приводит к увеличению канала и, следовательно, к увеличению тока стока. Но одновременно снижается подвижность носителей в канале, что приводит к уменьшению тока. По мере увеличения напряжения на затворе объём канала уменьшается. Поэтому относительный вклад в изменение тока за счёт контактной разности потенциалов растёт с увеличением $U_{зи}$ (изменение объёма канала составляет всё большую часть от объёма канала). В то же время относительный вклад в изменение тока от температуры за счёт подвижности остаётся неизменным, так как подвижность изменяется во всём объёме канала. Влияние изменения контактной разности потенциалов превалирует при напряжениях на затворе, близких к напряжению отсечки $U_{зи.отс}$ (при малых токах стока). На большей части характеристик семейства ток уменьшается за счёт снижения подвижности с ростом температуры.

Сток-затворная характеристика (рис. 2) - это зависимость тока стока от напряжения затвор-исток при постоянном напряжении на стоке. Для большинства применений используются пологие части выходных характеристик. Поэтому сток-затворная характеристика обычно снимается при $U_{си}$, большем $U_{си.нас}$. Рабочая область изменения напряжения на затворе проходит от нуля до напряжения отсечки $U_{зи.отс}$

зи.отс

, при котором ток стока снижается до 10 мкА. При увеличении напряжения на затворе ток стока уменьшается примерно по квадратичному закону (транзистор нормально открыт). Уменьшение тока определяется уменьшением напряжения на оставшейся части канала U

си.нас

, под действием которого протекает ток, и уменьшением поперечных размеров канала,

что ведёт к увеличению его сопротивления. Влияние температуры на ток стока, описанное выше, приводит к тому, что сток-затворные характеристики, снятые при разных температурах, пересекаются в термостабильной точке (рис. 2). На практике используется часть характеристики, на которой ток уменьшается с ростом температуры.

Для характеристики усилительных свойств полевого транзистора как прибора, управляемого напряжением, используется дифференциальный параметр - крутизна сток-затворной характеристики S . Она представляет собой отношение изменения тока стока к изменению напряжения на затворе при коротком замыкании по переменному току на выходе транзистора и при постоянном напряжении $U_{си}$ в схеме с общим истоком. В соответствии с законом изменения сток-затворной характеристики крутизна уменьшается при увеличении напряжения на затворе. Частотная характеристика полевого транзистора представляет собой зависимость крутизны от частоты напряжения на затворе. Частотная характеристика определяется процессами заряда и разряда барьерной ёмкости р-п-перехода затвора и пролёта носителей в канале. Основным процессом является перезарядка барьерных ёмкостей. Ёмкость затвор-исток ($C_{зи} + C_{пи}$) перезаряжается через сопротивление канала r_k

, объёмное сопротивление кристалла в области истока $r_{и}$

и внутреннее сопротивление источника переменного напряжения. Ёмкость затвор-сток ($C_{зс} + C_{пс}$)

перезаряжается через объёмное сопротивление кристалла в области стока $r_{с}$

и внешнее сопротивление нагрузки $r_{н}$

(рис. 3). На низких частотах сопротивление ёмкости ($C_{зи} + C_{пи}$)

намного больше сопротивления ($r_k + r_{и}$)

. Поэтому практически всё входное напряжение приложено к ёмкости. Это переменное напряжение модулирует размер ОПЗ и, следовательно, ток в канале. Т.е. на низких частотах всё входное напряжение используется для управления током стока. С ростом частоты сопротивление ёмкости снижается, и всё большая часть входного напряжения падает на сопротивлении. Уменьшение напряжения на ёмкости означает, что уменьшаются модуляция размера ОПЗ и, следовательно, амплитуда тока стока. Теперь

только часть входного напряжения используется для управления током стока. Поэтому с ростом частоты крутизна уменьшается. Через ёмкость (С

ωC
+С

ωC) создаётся частотно-зависимая обратная связь (часть усиленного напряжения в противофазии подается на затвор, причём эта часть растёт при увеличении частоты). Это также приводит к снижению крутизны с ростом частоты. Для уменьшения влияния этой ёмкости необходимо уменьшать глубину залегания управляющего р-п-перехода, которая для приваривания ввода должна быть более 50 нм. Это ограничивает предельную частоту транзистора с управляющим р-п-переходом величиной в несколько сот мегагерц. Для повышения предельной частоты используют вместо р-п-перехода управляющий переход металл-полупроводник. Это позволяет резко снизить ёмкость между стоком и затвором, так как толщина плёнки металла может быть намного меньшей, чем глубина залегания р-п-перехода. Замена кремния арсенидом галлия, который имеет примерно в три раза большую подвижность носителей в канале, позволяет увеличить предельную частоту до 30 ГГц.

По сравнению с биполярными транзисторами полевые имеют следующие преимущества. Они обладают высоким (более 10^8 Ом в сравнении с десятками Ом в биполярном) входным сопротивлением на низких частотах (когда влияние емкостей несущественно), обусловленным тем, что управляющий р-п-переход в рабочем режиме всегда смещён в обратном направлении. Это обеспечивает малую мощность для управления транзистором на низких частотах. Полевые транзисторы используют для переноса тока подвижные носители тока одного знака. Это дает следующие преимущества полевому транзистору по сравнению с биполярным. Во-первых, исключаются явления накопления и рассасывания заряда. Во-вторых, снижается уровень собственных шумов, так как отсутствуют шумы, связанные с генерацией и рекомбинацией носителей. В-третьих, параметры полевых транзисторов менее чувствительны к температуре, так как параметры биполярных транзисторов определяются неосновными носителями, концентрация и время жизни которых зависят от температуры.

Полевые транзисторы уступают биполярным в величине крутизны (требуют большего напряжения для управления), имеют большее сопротивление в открытом состоянии, менее устойчивы к перенапряжениям (пробой между затвором и стоком, затвором и истоком).

3. Задание и методика выполнения

3.1. Собрать схему (рис. 4) для исследования полевого транзистора с р-каналом.

3.2. Снять семейство выходных статических характеристик $I_c = f(U_{cu})$ для 4-х значений напряжения U

эи.

3.3. Снять сток-затворную (переходную) характеристику при постоянном напряжении на стоке, равном -10 В.

3.4. Включить генератор низкой частоты и милливольтметр переменного тока. Снять зависимость крутизны сток-затворной характеристики от напряжения на затворе при U_c

$U_g = -10$ В; U

$U_g = 0,1$ В.

3.5. Снять сток-затворную характеристику при повышенной температуре. Повышение температуры исследуемого транзистора V2 осуществляется путём разогрева транзистора V1, расположенного на одном кристалле с V2. С этой целью на сток транзистора V1 подаётся напряжение -15 В и через транзистор протекает начальный ток стока I_{V1} , измеряемый миллиамперметром PA1. Температура транзистора V2 определяется по формуле: $T = T_{OKP} + (I_{V1} \times U_{V1} \times R_T)$, где T_{OKP} - температура окружающей среды, I

I_{V1} - ток стока транзистора V1, мА, U

U_{V1} - напряжение на транзисторе V1, В, R

$R_T = 0,5$ К/мВт - тепловое сопротивление транзистора V1. Температура транзистора устанавливается, когда перестаёт уменьшаться ток I

I_{V1}

4. Обработка результатов измерений

По экспериментальным данным определить сопротивление открытого канала, температуру кристалла, построить графики экспериментальных зависимостей.

5. Контрольные вопросы

5.1. Объясните выходную и сток-затворную характеристики полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и их изменение с температурой.

5.2. С какой целью используются n^+ -области в конструкции полевого транзистора с управляющим р-п-переходом?

5.3. Почему при смыкании ОПЗ полевой транзистор продолжает проводить ток?

5.4 Чем определяются частотные свойства полевого транзистора?

5.5. Изобразите сток-затворные характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором с каналами р- и n-типа, объясните их ход.

5.6. В чём полевые транзисторы превосходят биполярные и наоборот?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. М.: Высш. шк., 1987.
2. Тугов Н.Н., Глебов Б.А., Чарыков И.А. Полупроводниковые приборы. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т.1,Т2.
4. Батушев В.А. Электронные приборы. М.: Высш. шк. , 1990.
5. Дулин В.Н. и др. Электронные приборы. М.: Энергоатомиздат, 1989.

6. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Н.Д. Фёдорова М. Радио и связь, 1998.