



В. В. Сторожев, Н. А. Феоктистов

СИСТЕМОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН и оборудования

Монография

В. В. Сторожев, Н. А. Феоктистов

**СИСТЕМОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН
И ОБОРУДОВАНИЯ**

Монография

Москва

Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°»

2015

УДК 681.527.7

ББК 621.865.8

С82

Авторы:

В.В. Сторожев — заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор.

Н.А. Феоктистов — заслуженный работник высшей школы РФ,
доктор технических наук, профессор.

Рецензенты:

Б.В. Тарасов — генеральный директор НПЦ «Модуль», доктор
технических наук, профессор;

Б.С. Сункуев — зав. кафедрой машин и аппаратов легкой промышленности, доктор технических наук, профессор Витебского государственного технологического университета (республика Беларусь);

М.С. Еришов — зав. кафедрой теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГТУ нефти и газа им. Губкина, доктор технических наук, профессор.

Сторожев В. В.

Системотехника и мехатроника технологических машин и оборудования: Монография / В. В. Сторожев, Н. А. Феоктистов; под ред. д.т.н., профессора Феоктистова Н. А. — М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2015. — 412 с.

ISBN 978-5-394-02468-9

В монографии рассмотрены основные элементы, узлы и устройства для построения электронных, электромехатронных и мехатронных систем и комплексов технологических машин и оборудования, принципы построения электромехатронных и мехатронных модулей и систем, приведены практические системы автоматизации технологических процессов и производств на их основе.

Для инженерно-технических работников, связанных с разработкой и внедрением электромехатронных, мехатронных и интеллектуальных систем и комплексов, а также аспирантов и студентов технологических и машиностроительных направлений подготовки.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Элементы электронных схем	9
1.1. Полупроводниковые приборы. Принцип работы электронно-дырочного перехода	9
1.2. Биполярные транзисторы	18
1.3. Полевые транзисторы	32
1.4. Операционные усилители	41
1.5. Интегральные микросхемы	51
Глава 2. Логические функции и логические элементы	55
2.1. Основы алгебры логики. Логические функции и способы их записи	55
2.2. Минимизация логических функций	65
2.3. Базовые логические элементы. Схемотехника логических элементов различных логик.	73
2.4. Особенности выходных каскадов цифровых микросхем	88
2.5. Реализация логических функций. Особенности построения логических устройств	90
Глава 3. Сигналы импульсных и цифровых устройств	96
3.1. Общие сведения	96
3.2. Сигналы импульсных устройств	97
3.3. Сигналы цифровых устройств	103
Глава 4. Последовательностные цифровые устройства	106
4.1. Триггеры	107
4.2. Регистры	126
4.3. Счетчики	131
Глава 5. Комбинационные цифровые устройства	139
5.1. Дешифраторы и шифраторы	139
5.2. Мультиплексоры и демультиплексоры	142
5.3. Компараторы	144
5.4. Сумматоры	149
Глава 6. Мехатронные системы в управлении механическим движением и функциями технологических машин	153
6.1. Основы мехатроники и принципы построения мехатронных модулей в системах машин. Мехатроника, основные определения	153
6.2. Структурные особенности различных процессов производства и принципы построения модуля движения элементов машин	161
6.3. Промышленное оборудование для раскроя материалов	163
6.4. Общая структура и особенности функционирования машин швейного и обувного производства	182
6.5. Основные механизмы швейных машин	192

6.6. Швейные машины специального назначения, включая машины с компьютерным управлением	222
Глава 7. Электромехатронные модули и их компоненты	285
7.1. Электромехатронные модули и их связь с мехатронными системами и комплексами.....	285
7.2. Электрические двигатели – энергетические элементы мехатронных систем	290
7.3. Преобразователи электрической энергии – энергетические элементы мехатронных систем.....	302
7.4. Информационно – измерительные элементы мехатронных систем.	340
Глава 8. Мехатронные модули и системы в объектах управления технологическими процессами и производствами	345
8.1. Модернизация системы автоматического управления установки очистки технологического оборудования от налипания сыпучих порошкообразных веществ.	346
8.2. Автоматизация пусковых режимов асинхронных двигателей технологических производств.	353
8.3. Тиристорный регулятор напряжения вентиляторного двигателя.....	357
8.4 Система автоматического управления мотальных машин.	359
8.5. Система автоматического регулирования электрофилтра.	364
8.6. Автоматизация режимов электролизно-водных генераторов водородно-кислородной смеси с применением микропроцессора и микро-ЭВМ.	366
8.7. Тиристорные устройства защиты и управления электродвигателей технологических линий текстильного производства.....	385
8.8. Генератор с транзисторным коммутатором импульсов для электроэрозивной обработки металлических изделий	389
8.9. Ветроэлектронная станция (ВЭС) со стабилизацией параметров электрической энергии.	390
8.10. Автоматизация промышленных швейных машин на базе микропроцессорной техники	393
8.11. Цифровой регулятор температуры для автоматизированного гладильного пресса	397
Литература.....	403

ВВЕДЕНИЕ

Для того чтобы технологическое оборудование могло автоматически работать, необходимо оснащение управляющими и регулирующими устройствами или системами. С развитием электроники и микроэлектроники произошел резкий скачок в процессы создания и внедрения этих систем. Наряду с управлением и регулированием важнейшими задачами технологического процесса являются контроль и анализ технологических операций, регистрация параметров процесса, индикация режимов, в том числе нарушений технологического процесса и аварий и т.д. Для этого возникает необходимость сбора и обработки информации, ввода, передачи и вывода данных, регистрации эксплуатационных параметров. С этой целью возникла реальная возможность внедрения микроконтроллеров (микро-ЭВМ) и управляющих вычислительных машин. Для того, чтобы создавать такие системы необходима современная элементная база на основе достижений электроники и микроэлектроники, электромеханики и информатики. Современная электроника позволяет обеспечить построение электронных систем и комплексов [5,6,14,19,27-29,31,49,65,86,87,89,90], в том числе создание автоматических систем электромеханического преобразования энергии [7,30,32,44,49,53,89,90]. Большие достижения и опыт разработки электронных, электротехнических или электромеханических, и механических систем позволяет перейти на новый уровень разработки систем автоматизированного управления и регулирования технологического оборудования машин и аппаратов с помощью мехатронных модулей систем технологического оборудования [9-11,20,45,46,50,51,52,60,69,72,73,82,83].

В основу построения мехатронной системы заложены идеи взаимосвязи механических, электротехнических, электронных и компьютерных элементов и устройств. Каждая из перечисленных

составляющих обеспечивает вполне самостоятельные функции и они объединяются таким образом, что образуют новую систему, которая получает качественно новые свойства. Наиболее точное определение, известное в научно-технической литературе: «Мехатроника изучает синергетическое объединение узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых модулей, систем, машин и комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциональным движением». Началу этого нового направления в науке и технике положено в работах зарубежных ученых Иссии Х., Шмида Д., Хакса Иришика, Тамра М. и других. Среди отечественных ученых следует отметить работы Подураева Ю.В., Егорова О.Д., Карнаухова Н.Ф., Осипова Ю.М., Смирнова А.Б., Макарова И.М., Лохина В.М., Германа-Галкина С.Г. и других.

Кроме того, в настоящее время существуют актуальные проблемы развития науки и техники, обусловленные необходимостью технологической модернизации российской промышленности, например в технологических комплексах формирования и обработки поверхностей изделий сложной пространственной формы, один из путей которого – создание их на основе мультикоординатных систем движения с интеллектуальным управлением.

Вышеизложенное позволяет отметить, что развитие мехатроники продолжается и в новых прорывных направлениях науки и техники, и в «старых» областях, в которых высокое качество исследований и производство новых видов изделий. Оно обусловлено развитием микроэлектроники и компьютерных технологий, созданием новых электротехнических материалов. На стыке электромеханики, электроники и компьютерных технологий выделяется область мехатроники, названная исследователями «электромехатроника» (или «электромеханотроника»), обеспечивающая разработку интеллектуальных (самоуправляемых,

самодиагностируемых и защищаемых от внешних воздействий), а также мультикоординатных устройств преобразования электрической и механической энергии.

В нашей стране наиболее перспективно развивалось направление, связанное с электронизацией технических устройств, которое заключается в совмещении электромеханических преобразователей с электронными приборами и устройствами или электронными компонентами. В результате возник новый термин «электромеханотроника». Официальное признание электромеханотроники состоялось в октябре 1987 года на Первой Всесоюзной НТК по электромеханотронике. Развитие этого направления в соответствие с новой терминологией нашло отражение в работах Осипова Ю.М., Коськина Ю.П., Глебова И.А., Германа-Галкина С.Г., Бута Д.А., Смирнова Ю.С., Домрачева В.И., Аракелян А.К., Афанасьева А.А. и других.

Мехатронные модули и системы включают в себя исполнительные органы, электромехатронные их не содержат. Кроме этого мехатроника предполагает в качестве главного признака использование компьютерного управления.

В настоящее время и в ближайшем будущем бурное развитие нанотехнологий вторгается в мехатронику и определяет пути развития наномехатроники, расширяющего понятие «мехатроника» – нового понятия в связи с прогрессом науки и техники. Системы движения в наномехатронике организованы на уровне молекул, групп и отдельных атомов, возникают условия для инновационного развития экономики [7].

В данной книге авторы уделили внимание современной элементной базе, на базе которой можно построить составные компоненты мехатроники: электронным компонентам энергетического и информационного назначения, электромеханотронным комплексам, связующим звеньям электромеханотроники с электротехнологическими установками. Изложены

принципы построения мехатронных модулей систем технологического оборудования, электромехатронных преобразователей и их компонент.

В последней главе приведены разработки авторов по разработке электронных и мехатронных систем управления технологическими процессами и производствами в области легкой промышленности и сервисного обслуживания.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой, проектированием и эксплуатацией систем автоматизации технологического оборудования, а также аспирантов и магистров технологических направлений подготовки.

ГЛАВА 1. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

1.1. Полупроводниковые приборы. Принцип работы электронно-дырочного перехода

К *полупроводникам* относят материалы, проводимость которых больше проводимости диэлектриков, но меньше проводимости проводников. В радиоэлектронике в качестве полупроводников наиболее часто используются кремний, германий, арсенид галлия, селен и др. Химически чистые или *i-полупроводники* имеют небольшую собственную проводимость, обусловленную свободными электронами и дырками теплового происхождения [3].

Полупроводник n-типа — это полупроводник с преобладающей электронной проводимостью. Преобладающая электронная проводимость возникает при добавлении донорных примесей, например пентавалентных сурьмы, мышьяка и т. п. к четырехвалентному кремнию. Атом примеси легко ионизируется, добавляя электрон к электронам собственной проводимости.

Полупроводник p-типа возникает при добавлении к химически чистому полупроводнику акцепторных примесей, например, при добавлении трехвалентных бора, алюминия и др. к четырехвалентному кремнию. Атом примеси ионизируется, принимая электрон от соседнего атома основного полупроводника и создавая тем самым дырку в полупроводнике. Примесные полупроводники называются *легированными*.

При нормальной температуре практически все атомы примесей ионизируются и проводимость примесного полупроводника существенно возрастает. Отметим, что, несмотря на возникновение только одного типа проводимости: или n-, или p-типа, примесные полупроводники будут электрически нейтральны, так как заряды ионов скомпенсированы зарядами

основных носителей заряда — электронов в n -области и дырок p -области полупроводника. Дырки в n -полупроводнике или электроны в p -полупроводнике называют *неосновными* носителями зарядов.

Наибольшее применение нашли полупроводники, одна часть которых легирована акцепторными примесями, а другая — донорными. Переход между двумя областями полупроводника с разными типами электропроводности называется *электронно-дырочным* или *p - n -переходом* (рис. 1.1).

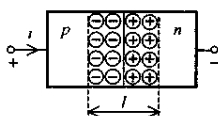


Рис. 1.1. P - n -переход

После создания в полупроводнике p - и n -областей начинается диффузионный ток основных носителей заряда: дырок из p -области в n -область и электронов в обратном направлении. Диффундируя, электроны и дырки оставляют за собой соответственно положительно и отрицательно заряженные ионы примесей. Отметим, что эти ионы жестко закреплены в кристаллической решетке и перемещаться не могут. В n -области диффундирующие дырки рекомбинируют с электронами, резко уменьшая концентрацию электронов и дополнительно образуя нескомпенсированные положительные ионы. Аналогично в p -области диффундирующие электроны рекомбинируют с дырками, резко уменьшая концентрацию основных носителей заряда и дополнительно образуя нескомпенсированные отрицательные ионы.

Таким образом, вблизи границы p - и n -областей концентрация основных носителей заряда резко падает. Возникает обедненный носителями слой, где "обнажаются" не скомпенсированные отрицательные и

положительные заряды акцепторных и донорных ионов. Ширина этого обедненного слоя для кремниевого перехода $l \approx 0,3$ мкм.

Появление противоположно заряженных ионов приводит к возникновению электрического поля в переходе. Это поле направлено так, что тормозит процессы диффузии. Возникшему электрическому полю соответствует *контактная разность потенциалов* φ_k . При температуре $T = 27^\circ\text{C}$ для кремниевого перехода $\varphi_k \approx 0,8$ В.

Электрическое поле в переходе обуславливает появление *дрейфового тока* — тока неосновных носителей зарядов в переходе: дырки из *p*-области переносятся электрическим полем в *n*-область, а электроны из *n*-области затягиваются в *p*-область. Явление поступления неосновных (для рассматриваемого слоя) носителей электричества в рассматриваемый слой полупроводника называется *инжекцией* (или эмиссией).

Величина дрейфового тока мала, так как мала концентрация неосновных носителей заряда. В установившемся состоянии диффузионный ток будет равен дрейфовому току.

Пусть к *p-n*-переходу подключен источник небольшого постоянного напряжения, причем плюс этого напряжения прикладывается к *p*-области (рис. 1.1). Электрическое поле, создаваемое этим источником, накладывается на внутреннее поле в *p-n*-переходе, созданное ионами примесей. Результирующее поле в переходе уменьшается. Возникает дополнительная диффузия основных носителей заряда. Диффузионный ток через переход становится больше дрейфового. Причем, чем больше прикладываемое напряжение, тем больше диффузионный ток через переход. Напряжение, при котором ток через *p-n*-переход быстро увеличивается, называется *прямым (открывающим) напряжением*. Возникающий при этом большой ток называется *прямым током*. Сопротивление *p-n*-перехода при подаче прямого напряжения резко уменьшается.

Подключим к р-n-переходу источник постоянного напряжения, так чтобы минус этого напряжения прикладывался к р-области. Дополнительное электрическое поле, создаваемое источником, складывается с внутренним полем в р-n-переходе. Результирующее поле в переходе увеличивается. Диффузия основных носителей заряда уменьшается, а при дальнейшем увеличении приложенного напряжения почти полностью прекращается. Дрейфовый ток через переход незначительно увеличивается и становится больше диффузионного. Однако сопротивление перехода протекающему току остается увеличенным, так как концентрация неосновных носителей в полупроводнике мала и дрейфовый ток при прочих равных условиях много меньше прямого тока. Поданное напряжение называется *обратным (запирающим или закрывающим) напряжением*, а возникающий при этом небольшой ток называют *обратным током*.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) перехода представлена на рис. 1.2. Из анализа ВАХ следует основное свойство р-n-перехода — односторонняя проводимость. При подаче прямого напряжения ток через переход возрастает по экспоненциальному закону. Обратный ток, возникающий при обратном напряжении, значительно меньше прямого и слабо зависит от величины обратного напряжения. При подаче на переход переменного напряжения через переход будет протекать в основном прямой ток. Поэтому р-n-переход называют *выпрямляющим переходом*.

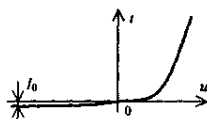


Рис. 1.2. Вольт-амперная характеристика р-n-перехода

Наличие в р-n-переходе и в областях, прилегающих к нему, зарядов: ионов, электронов и дырок, свидетельствует о том, что переход обладает емкостью. Различают *барьерную* и *диффузионную емкости*.

Барьерная емкость обусловлена наличием в обедненном слое противоположно заряженных ионов примесей (рис. 1.1). Два слоя положительно и отрицательно заряженных ионов соответствуют двум заряженным "пластинам" конденсатора. Барьерная емкость играет основную роль при подаче обратного напряжения. При увеличении обратного напряжения основные носители зарядов оттесняются в глубь полупроводника электрическим полем р-п-перехода. При этом увеличивается ширина l перехода и увеличивается среднее расстояние между "пластинами" конденсатора. Барьерная емкость уменьшается.

Диффузионная емкость характеризует накопление неравновесного заряда, обусловленное диффузией электронов и дырок в глубь полупроводника за область р-п-перехода. Так как время жизни электронов и дырок до наступления рекомбинации конечно, то по обе стороны р-п-перехода появляются дополнительные, объемные заряды. Диффузионная емкость для малых переменных напряжений линейно увеличивается при увеличении прямого тока $i_{пр}$ через переход.

При прямом токе диффузионная емкость, как правило, больше барьерной емкости. Результирующая емкость перехода равна сумме барьерной и диффузионной емкостей.

Кроме р-п-перехода часто используется переход между металлом и полупроводником. В зависимости от используемых материалов этот переход может обладать односторонней проводимостью или иметь малое сопротивление. В первом случае выпрямляющий переход называют переходом Шотки. Во втором случае переход металл-полупроводник, имеющий малое сопротивление, называют омическим. Его используют для создания электрических выводов из полупроводниковых областей. При изготовлении полупроводниковых приборов используется большое количество других электрических переходов, образованных различными

материалами. Все эти переходы будут или омическими, или выпрямляющими.

На основе выпрямляющих переходов изготавливаются полупроводниковые диоды. Полупроводниковый диод — это прибор с одним выпрямляющим переходом и двумя выводами. Наибольшее распространение получили диоды, использующие р-п-переход (рис. 1.3). Электрод, подключенный к р-области, часто называют анодом, а электрод, соединенный с п-областью — катодом. На рис. 1.3 показано условное обозначение полупроводникового диода и полярность прямого напряжения.

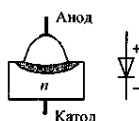


Рис 1.3. Диод с р-п-переходом, и его условное обозначение

Реальные вольт-амперные характеристики диода приведены на рис. 1.4. Характерные особенности этих кривых следующие. Во-первых, при увеличении прямого напряжения экспоненциальное возрастание тока происходит только на начальном участке. В дальнейшем ток через диод увеличивается практически по линейному закону. Это объясняется наличием сопротивлений р- и п-областей полупроводника (рис. 1.3). Во-вторых, при большом обратном напряжении возникает резкий рост обратного тока через диод. Это явление называют пробоем диода. Различают лавинный 1, тепловой 2 и туннельный 3 пробой (рис. 1.4).

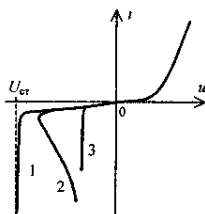


Рис. 1.4. Реальные вольт-амперные характеристики диода

Лавинный пробой возникает при большом обратном напряжении $U_{ст}$, создающем в переходе увеличенную напряженность электрического поля. В таком поле свободный электрон ускоряется и приобретает большую кинетическую энергию, достаточную для "выбивания" из атомов нескольких электронов. Появившиеся электроны, ускоряясь, выбивают новые электроны и т. д. Развивается лавинный процесс увеличения числа электронов и, соответственно, увеличения обратного тока через диод.

Тепловой пробой возникает вследствие разогрева р-п-перехода. При этом резко возрастает число неосновных носителей, что увеличивает обратный ток и вызывает дополнительное увеличение температуры перехода.

Туннельный пробой обуславливается туннельным эффектом, возникающим в тонких р-п-переходах, внутри которых велика напряженность электрического поля и высока вероятность туннельного перехода. Как правило, только тепловой пробой вызывает необратимые изменения параметров диода. Лавинный и туннельный пробой не разрушают р-п-переход, если они не сопровождаются тепловым пробоем.

Рассмотрим основные разновидности полупроводниковых диодов.

Стабилитрон — полупроводниковый диод, вольт-амперная характеристика которого имеет участок лавинного пробоя. Стабилитроны широко используются в источниках питания для получения стабильных выходных напряжений. Например, они используются в источниках питания компьютеров для создания высокостабильных напряжений питания микропроцессоров, микросхем на материнской плате, устройств внешней памяти и т. п.

Простейшая схема для получения стабилизированного напряжения приведена на рис. 1.5. Для ограничения тока при пробое последовательно с диодом включен дополнительный резистор. На вход схемы поступает напряжение E , величина которого нестабильна. На стабилитроне при

лавинном пробое получаем стабильное выходное напряжение $U_{ст}$. Отметим, что рабочий режим стабилитрона обеспечивается подачей на диод не прямого, а обратного напряжения.

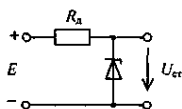


Рис. 1.5. Простейшая схема для получения стабилизированного напряжения

Варикап — полупроводниковый диод, в котором используется зависимость барьерной емкости р-п-перехода от обратного напряжения (рис. 1.6). Варикап в электрических схемах, приемниках и передатчиках используется как конденсатор с изменяемой емкостью. В отличие от обычных диодов, емкость которых тоже изменяется при изменении обратного напряжения, варикапы имеют гарантированный и увеличенный диапазон изменения емкости. Для уменьшения потерь варикапы имеют малые объемные сопротивления р- и н-областей полупроводника и увеличенное сопротивление при обратном постоянном напряжении. Условное обозначение варикапа приведено на рис. 1.6.

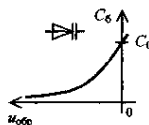


Рис. 1.6. Зависимость барьерной емкости р-п-перехода от обратного напряжения и условное обозначение варикапа

Туннельный диод — это полупроводниковый прибор, вольт-амперная характеристика которого при прямом напряжении имеет падающий участок 1-2 (рис. 1.7). Наличие такого участка объясняется возникновением туннельного эффекта.

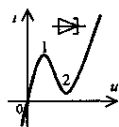


Рис. 1.7. Вольт-амперная характеристика туннельного диода

Диоды, использующие выпрямляющий переход металл-полупроводник, называются диодами Шотки. Эти диоды обладают увеличенным быстродействием и широко используются при изготовлении интегральных схем. Технология их изготовления хорошо совмещается с современной технологией изготовления микросхем средней и большой степени интеграции.

Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока. Они используются в источниках питания компьютеров и другой радиоэлектронной аппаратуры. Выпрямительные диоды обеспечивают большую величину прямого тока и выдерживают повышенные обратные напряжения. К быстродействию выпрямительных диодов, как правило, жестких требований не предъявляется, так как они работают в основном на промышленной частоте 50 Гц.

Высокочастотные диоды работают при воздействии высокочастотных сигналов и поэтому имеют малые емкости р-п-перехода. Эти диоды используются в радиоприемной и радиопередающей аппаратуре.

Импульсные диоды предназначены для работы с быстро изменяющимися импульсными сигналами. Такие диоды применяются в компьютерах, в мониторах и телевизорах, в радиолокационных передатчиках и приемниках. Эти диоды должны иметь малые емкости, а также выдерживать большие прямые импульсные токи и увеличенные обратные импульсные напряжения.

1.2. Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор — это полупроводниковый прибор с двумя р-п-переходами, имеющий три вывода. Действие биполярного транзистора основано на использовании носителей заряда обоих знаков (дырок и электронов), а управление протекающим через него током осуществляется с помощью управляющего тока [1].

Биполярный транзистор является наиболее распространенным активным полупроводниковым прибором.

1.2.1. Устройство и основные физические процессы

Устройство транзистора

Биполярный транзистор в своей основе содержит три слоя полупроводника (р-п-р или п-р-п) и соответственно два р-п-перехода. Каждый слой полупроводника через невыпрямляющий контакт металл-полупроводник подсоединен к внешнему выводу.

Средний слой и соответствующий вывод называют *базой*, один из крайних слоев и соответствующий вывод называют *эмиттером*, а другой крайний слой и соответствующий вывод — *коллектором*.

Дадим схематическое, упрощенное изображение структуры транзистора типа п-р-п (рис. 1.8, *а*) и два допустимых варианта условного графического обозначения (рис. 1.8, *б*).

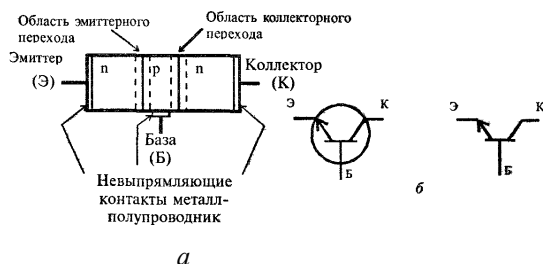


Рис. 1.8. Упрощенное изображение структуры транзистора типа n-p-n (а) и два варианта условного графического обозначения (б)

Транзистор типа p-n-p устроен аналогично, упрощенное изображение его структуры дано на рис. 1.9, а, более простой вариант условного графического обозначения — на рис. 1.9, б.

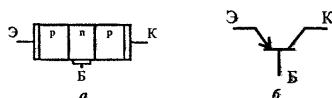


Рис. 1.9. Упрощенное изображение структуры транзистора типа p-n-p (а) и условное графическое обозначение (б)

Транзисторы типа n-p-n более распространены в сравнении с транзисторами типа p-n-p, так как обычно имеют лучшие параметры. Это объясняется следующим образом: основную роль в электрических процессах в транзисторах типа n-p-n играют электроны, а в транзисторах типа p-n-p — дырки. Электроны же обладают подвижностью в два-три раза большей, чем дырки.

Реально площадь коллекторного перехода значительно больше площади эмиттерного перехода, так как такая несимметрия значительно улучшает свойства транзистора.

Для определенности обратимся к транзистору типа n-p-n. Основными элементами транзистора являются два соединенных p-n-перехода. Это позволяет дать формальное представление структуры транзистора, представленное на рис. 1.10.

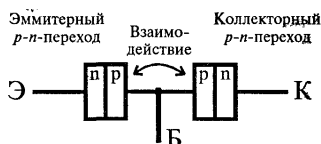


Рис. 1.10. Формальное представление структуры транзистора

Для понимания принципа работы транзистора исключительно важно учитывать, что p-n-переходы транзистора сильно взаимодействуют. Указанное взаимодействие имеет простую причину: очень малое расстояние между переходами транзистора (от 20—30 мкм до 1 мкм и менее). Это расстояние называют толщиной базы. Именно эта количественная особенность структуры создает качественное своеобразие транзистора.

Основные физические процессы

Концентрация атомов примеси (и свободных электронов) в эмиттере сравнительно велика, поэтому этот слой низкоомный. Концентрация атомов примеси (и дырок) в базе сравнительно низка, поэтому этот слой высокоомный. Концентрация атомов примеси (и свободных электронов) в коллекторе может быть как больше концентрации атомов примеси в базе, так и меньше ее.

С помощью источников напряжения сместим эмиттерный переход в прямом, а коллекторный — в обратном направлении (рис. 1.11). Тогда через эмиттерный переход потечет ток i_{ε} , который будет обеспечиваться главным

образом инъекцией электронов из эмиттера в базу. Инжекция дырок из базы в эмиттер будет незначительной вследствие указанного выше различия в концентрациях атомов примесей.

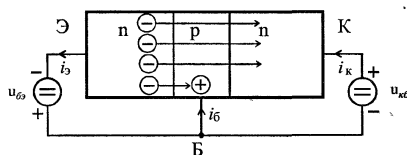


Рис. 1.11. Смещение эмиттерного перехода в прямом, а коллекторного — в обратном направлении

Из-за малой толщины базы почти все электроны, пройдя базу, достигают коллектора. Только малая доля электронов рекомбинирует в базе с дырками. Убыль этих дырок компенсируется протеканием тока базы i_b . Из изложенного следует, что $i_b \ll i_e$.

Обратное смещение коллекторного перехода способствует тому, что электроны, подошедшие к нему, захватываются электрическим полем перехода и переносятся в коллектор. В то же время это поле препятствует переходу электронов из коллектора в базу.

Ток коллектора i_k лишь незначительно меньше тока эмиттера. Более точно:

$$i_k = \alpha_{cm} \cdot i_e + I_{ko} \quad (1.1)$$

где α_{cm} — статический коэффициент передачи эмиттерного тока (термин статический подчеркивает тот факт, что этот коэффициент связывает постоянные токи); I_{ko} — обратный ток коллектора.

Природа обратного тока коллектора такая же, как и у обратного тока диода (т. е. тока диода, включенного в обратном направлении). Ток I_{ko} протекает и тогда, когда ток эмиттера равен нулю.

1.2.2. Характеристики и параметры

Схема с общей базой

Схема включения транзистора в электрическую цепь, изображенная на рис. 1.12, называется схемой с общей базой, так как база является общим электродом для источников напряжения.

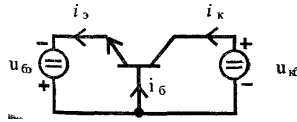


Рис. 1.12. Схема с общей базой

Транзисторы традиционно характеризуют их входными и выходными характеристиками. Для схемы с общей базой входной характеристикой называют зависимость тока $i_э$ от напряжения $u_{бэ}$ при заданном напряжении $u_{кб}$, т. Е. зависимость вида

$$i_э = f(u_{бэ}) \Big|_{u_{кб} = \text{const}} \quad (1.2)$$

где f — некоторая функция.

Входной характеристикой называют и график соответствующей зависимости (это справедливо и для других характеристик).

Выходной характеристикой для схемы с общей базой называют зависимость тока $i_к$ от напряжения $u_{кб}$ при заданном токе $i_э$, т. Е. зависимость вида

$$i_к = f(u_{кб}) \Big|_{i_э = \text{const}} \quad (1.3)$$

где f — некоторая функция.

Входные характеристики для схемы с общей базой. Каждая входная характеристика в значительной степени определяется характеристикой эмиттерного перехода и поэтому аналогична характеристике диода.

Изобразим входные характеристики кремниевого транзистора КТ603А (максимальный постоянный ток коллектора — 300 мА, максимальное постоянное напряжение коллектор-база — 30 В при $t < 70^\circ \text{C}$) (рис. 1.13). Сдвиг характеристик влево при увеличении напряжения $u_{кб}$ объясняется проявлением эффекта Эрли (эффекта модуляции толщины базы).

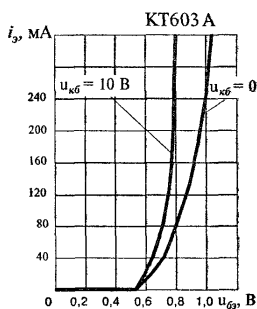


Рис. 1.13. Входные характеристики для схемы с общей базой

Указанный эффект состоит в том, что при увеличении напряжения $u_{кб}$ коллекторный переход расширяется (как и всякий обратно смещенный р-п-переход). Если концентрация атомов примеси в базе меньше концентрации атомов примеси в коллекторе, то расширение коллекторного перехода осуществляется в основном за счет базы. В любом случае толщина базы уменьшается. Уменьшение толщины базы и соответствующее уменьшение ее сопротивления приводит к тому, что при неизменном токе i_b напряжение $u_{бэ}$ уменьшается. При малом по модулю обратном напряжении на р-п-переходе это напряжение влияет на ширину перехода больше, чем при большом напряжении. Поэтому различные входные характеристики, соответствующие различным напряжениям $u_{кб}$, независимо от типа транзистора практически сливаются, если $u_{кб} > 5 \text{ В}$ (или даже если $u_{кб} > 2 \text{ В}$).

Входные характеристики часто характеризуют дифференциальным сопротивлением $r_{диф}$.

$$r_{\text{оиф}} = \left. \frac{du_{\text{бэ}}}{di_{\text{э}}} \right|_{i_{\text{э}} - \text{заданный}, u_{\text{кб}} = \text{const}} \quad (1.4)$$

Выходные характеристики для схемы с общей базой. Изобразим выходные характеристики для транзистора КТ603А (рис. 1.14).

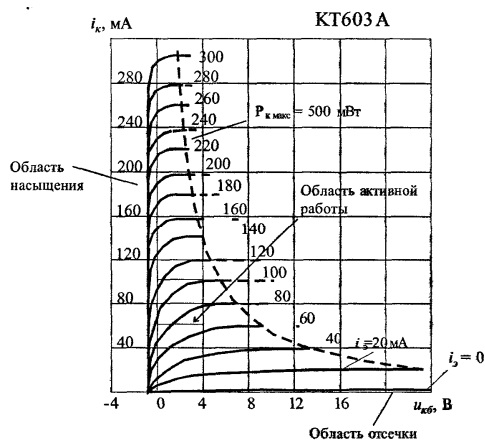


Рис. 1.14. Выходные характеристики для схемы с общей базой

Как уже отмечалось, если коллекторный переход смещен в обратном направлении ($u_{\text{кб}} > 0$), то ток коллектора примерно равен току эмиттера. Это соотношение сохраняется даже при $u_{\text{кб}} = 0$ (если ток эмиттера достаточно велик), так как и в этом случае большинство электронов, инжектированных в базу, захватывается электрическим полем коллекторного перехода и переносится в коллектор.

Только если коллекторный переход смещают в прямом направлении ($u_{\text{кб}} < 0$), ток коллектора становится равным нулю, так как при этом начинается инжекция электронов из коллектора в базу (или дырок из базы в коллектор). Эта инжекция компенсирует переход из базы в коллектор тех электронов, которые были инжектированы эмиттером. Ток коллектора становится равным нулю при выполнении условия $|u_{\text{кб}}| < 0,75 \text{ В}$.

Режим, соответствующий первому квадранту характеристик ($u_{кб}>0$, $i_k>0$, причем ток эмиттера достаточно велик), называют *активным режимом работы* транзистора. На координатной плоскости ему соответствует область активной работы.

Режим, соответствующий второму квадранту ($u_{кб}<0$), называют *режимом насыщения*. Ему соответствует область насыщения.

При увеличении температуры ток $I_{ко}$ возрастает и все выходные характеристики несколько смещаются вверх.

Режим работы транзистора, соответствующий токам коллектора, сравнимым с током $I_{ко}$, называют *режимом отсечки*. Соответствующую область характеристик вблизи оси напряжений называют областью отсечки.

В активном режиме напряжение $u_{кб}$ и мощность $p_k=i_k \cdot u_{кб}$, выделяющаяся в виде тепла в коллекторном переходе, могут быть значительны. Чтобы транзистор не перегрелся, должно выполняться неравенство

$$p_k \leq P_{к.макс}$$

где $P_{к.макс}$ — максимально допустимая мощность (для КТ603А $P_{к.макс}=500$ мВт при $t<50^\circ\text{C}$).

График зависимости $i_k=P_{к.макс}/u_{кб}$ (гипербола) изображен на выходных характеристиках пунктиром.

Таким образом, в активном режиме эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный — в обратном. В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении, в режиме отсечки коллекторный переход смещен в обратном направлении, а эмиттерный или смещен в обратном направлении, или находится под очень малым прямым напряжением.

Схема с общим эмиттером

Значительно чаще, чем схема с общей базой, применяется схема, представленная на рис. 1.15. Ее называют схемой с общим эмиттером, так как эмиттер является общим электродом для источников напряжения.

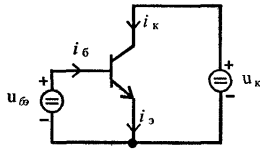


Рис. 1.15. Схема с общим эмиттером

Для этой схемы входной характеристикой называют зависимость тока $i_б$ от напряжения $u_{бэ}$ при заданном напряжении $u_{кэ}$, т. е. зависимость вида

$$i_б = f(u_{бэ}) \Big|_{u_{кэ} = \text{const}} \quad (1.5)$$

где f — некоторая функция.

Выходной характеристикой называют зависимость тока $i_к$ от напряжения $u_{кэ}$ при заданном токе $i_б$, т. е. зависимость вида

$$i_к = f(u_{кэ}) \Big|_{i_б = \text{const}} \quad (1.6)$$

где f — некоторая функция.

Характеристики для схемы с общим эмиттером не отражают никакие новые физические эффекты по сравнению с характеристиками для схемы с общей базой и не несут никакой принципиально новой информации о свойствах транзистора. Для объяснения особенностей характеристик с общим эмиттером не нужна никакая информация кроме той, что необходима для объяснения особенностей характеристик схемы с общей базой. Тем не менее, характеристики для схемы с общим эмиттером очень широко используют на практике (и приводят в справочниках), так как ими удобно

пользоваться.

Входные характеристики для схемы с общим эмиттером. Изобразим характеристики уже рассмотренного транзистора КТ603А (рис. 1.16).

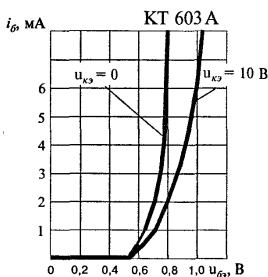


Рис. 1.16. Входные характеристики для схемы с общим эмиттером

Теперь эффект Эрли проявляется в том, что при увеличении напряжения $u_{кэ}$ характеристики сдвигаются вправо. Дифференциальное сопротивление теперь определяется выражением:

$$r_{диф} = \left. \frac{du_{бэ}}{di_б} \right|_{i_б - \text{заданный}, u_{кэ} = \text{const}} \quad (1.7)$$

Выходные характеристики для схемы с общим эмиттером. Изобразим эти характеристики для транзистора КТ603А (рис. 1.17).



Рис. 1.17. Выходные характеристики для схемы с общим эмиттером

Обратимся к ранее полученному выражению

$$i_k = \alpha_{cm} \cdot i_o + I_{ko}$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа

$$i_o = i_k + i_o$$

и с учетом предыдущего выражения получим

$$i_k = \alpha_{cm} (i_k + i_o) + I_{ko} \quad (1.7)$$

откуда

$$i_k = \frac{\alpha_{cm}}{1 - \alpha_{cm}} \cdot i_o + \frac{1}{1 - \alpha_{cm}} \cdot I_{ko}$$

Введем обозначение:

$$\beta_{cm} = \frac{\alpha_{cm}}{1 - \alpha_{cm}}$$

Коэффициент β_{cm} называют *статическим коэффициентом передачи базового тока*. Его величина обычно составляет десятки — сотни (это безразмерный коэффициент).

Легко заметить, что

$$\frac{1}{1 - \alpha_{cm}} = \beta_{cm} + 1$$

В итоге получаем

$$i_k = \beta_{cm} \cdot i_o + (\beta_{cm} + 1) \cdot I_{ko}. \quad (1.8)$$

Это выражение в первом приближении описывает выходные характеристики в области активной работы без учета наклона характеристик.

1.2.3. Три схемы включения транзистора с ненулевым сопротивлением нагрузки

Транзисторы часто применяют для усиления переменных сигналов (которые при расчетах обычно считают синусоидальными), при этом в выходной цепи транзистора применяется нагрузка с ненулевым сопротивлением.

Во входной цепи, кроме источника постоянного напряжения, необходимого для обеспечения активного режима работы, также используют источник входного переменного напряжения. Изобразим три характерные схемы включения транзистора [6,28].

Схема с общей базой (ОБ) (рис. 1.18). Если сопротивление нагрузки достаточно велико, то амплитуда переменной составляющей напряжения $u_{\text{вых}}$ значительно больше амплитуды напряжения $u_{\text{вх}}$. Учитывая, что $i_{\text{вых}} \approx i_{\text{вх}}$, можно утверждать, что схема не обеспечивает усиления тока, но усиливает напряжение. Входной ток такой схемы достаточно большой, а соответствующее входное сопротивление малое.

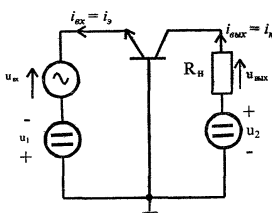


Рис. 1.18. Схема с общей базой

Схема с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 1.19). Так как $i_{\text{вых}} \gg i_{\text{вх}}$, а при достаточно большом сопротивлении R_H амплитуда переменной составляющей напряжения $u_{\text{вых}}$ значительно больше амплитуды напряжения $u_{\text{вх}}$, следовательно, схема обеспечивает усиление и тока, и напряжения.

Входной ток схемы достаточно мал, поэтому входное сопротивление больше, чем у схемы с общей базой.

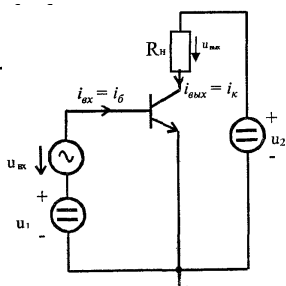


Рис. 1.19. Схема с общим эмиттером

Схема с общим коллектором (ОК) (рис. 1.20). При определении переменных составляющих токов и напряжений источники постоянного напряжения u_1 и u_2 заменяют закоротками (закорачивают). После этого к коллектору оказываются подключенными и источник входного напряжения $u_{вх}$, и сопротивление нагрузки. Отсюда и название — схема с общим коллектором.

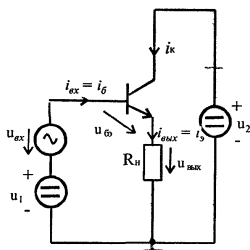


Рис. 1.20. Схема с общим коллектором

Само напряжение $u_{бэ}$ и особенно переменная составляющая этого напряжения достаточно малы, поэтому амплитуда переменной составляющей напряжения $u_{вх}$ примерно равна амплитуде переменной

составляющей напряжения $u_{вых}$. В соответствии с этим усилительные каскады, в которых транзисторы включены по схеме с общим коллектором, называют *эмиттерными повторителями*.

Учитывая также, что $i_{вх} \ll i_{вых}$, отмечают, что схема усиливает ток, но не усиливает напряжение.

Схема отличается повышенным входным сопротивлением, так как при увеличении входного напряжения увеличению входного тока препятствует увеличение как напряжения $u_{бэ}$ так и напряжения $u_{вых}$.

На практике наиболее часто используется схема с общим эмиттером.

1.3. Полевые транзисторы

Полевыми транзисторами называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля (в биполярных транзисторах выходной ток управляется входным током).

Полевые транзисторы называют также *униполярными*, так как в процессе протекания электрического тока участвуют только основные носители.

Различают два вида полевых транзисторов: с управляющим переходом и с изолированным затвором. Для определенности вначале обратимся к полевому транзистору с управляющим р-п-переходом с каналом р-типа [5,6,28,49].

1.3.1. Устройство и основные физические процессы

Устройство транзистора

Дадим схематическое изображение структуры полевого транзистора с управляющим переходом и каналом р-типа (рис. 1.21) и условное графическое обозначение этого транзистора (рис. 1.22, *а*). Стрелка указывает направление от слоя р к слою п (как и стрелка в изображении эмиттера биполярного транзистора). В интегральных микросхемах линейные размеры транзисторов могут быть меньше 1 мкм.

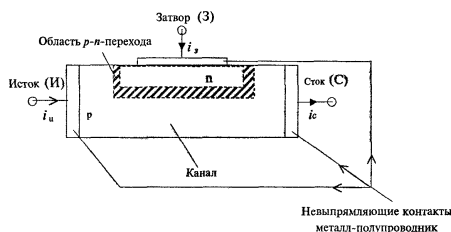


Рис. 1.21. Схематическое изображение структуры полевого транзистора с управляющим переходом и каналом p-типа

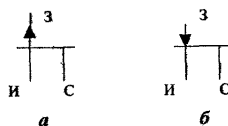


Рис. 1.22. Условное графическое обозначение полевого транзистора с управляющим p-n-переходом: каналом p-типа (а) и каналом n-типа (б)

Удельное сопротивление слоя n (затвора) намного меньше удельного сопротивления слоя p (канала), поэтому область p-n-перехода, обедненная подвижными носителями заряда и имеющая очень большое удельное сопротивление, расположена главным образом в слое p.

Если типы проводимости слоев полупроводника в рассмотренном транзисторе изменить на противоположные, то получим полевой транзистор с управляющим p-n-переходом и каналом n-типа, его условное графическое обозначение представлено на рис. 1.22, б.

Основные физические процессы

Подадим положительное напряжение между затвором и истоком транзистора с каналом p-типа: $u_{зи} > 0$. Оно сместит p-n-переход в обратном направлении.

При увеличении обратного напряжения на р-п-переходе он расширяется в основном за счет канала (в силу указанного выше различия в удельных сопротивлениях). Увеличение ширины р-п-перехода уменьшает толщину канала и, следовательно, увеличивает его сопротивление. Это приводит к уменьшению тока между истоком и стоком. Именно это явление позволяет управлять током с помощью напряжения и соответствующего ему электрического поля. Если напряжение $u_{зи}$ достаточно велико, то при некотором напряжении отсечки $U_{зи.отс}$, канал полностью перекрывается областью р-п-перехода.

В рабочем (не аварийном) режиме р-п-переход должен находиться под обратным или нулевым напряжением. Поэтому в рабочем режиме ток затвора примерно равен нулю ($i_3 \approx 0$), а ток стока i_c примерно равен току истока i_u ($i_c \approx i_u$).

Важно учитывать, что на ширину р-п-перехода и толщину канала прямое влияние может оказывать напряжение между истоком и стоком $u_{ис}$.

Пусть $u_{из}=0$ (между истоком и затвором включена закоротка) и подано положительное напряжение $u_{ис}$ (рис. 1.23). Это напряжение через закоротку окажется поданным на промежуток затвор — сток, т. е. окажется, что $u_{зс}=u_{ис}$ и что р-п-переход находится под обратным напряжением.

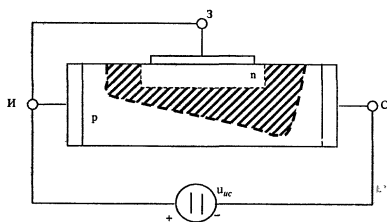


Рис. 1.23. Между истоком и затвором включена закоротка и подано положительное напряжение между стоком и истоком

Обратное напряжение в различных областях р-п-перехода различно. В областях вблизи истока это напряжение практически равно нулю, а в

областях вблизи стока это напряжение равно величине u_{uc} . Поэтому р-п-переход, будет шире в тех областях, которые ближе к стоку. Обычно считают, что напряжение в канале от истока к стоку увеличивается линейно.

Можно утверждать, что при $u_{uc} = U_{зи.омс}$ канал полностью перекроется вблизи стока. При дальнейшем увеличении напряжения u_{uc} та область канала, в которой он перекрыт, будет расширяться.

1.3.2. Характеристики и параметры

Для полевого транзистора, как и для биполярного, выделяют три схемы включения. Для полевого транзистора это схемы с общим затвором (ОЗ), общим истоком (ОИ) и общим стоком (ОС). Наиболее часто используются схемы с общим истоком.

При объяснении влияния напряжения u_{uc} на ширину р-п-перехода фактически использовалась схема с общим истоком (см. рис. 1.23). Рассмотрим характеристики, соответствующие этой схеме (что общепринято).

Так как в рабочем режиме $i_s \approx 0$, $i_u \approx i_c$, входными характеристиками обычно не пользуются.

Изобразим схему с общим истоком (рис. 1.24).

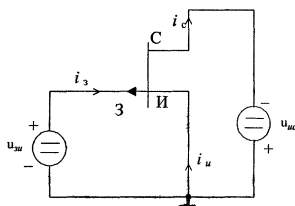


Рис. 1.24. Схема с общим истоком

Выходной характеристикой называют зависимость вида

$$i_c = f(u_{ic})|_{u_{зи} = const} \quad (1.9)$$

где f - некоторая функция.

Изобразим выходные характеристики для кремниевого транзистора типа КП103Л с p-n-переходом и каналом p-типа (рис. 1.25).

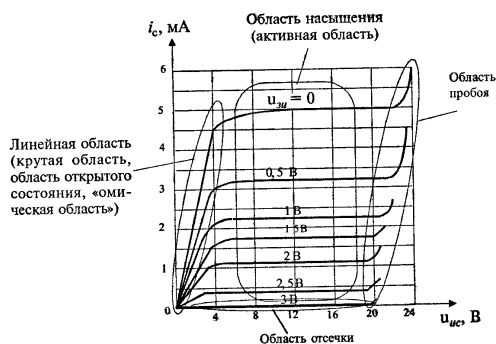


Рис. 1.25. Выходные характеристики

Обратимся к характеристике, соответствующей условию $u_{зи}=0$. В линейной области ($u_{ис} < 4 \text{ В}$) характеристика почти линейна (все характеристики этой области представляют собой почти прямые линии, веерообразно выходящие из начала координат). Она определяется сопротивлением канала. Транзистор, работающий в линейной области, можно использовать в качестве линейного управляемого сопротивления.

При $u_{ис} \approx 3 \text{ В}$ канал в области стока перекрывается. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к очень незначительному росту тока i_c , так как с увеличением напряжения область, в которой канал перекрыт (характеризуемая очень большим удельным сопротивлением), расширяется. При этом сопротивление на постоянном токе промежутка исток-сток увеличивается, а ток i_c практически не изменяется.

Ток стока в области насыщения при $u_{зи}=0$ и при заданном напряжении

u_{uc} называют начальным током стока и обозначают через $I_{c.нач}$. Для рассматриваемых характеристик $I_{c.нач}=5$ мА при $u_{uc}=10$ В. При $u_{uc}>22$ В возникает пробой р-п -перехода и начинается быстрый рост тока.

Стокзатворной характеристикой называют зависимость вида:

$$i_c = f(u_{зи})|_{u_{uc}=const} \quad (1.10)$$

где f – некоторая функция.

Такие характеристики не дают принципиально новой информации по сравнению с выходными, но иногда более удобны для использования. Изобразим стокзатворные характеристики для транзистора КП103Л (рис. 1.26).

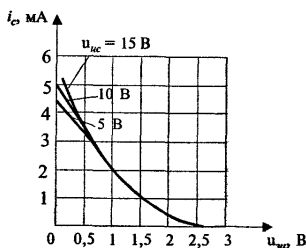


Рис. 1.26. Стокзатворные характеристики

Для некоторых транзисторов задается максимальное (по модулю) допустимое отрицательное напряжение, например, для транзистора 2П103Д это напряжение не должно быть по модулю больше чем 0,5 В.

Характеризует свойства транзистора усиливать напряжение коэффициент усиления:

$$M = \left. \frac{du_{uc}}{du_{зи}} \right|_{u_{зи} - \text{заданное}, i_c = const} \quad (1.11)$$

1.3.3. Разновидности полевых транзисторов

Полевые транзисторы с изолированным затвором

В транзисторах этого типа затвор отделен от полупроводника слоем диэлектрика, в качестве которого в кремниевых приборах обычно используется двуокись кремния. Эти транзисторы обозначают аббревиатурой МОП (металл-окисел-полупроводник) и МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) [28,49].

В свою очередь МДП-транзисторы делят на два типа.

В *транзисторах со встроенным (собственным) каналом* (транзистор обедненного типа) и до подачи напряжения на затвор имеется канал, соединяющий исток и сток.

В *транзисторах с индуцированным каналом* (транзистор обогащенного типа) указанный выше канал отсутствует.

МДП-транзисторы характеризуются очень большим входным сопротивлением. При работе с такими транзисторами надо предпринимать особые меры защиты от статического электричества. Например, при пайке все выводы необходимо закоротить.

МДП-транзистор со встроенным каналом

Канал может иметь проводимость как р-типа, так и n-типа. Для определенности обратимся к транзистору с каналом р-типа. Дадим схематическое изображение структуры транзистора (рис. 1.27), условное графическое обозначение транзистора с каналом р-типа (рис. 1.28, а) и с каналом n-типа (рис. 1.28, б). Стрелка, как обычно, указывает направление от слоя р к слою n.

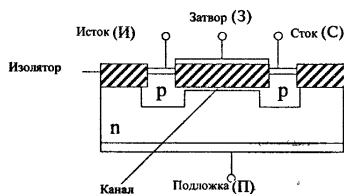


Рис. 1.27. Схематическое изображение структуры транзистора со встроенным каналом р-типа

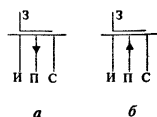


Рис. 1.28. Условное графическое обозначение транзистора со встроенным каналом р-типа (а) и с каналом п-типа (б)

Рассматриваемый транзистор (см. рис. 1.27) может работать в двух режимах: обеднения и обогащения.

Режиму обеднения соответствует положительное напряжение $u_{зи}$. При увеличении этого напряжения концентрация дырок в канале уменьшается (так как потенциал затвора больше потенциала истока), что приводит к уменьшению тока стока.

Если напряжение $u_{зи}$ больше напряжения отсечки, т. е. если $u_{зи} > U_{зи.отс}$, то канал не существует и ток между истоком и стоком равен нулю.

Режиму обогащения соответствует отрицательное напряжение $u_{зи}$. При этом, чем больше модуль указанного напряжения, тем больше проводимость канала и тем больше ток стока.