

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

И.Б. Бондаренко, Ю.А. Гатчин, Н.Ю. Иванова, Д.А. Шилкин

СОЕДИНИТЕЛИ И КОММУТАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2007

УДК 621.316.5:621.382

Бондаренко И.Б., Гатчин Ю.А., Иванова Н.Ю., Шилкин Д.А. Соединители и коммутационные устройства. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 151 с. Илл. – 52, список литературы – 12 наим.

В учебном пособии описаны различные явления, происходящие в коммутационных устройствах и электрических контактах, принцип действия и свойства бесконтактных коммутаторов. Рассмотрены процессы, происходящие в контактах различного вида, а также вопросы надежности контактных устройств. Особое внимание уделено состоянию нормативно-технической базы коммутационных устройств. В приложении приведены классификация и обозначение в конструкторской документации контактных устройств.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 200100 «Приборостроение», а также для специалистов, связанных с проектированием, эксплуатацией и ремонтом электронных устройств.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200100-Приборостроение.

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.



© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики 2007.

© И.Б. Бондаренко, Ю.А. Гатчин, Н.Ю. Иванова, Д.А. Шилкин 2007.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение _____	5
ГЛАВА 1.	
Соединители и коммутационные устройства электронной аппаратуры _____	7
1.1. Функции соединителей и устройств коммутации _____	7
1.2. Параметры и требования соединителей и коммутационных устройств _____	10
1.3. Разновидности контактных коммутационных устройств и соединителей _____	13
1.4. Классификация функциональных элементов электроники _____	15
1.5. Конструкции контактных коммутационных устройств и соединителей _____	17
Вопросы _____	19
ГЛАВА 2.	
Бесконтактные коммутационные устройства _____	20
2.1. Принцип действия оптоэлектронных коммутационных устройств _____	20
2.2. Источник излучения в оптопарах _____	21
2.3. Резистивная оптопара _____	23
2.4. Диодная оптопара _____	25
2.5. Транзисторная оптопара _____	27
2.6. Свойства оптоэлектронных коммутаторов _____	29
Вопросы _____	31
ГЛАВА 3.	
Теория контакта _____	32
3.1. Контактное сопротивление _____	32
3.2. Эквивалентная схема контактного сопротивления _____	36
3.3. Переходное сопротивление и контактное нажатие (усилие) _____	38
3.4. Зависимость сопротивления контакта от напряжения _____	43
Вопросы _____	47
ГЛАВА 4.	
Физико-химические процессы в электрических контактах _____	48
4.1. Поверхностные пленки на контакте _____	48
4.2. Механический износ _____	52
4.3. Тепловые явления при контактировании _____	52
4.4. Процессы при размыкании и замыкании при наличии напряжений (токов) _____	54
4.5. Слипание и сваривание контактов _____	56
Вопросы _____	59

ГЛАВА 5.	
Виды контактов _____	60
5.1. Неразъемные контакты _____	60
5.2. Разъемные контакты _____	63
5.3. Скользящие и разрывные контакты _____	67
Вопросы _____	70
ГЛАВА 6.	
Контактные явления в полупроводниках _____	71
6.1. Общие сведения о полупроводниках _____	71
6.2. Полупроводники с электронной электропроводностью _____	75
6.3. Полупроводники с дырочной электропроводностью _____	77
6.4. Токи в полупроводниках. Дрейфовый ток _____	79
6.5. Диффузионный ток _____	81
6.6. Контактные явления в полупроводниках. Электронно-дырочный переход в состоянии равновесия _____	83
6.7. Прямое включение p-n перехода _____	87
6.8. Обратное включение p-n-перехода _____	90
6.9. Теоретическая вольт–амперная характеристика p-n перехода _____	91
6.10. Реальная вольт–амперная характеристика p-n перехода _____	94
6.11. Емкости p-n перехода _____	97
Вопросы _____	101
ГЛАВА 7.	
Надежность контактных устройств _____	102
7.1. Виды отказов _____	102
7.2. Защита от внешних воздействий _____	106
Вопросы _____	108
ГЛАВА 8.	
Государственные стандарты и нормативно-техническая база контактных узлов _____	109
8.1. Требования ГОСТ 10434-82 _____	109
8.2. Требования ГОСТ 51686.1-2000 _____	117
Вопросы _____	134
Заключение _____	135
Приложение _____	137
Литература _____	147

ВВЕДЕНИЕ

Соединение элементов электронной аппаратуры (ЭА) для образования функционирующей электрической схемы осуществляется с помощью электрических контактов. С помощью контактов осуществляются электрические соединения между: электро-радиоэлементами, блоками, аппаратурой и системами.

При своей относительной простоте они могут коммутировать токи от 10^{-10} до 10^6 ампер при напряжении от 10^{-12} до 10^5 вольт. Контакты, как правило, обладают малым сопротивлением, малыми потерями и могут работать в цепях переменного, постоянного и импульсного токов.

В настоящее время с увеличением сложности разрабатываемой электронной аппаратуры значительно возрастает количество применяемых контактов, существуют электронные комплексы, содержащие до 300 тысяч одновременно работающих и функционально связанных между собой электрических контактов.

В этих условиях электрические контакты в значительной мере определяют такие характеристики электронной аппаратуры, как надежность и стоимость в условиях серийного производства.

С другой стороны, дальнейшая микроминиатюризация ЭА, при которой размер дискретного электроэлемента составляет миллиметры, а размер транзистора в ИС – десятки нанометров, становится невозможной из-за возникающих трудностей при создании мини- и микроразъемов с большим числом контактных пар. При уменьшении размеров контактов и, соответственно, разъемов возникают разнородные проблемы.

1. Усилия сочленения и расчленения должны оставаться на определенном уровне, не зависимо от числа контактных пар, иначе при их большом количестве сочленение/расчленение окажется невозможным.

2. Линейные размеры разъемов не должны влиять на отклонение размера, определяющего шаг контактов, штырей, гнезд и т.п. В противном случае в больших разъемах штыри на вилке могут не попасть в «свои» гнезда розетки. Люфт контактирующих элементов может привести к быстрому износу поверхностей либо к перекосу и поломке штырей.

3. При уменьшении размеров контактов возрастают требования к точности размеров, оборудованию.

4. Уменьшение размеров контактов не должно приводить к ослаблению, а, тем более искажению электрического сигнала.

5. Любое покрытие контактов создает дополнительное контактное сопротивление, а неправильный подбор материалов может внести искажения и создать помехи полезному сигналу.

6. С ростом числа контактов в современной ЭА необходим рост надежности контактного соединения. Иначе рост числа используемых контактов приведет к снижению надежности всей ЭА.

7. Надежность контактного соединения в сильной мере зависит от условий эксплуатации ЭА.

Перечисленные выше проблемы создают сложности при проектировании многоконтактных устройств, а также при их выборе для использования в конкретной ЭА. Поэтому систематизация сведений об имеющихся электрических соединителях упрощает выбор их для ЭА, а правильное применение повышает эксплуатационную надежность аппаратуры.

Потребность в высокоскоростных каналах связи стала причиной развития приборов на основе оптических эффектов. Оптоэлектронные элементы и устройства также содержат коммутационные элементы как электрические, так и оптические. Это дало новый толчок в развитии элементной базы коммутаторов для ЭА.

В работе рассмотрены соединители и коммутационные устройства ЭА (глава 1), принцип действия и свойства бесконтактных коммутаторов (глава 2), процессы, происходящие в контактах (главы 3 и 4), виды контактов (глава 5), контактные явления в полупроводниках (глава 6), вопросы надежности контактных устройств (глава 7), состояние нормативно-технической базы контактных узлов (глава 8). В приложении приведены классификация и обозначение в конструкторской документации контактных устройств.

ГЛАВА 1

СОЕДИНИТЕЛИ И КОММУТАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

1.1. Функции соединителей и устройств коммутации

Устройства коммутации (коммутационные устройства) и соединители широко используются в ЭА, в том числе при применении интегральных схем (ИС). Устройства коммутации позволяют быстро (практически мгновенно) коммутировать (включать, выключать) электрические цепи в работающей аппаратуре в результате изменения сопротивления исполнительных элементов под действием управляющих сигналов (или управляющих воздействий). Это дает возможность в процессе функционирования ЭА переключать диапазоны, изменять режимы работы, вводить информацию, перераспределять сигналы по цепям и т. п.

Управляющее воздействие может осуществляться непосредственно оператором (нажатие кнопки, переключение тумблера и т. д.) – ручное управление. Устройства коммутации с таким управлением находятся на панелях аппаратуры.

Управляющее воздействие может производиться электрическим управляющим сигналом. Устройства коммутации с таким управлением используются тогда, когда пульт управления отделен от аппаратуры, в которой должна осуществляться коммутация, и связан с нею электрически с помощью соединительных линий. При этом первичное управляющее воздействие – это непосредственные действия оператора, которые преобразуются в управляющий электрический сигнал, поступающий затем по проводам к исполнительным элементам [1].

Не меньшее значение имеют такие коммутационные устройства, в которых управляющим воздействием является электрический сигнал при автоматическом управлении аппаратурой. При этом управляющие сигналы вырабатываются в аппаратуре без участия оператора.

В коммутационных устройствах большое значение имеют исполнительные элементы, которые бывают контактные и бесконтактные. Соответственно различают контактные и бесконтактные коммутационные устройства. В контактных используется электрический контакт – соприкосновение тел (контакт-деталей), обеспечивающее непрерывность цепи. В таких коммутационных устройствах (реле, кнопки и т. д.) обычно применяют стыковой контакт, при котором контакт-детали прижимаются друг к другу. Существуют также врубные и вставные контакты, когда контакт-детали перед рабочим состоянием осуществляют боковое или продольное движение в прижатом состоянии с преодолением сил трения

(переключатели ручного управления, соединители). Обозначение замыкающего, размыкающего и переключающего контактов коммутационных устройств дано на рис. 1.

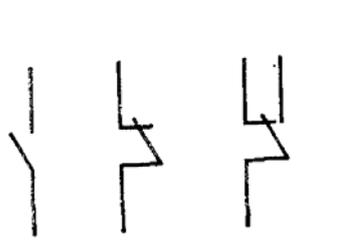


Рис. 1. Контакты коммутационных устройств

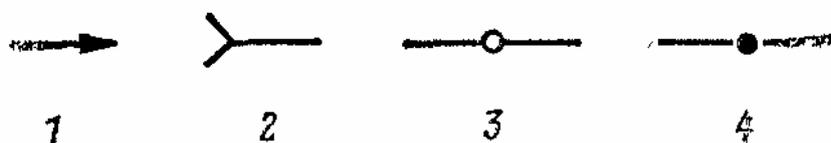


Рис. 2. Контакты соединений

Контактные исполнительные элементы применяются как при ручном, так и при дистанционном и автоматическом управлении. При ручном управлении это контакт-детали кнопок, тумблеров, переключателей. При дистанционном и автоматическом управлении – это контакт-детали электромагнитных реле и магнитоуправляемых герметизированных контактов (герконов).

В бесконтактных исполнительных элементах используется изменение условий протекания тока в объеме кристалла и его поверхностном слое под влиянием электрических напряжений, освещения и т. п. Такие элементы применяют в основном при дистанционном и автоматическом управлении аппаратурой – это оптроны, транзисторные ключи и коммутаторы. Начали находить применение бесконтактные коммутационные устройства с ручным управлением, например, кнопки с оптронами и магниторезисторами, а также сенсорные.

Соединители (контактные соединения) предназначены только для проведения электрического тока и не предназначены для коммутации электрической цепи. Контактные соединения могут быть разъемные, разборные и неразборные. Разъемными контактными соединениями называются такие, которые могут быть замкнуты (разомкнуты) или сочленены (расчленены) без разборки (сборки). Обозначение контактов соединений приведено на рис. 2, где:

- 1, 2 – штырь и гнездо разъемного соединения;
- 3 – разборное соединение;
- 4 – неразборное соединение.

Управление состоянием соединителя (сочленение и расчленение или замыкание и размыкание) осуществляется оператором в аппаратуре в нерабочем состоянии.

Соединители указываются в электрической принципиальной схеме, но необходимость их использования в аппаратуре в основном определяется ее конструкцией и требованиями к ремонтоспособности. Различают приборно-кабельные, приборные и кабельные соединители.

Часто возникает необходимость разделения аппаратуры на конструктивно самостоятельные устройства (приборы), выполняющие частные функции и не являющиеся самостоятельными в эксплуатационном отношении. Например, самолетная аппаратура часто требует ее разделения на пять частей: пульт управления, антенна, приемопередающее устройство, устройство обработки информации (специализированная ЭВМ), индикатор, каждая из которых конструктивно закончена и размещается в разных местах на борту самолета, причем все части работают совместно и должны быть электрически связаны. Соединители должны обеспечивать их быстрое сочленение и расчленение. Для этого используются приборно-кабельные соединители с электрическим контактом. При функционировании аппаратуры они не подвергаются сочленению (замыканию) и расчленению (размыканию).

С внедрением ИС и применением функционально-узлового метода конструирования большое значение приобрели приборные соединители, используемые внутри аппаратуры (приборов). Их использование позволяет значительно повысить плотность монтажа, облегчить проектирование, производство и ремонт аппаратуры. При этом электронная аппаратура собирается из печатных плат (модулей), на которых устанавливаются ИС, дискретные электронные компоненты и устройства функциональной электроники. В этих платах имеются соединители, через которые платы включаются в аппаратуру. Применение их обусловлено только конструкцией, но не схемой.

Кабельные соединители позволяют соединять между собой кабели.

1.2. Параметры и требования соединителей и коммутационных устройств

Разнообразие требований, которые предъявляются к коммутационным устройствам и соединителям, привело к созданию большого числа их разновидностей, различающихся по функциональному назначению, принципу действия, конструкции, параметрам, техническим возможностям и областям применения.

Основные требования сводятся к снижению затрат энергии (мощности) на управление, улучшению качества коммутации и соединений, улучшению конструктивно-технологической совместимости с ИС, повышению надежности, быстродействия (для коммутационных устройств) и уменьшению усилий сочленения и расчленения (для соединителей).

Основным параметром контактных и бесконтактных соединителей и коммутационных устройств как ручного, так и дистанционного и автоматического управления является сопротивление в состоянии контакта, или в замкнутом состоянии (при электрическом контакте) или в открытом состоянии (при использовании бесконтактных коммутационных устройств и соединителей), а также сопротивление в разомкнутом состоянии.

Характерной особенностью коммутационных устройств является многократное переключение ($10^5 \dots 10^8$ раз) в процессе функционирования аппаратуры, т. е. при наличии токов и напряжений, что предъявляет высокие требования к износостойчивости. При многократном замыкании и размыкании в электрических контактах происходит изменение состояния контактирующих поверхностей контакт-деталей и их разрушение. Срок службы коммутационных устройств равен примерно 15–25 лет.

Соединители включаются и выключаются сравнительно небольшое число раз (100–500) и обычно в неработающей аппаратуре. Основные требования предъявляются к контактному сопротивлению и его стабильности, контактному нажатию и усилию сочленения (расчленения), максимальным и минимальным токам и напряжениям, паразитным емкостям и сопротивлению изоляции между контактами разных пар. Важными являются также требования по надежности, технологичности, массе и габаритам.

Требования к электрическим и конструкторским параметрам коммутационных устройств и соединителей разнообразны и часто противоречивы, в связи с чем выпускается много их разновидностей. Обычно коммутационные устройства и соединители являются нормализованными и стандартизованными. Это требует от конструктора умения ориентироваться в их многообразии, которое, с одной стороны, дает много возможностей, но с другой стороны, усложняет выбор

оптимального варианта устройства для конкретной ЭА. Иногда приходится разрабатывать специальные коммутационные устройства и соединители частного применения. При выборе вида коммутационных устройств и соединителей конструктору следует иметь в виду их основные особенности, преимущества и недостатки.

Широко распространенные коммутационные устройства и соединители имеют ряд принципиальных ограничений и недостатков. Основные недостатки связаны с тем, что контакт в них достигается путем механического соединения контакт-деталей, на которые оказывает влияние много факторов, а также с тем, что в конструкцию таких устройств входит большое число мелких деталей, выполняющих чисто механические функции. При этом возникают трудности при миниатюризации: при соблюдении тех же относительных отклонений в размерах требуются более высокие классы точности механической обработки. Непосредственное изготовление деталей, входящих в эти устройства, может быть автоматизировано, но сборка, формирование устройств в целом сложно поддаются автоматизации и обычно выполняются вручную. Для обеспечения надежного электрического контакта между металлическими деталями необходимо выдерживать жесткие требования к интервалу значений контактных нажатий. Не менее важно качество обработки соединяемых поверхностей и выбор материала, из которого изготовлены контакт-детали.

В связи с этим длительное время велись поиски новых устройств, которые должны выполнять функции коммутации и соединителей в ЭА. Эти поиски привели к созданию нового вида бесконтактных устройств, основанных на принципах оптоэлектроники, когда вместо механических элементов, осуществляющих коммутацию и соединение, используется световой поток и элементы, чувствительные к его наличию и интенсивности. Коммутационные устройства и соединители на основе оптопар не содержат механически изготавливаемых деталей сложной формы и не требуют механической многоэтапной сборки, но им также свойственны определенные ограничения: сопротивление в открытом состоянии у них существенно больше, чем у контактных устройств.

В настоящее время получили также распространение новые бесконтактные коммутационные устройства на МДП и биполярных транзисторах. В МДП-транзисторах коммутируемая цепь подсоединяется к стоку и истоку, а напряжение, управляющее коммутацией, — к затвору. Такие коммутационные устройства обладают следующими преимуществами: могут быть использованы для коммутации постоянного и переменного тока, чрезвычайно компактны (до 1000 коммутационных элементов на 1 мм² в БИС-памяти), изготовление их основано на использовании технологических процессов микроэлектроники и групповой технологии. В качестве недостатка можно отметить значительно большее,

чем у контактных устройств, сопротивление в открытом состоянии. Такая коммутация цепей нашла широкое применение в телефонных коммутаторах и при коммутации элементов памяти в БИС.

Схема замещения соединителей и коммутационных устройств. Для анализа свойств соединителей и коммутационных устройств (контактных и бесконтактных) удобно пользоваться схемой замещения для замкнутого и разомкнутого состояний. Схема должна содержать как основные элементы, в которых отображается функциональное назначение, так и элементы, определяющие паразитные параметры. На рис. 3 приведена схема замещения для замкнутого состояния, на которой L_K — общая индуктивность контакта; $C_{KЗ}$ — общая емкость относительно земли; $R_{П}$ — переходное сопротивление; $R_{K-д}$ — сопротивление контакт-деталей; сумма сопротивлений $R_{П}+R_{K-д}$ составляет сопротивление контакта R_K , которое незначительно отличается от $R_{П}$.

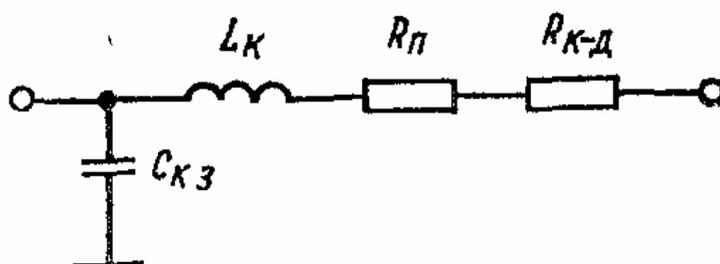


Рис. 3. Схема замещения для замкнутого состояния

На рис. 4 приведена упрощенная схема замещения для разомкнутого состояния. Здесь $C'_{KЗ}$ и $C''_{KЗ}$ — емкости относительно земли каждого контакта; $R_{ИЗ}$ — сопротивление изоляции; C_K — емкость разомкнутых контактов. На высоких частотах в емкостях $C_{KЗ}$ и C_K могут происходить заметные потери. Если коммутируемое устройство или соединитель размыкают (соединяют) несколько цепей, то необходимо учитывать паразитные емкости и сопротивления изоляции между разными контактными парами, что на схемах замещения не показано, поскольку для упрощения они даны для одной цепи [2]. В замкнутом состоянии в местах соприкосновения поверхностей возникает контактная ЭДС. На схеме замещения для упрощения она не показана, ее можно представить как источник ЭДС, включенный в цепь.

Все параметры коммутационных устройств и соединителей имеют случайные отклонения и должны рассматриваться как случайные величины. Кроме того, их параметры также случайно изменяются под действием температуры, механических воздействий, влажности и т. п. Важной характеристикой также является способность к длительному функционированию, причем использование λ -характеристик не дает полного представления об этом. При длительном функционировании

возникают сложные физические процессы, характеризующиеся случайными изменениями параметров во времени.

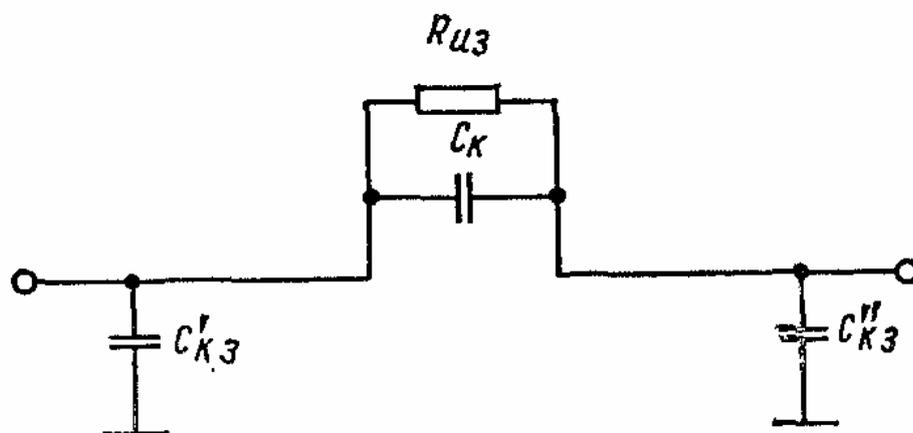


Рис. 4. Схема замещения для разомкнутого состояния

1.3. Разновидности контактных коммутационных устройств и соединителей

В контактных устройствах обеспечивается протекание тока в результате механического соединения или соприкосновения двух металлических деталей (контакт-деталей) и прекращение протекания тока при разъединении или устранении соприкосновения этих деталей. Основной характеристикой является контактное сопротивление.

Электрический контакт используется в следующих коммутационных устройствах ручного и дистанционного управления и соединителях: коммутационные контактные устройства ручного управления – нажимные (кнопки), перекидные (тумблеры), движковые (микрореле), поворотные (галетные переключатели) – могут быть однополюсными (коммутирующими одну цепь) и многополюсными; коммутационные контактные устройства дистанционного управления – электромеханические реле, магнитоуправляемые контакты (герконы); контактные разъемные соединители – приборные (соединяют съемные модули или типовые элементы замены – ТЭЗ между собой), приборно-кабельные (соединяют разные части аппаратуры), кабельные (соединяют кабели).

Как известно, явление проводимости металлов состоит в том, что благодаря наличию свободных электронов создаются благоприятные условия для протекания тока. Физические процессы, которые наблюдаются при протекании тока по соединению металлических тел, гораздо сложнее, чем в металлах. Действительно, при механическом соприкосновении двух металлов, как правило, не может произойти такое их сближение, при

котором внутренние структуры соединяются, образуя единое целое для прохождения тока. Это происходит потому, что поверхности металлов, даже тщательно обработанные, имеют шероховатости, размер которых значительно превышает размер молекул и атомов металлов, а также потому, что в результате воздействия окружающей среды они никогда не бывают абсолютно чистыми. На поверхностях адсорбируются молекулы кислорода и других газов, многие металлы вступают во взаимодействие с газами окружающей среды (кислородом, парами воды, сернистыми газами).

Контакт между двумя металлами схематически показан на рис. 5.

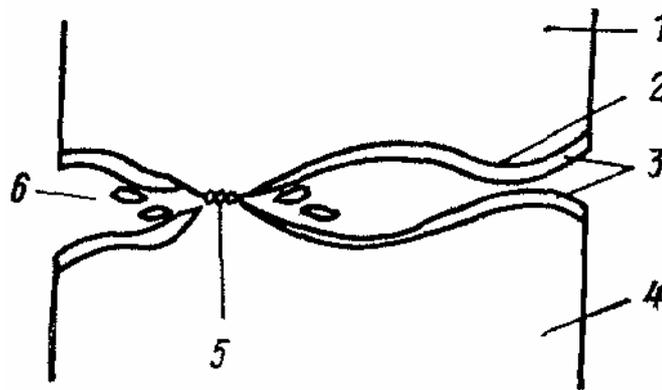


Рис. 5. Контакт между двумя металлами

На рисунке обозначены: 1, 4 – металлические тела, имеющие шероховатость поверхности;

2 – точки соприкосновения металлических поверхностей через тонкие поверхностные пленки, в которых реализуются другие виды проводимости;

3 – пленки на их поверхности;

5 – точки прямого соприкосновения металлов, в которых удалены пленки, но присутствует одноатомный слой адсорбированных газов – в этих точках обеспечивается металлическая проводимость;

6 – разрушенные пленки.

Процессы в контакте между двумя металлами усложняются в результате процессов прохождения токов через тонкие пленки и соединения металлов в локальных точках вследствие: тепловых процессов, связанных с местными перегревами; плавления металлов в точках, где нагрев достигает температуры плавления; процессов образования дуги и пробоя; механических процессов деформации выступов на поверхности контакт-деталей; изменения механических свойств поверхностей металла из-за наклепа и разрушений; химических процессов, связанных со взаимодействием металлов с кислородом, парами воды и сернистыми

соединениями. Следовательно, в протекании тока через контакт участвуют многие виды проводимостей.

1.4. Классификация функциональных элементов электроники

Согласно ГОСТ 17468–76 условные обозначения НЧ – и комбинированных соединителей состоят из буквенных и цифровых элементов.

Первый элемент условного обозначения определяет их группу, подгруппу и вид соединителей. Состоит из трех букв, где первые две буквы обозначают группу и подгруппу соединителей. Соединители ручного управления общего назначения низкочастотные напряжением до 1,5 кВ имеют обозначение ОН, а комбинированные ОК. Вид соединителя характеризуется третьей буквой. Цилиндрические соединители обозначаются буквой Ц, прямоугольные буквой П. Стандарт устанавливает большую букву Ц и П и малую «ц» и «п» соответственно для соединителей объемного и печатного монтажа, т. е. в соответствии со стандартом соединители ручного сочленения (расчленения) общего назначения низкочастотные до 1500 В, цилиндрические для объемного монтажа имеют обозначение ОНЦ, а соединители этой же группы, предназначенные для печатного монтажа, обозначаются ОНц. Аналогичным образом обозначаются прямоугольные НЧ-соединители общего назначения напряжением до 1500 В; для объемного монтажа ОНП, а для печатного монтажа ОНп. Соответственно комбинированные соединители обозначаются ОКП и ОКп. Второй элемент обозначения определяет способ соединения ответных частей соединителей и фиксации сочлененного положения: Б – байонетное, Р – резьбовое, В – врубное, С – самозапирающееся, П – с принудительным обжатием контактов, Ж – с винтовой фиксацией сочлененного положения, З – с пружинной фиксацией сочлененного положения, Н – непосредственное сочленение с печатной платой, К – косвенное сочленение с печатной платой.

Габаритные размеры соединителей и их обозначения: Н – нормальных габаритов, Г – малогабаритные, С – субминиатюрные, М – микроминиатюрные, К – супермикроминиатюрные. Третий цифровой элемент указывает тип соединителя и соответствует порядковому номеру разработки.

Четвертый элемент состоит из цифр, указывающих число контактов в соединителе.

Таблица 1.

Классификация функциональных элементов электроники

Наименование	Номер
<i>Цилиндрические соединители</i>	
<i>Приборная часть:</i>	
без кожуха	1
неэкранированная с прямым кожухом	2
экранированная с прямым кожухом	3
неэкранированная с угловым кожухом	4
экранированная с угловым кожухом	5
резерв	6...10
<i>Кабельная часть:</i>	
без кожуха	11
неэкранированная с прямым кожухом	12
экранированная с прямым кожухом	13
неэкранированная с угловым кожухом	14
экранированная с угловым кожухом	15
левая розетка	16
резерв	17...20
<i>Прямоугольные соединители</i>	
<i>Приборная часть:</i>	
без кожуха	21
с прямым кожухом	22
без кожуха с ориентирующими элементами	23
с прямым кожухом и ориентирующими элементами	24
с угловым кожухом и ориентирующими элементами	25
с угловым кожухом и фиксацией (скобой)	26
с прямым кожухом и фиксацией (скобой)	27
без кожуха и фиксации (скобы)	28
резерв	29...33
<i>Кабельная часть:</i>	
без кожуха	34
с прямым кожухом	35
с угловым кожухом	36
без кожуха с ориентирующими элементами	37

с прямым кожухом и ориентирующими элементами	38
с угловым кожухом и ориентирующими элементами	39
с прямым кожухом и фиксацией (скобой)	40
с угловым кожухом и фиксацией (скобой)	41
без кожуха и фиксации (скобы)	42
резерв	43...47
Межблочная розетка	48
Межблочная вилка	49
Прямая вилка косвенного сочленения	50
Угловая вилка косвенного сочленения	51
Прямая вилка косвенного сочленения с печатной платой	52
Угловая вилка косвенного сочленения с печатной платой	53

1.5. Конструкции контактных коммутационных устройств и соединителей

В состав контактного устройства помимо контакт-деталей входит много конструктивных элементов, предназначенных для того, чтобы в совокупности создать законченное в конструктивном и технологическом отношении устройство, способное выполнять определенные функции.

Элементы, создающие нажатие. Для осуществления электрического контакта требуется, чтобы металлические поверхности соприкасались с определенным контактным нажатием. В конструкции должны быть предусмотрены такие элементы, например, пружины различных конструкций. Они определяют основные параметры контактного устройства: контактное сопротивление, его стабильность и надежность.

Изоляционные основания. Контакт-детали должны быть механически укреплены и в то же время электрически изолированы друг от друга так, чтобы было возможно их механическое соединение (контакт) и разъединение. Для этого используются изготовленные из специальных материалов изоляционные основания разных конструкций, в которых осуществляется установка и крепление контакт-деталей. Конструкция и точность изготовления изоляционных оснований могут влиять на значение контактного нажатия и его стабильность, что имеет важное значение для правильного функционирования электрического контакта в течение длительного времени.

Элементы перемещения и фиксации. В контактных устройствах соединение возникает в результате механического перемещения контакт-деталей, что требует создания специальных элементов

конструкций, обеспечивающих необходимые пределы и точность перемещения.

Элементы конструкции, обеспечивающие защиту контакт-деталей от воздействия окружающей среды. Работоспособность и характеристики контактного устройства зависят от состояния контактирующих поверхностей, наличия на них пленок и т. д. Окружающая ЭА среда содержит пыль, влагу, различные газы и неизбежно влияет на состояние контактных устройств, их характеристики и свойства.

Элементы крепления. Контактные устройства должны быть механически установлены в конструкции ЭА и электрически соединены с монтажом. Поэтому в их конструкции должны быть предусмотрены элементы крепления и элементы, обеспечивающие включение в электрическую схему.

Вопросы

1. В чем принципиальное различие соединителей и коммутационных устройств (КУ)?
2. Какие главные требования предъявляются к соединителям и КУ?
3. Какие количественные показатели циклов переключений у соединителей и КУ?
4. Какие главные недостатки соединителей и КУ?
5. Перечислите основные составные части контактного устройства.

ГЛАВА 2

БЕСКОНТАКТНЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА

2.1. Принцип действия оптоэлектронных коммутационных устройств

В этой главе рассмотрен особый тип бесконтактных коммутационных устройств – оптопара.

Оптопары состоят из источника и приемника излучения (светоизлучателя и фотоприемника) с тем или иным видом оптической связи между ними, конструктивно связанных друг с другом. Принцип действия оптопары основан на преобразованиях электрической энергии в световую в излучателе и световой энергии в изменения параметров электрической цепи в фотоприемнике.

По степени сложности их делят на оптопару и оптоэлектронную микросхему. Оптопара состоит из светоизлучающего и фотоприемного элементов. Если в оптопаре в качестве фотоприемника используется транзистор, то она называется оптоэлектронным прибором. Оптоэлектронная микросхема состоит обычно из одной или нескольких оптопар и одного или нескольких транзисторов [3]. Конструкции оптопар имеют много общего с конструкцией полупроводниковых приборов и микросхем.

Основными характеристиками оптопар являются: сопротивление коммутируемой цепи в открытом и закрытом состояниях; максимальная скорость коммутации или длительность нарастания и спада импульсов; максимальные допустимые напряжения и токи цепей коммутации и управления; сопротивление развязки между управляющей и коммутируемой цепями; проходная, входная и выходная емкости.

Оптопары различаются по принципу функционирования фотоприемника, в котором под воздействием источника излучения происходит коммутация: на светоизлучатель подается управляющее электрическое напряжение (такие коммутационные устройства могут быть единичными, т. е. коммутировать одну цепь, и могут быть созданы в виде микросхем, в которых осуществляется коммутация многих цепей внутри аппаратуры); используются механическидвигающиеся детали (при этом имеется в виду, что светоизлучатель включен непрерывно). При этом коммутация осуществляется путем передвижения экрана (рис. 6). При его поднятии коммутируемая цепь замкнута. При введении экрана коммутируемая цепь размыкается [3].

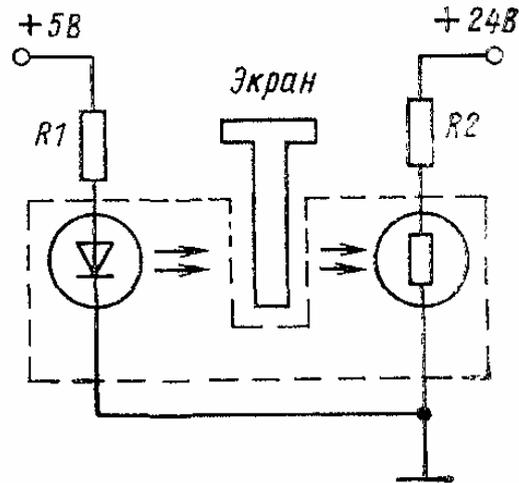


Рис. 6. Коммутация путем передвижения экрана

2.2. Источник излучения в оптопарах

Одной из основных частей оптопары является источник излучения. Наиболее универсальным видом излучателя, который используется в оптопарах, является полупроводниковый инжекционный светоизлучающий диод (СИД), обладающий высоким быстродействием, совместимостью с другими полупроводниковыми приборами, возможностью работы, как в импульсном, так и в непрерывном режиме, высокой надежностью. Важно отметить, что максимум излучения по частоте для основных материалов, из которых изготавливаются излучатели, близок к максимуму чувствительности по частоте для фотоприемников.

Принцип действия светодиода показан на рис. 7(а), где: p — область полупроводника, в которой, основными носителями являются дырки; n — область полупроводника, в которой основными носителями являются электроны; (+), (–) — носители заряда; Э1 и Э2—электроды. Вблизи p - n перехода для улучшения свойств СИД создается область, обедненная носителями. Если на светодиод подать напряженно $U_{УПР}$ такое, чтобы (+) был подан на n -область, а (–) на p -область, то носители (дырки и электроны) отойдут от p - n перехода, дополнительно увеличивая область, обедненную носителями. Светодиод будет закрыт, и ток через него протекать не будет — излучение отсутствует. Если изменить полярность напряжения, как показано на рис. 7 (а), то носители тока (электроны) из n -области, проходя через p - n переход, создадут ток. Аналогично дырки, проходя через p - n переход под действием отрицательного напряжения, также создадут ток. Светодиод в этом случае оказывается открытым.

При переходе носителей через p - n переход происходит рекомбинация неосновных носителей, которые перешли из одной области в другую, а

именно дырок, принадлежащих p -области, с электронами, принадлежащими n -области. Рекомбинация происходит только в полупроводниках, где возможен прямой переход электрона на другой энергетический уровень. При производстве СИД используются полупроводники типа GaAs, ZnAs, ZnSb, отличающиеся большой интенсивностью излучения. Процесс рекомбинации сопровождается световым излучением (обозначено стрелками), частота которого пропорциональна энергии запрещенной зоны полупроводникового материала [1].

Часть светового потока, излученного вследствие рекомбинации, покидает полупроводник и является полезным световым потоком. Остальная часть поглощается. Коэффициент полезного действия светодиода невысокий. Мощность светового потока, излучаемого СИД, составляет 10...15% электрической мощности, подводимой к p - n переходу.

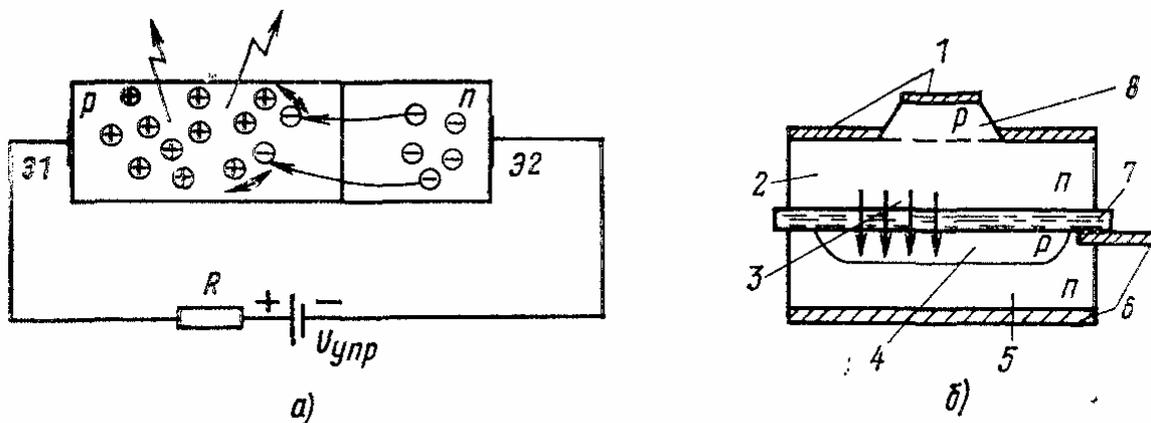


Рис. 7. Принцип действия светодиода

Быстродействие СИД определяется скоростью рекомбинации носителей и характеризуется временем нарастания и спада светового потока при подаче на него прямоугольного импульса тока управления. У распространенных в настоящее время серийных приборов это время составляет 0,05 ... 0,3 мкс.

Конструкция светодиода приведена на рис. 7 (б), где: 1 — электроды с выводами; 2, 8 — области светодиода соответственно с n - и p -проводимостью; 3 — световой поток; 6 — выводы коммутируемой цепи; 4, 5 — области фотодиода соответственно с p - и n -проводимостью; 7 — прозрачный слой, через который проходит световой поток. Светодиод оптопары обычно объединен с фотоприемником, поэтому на рисунке показан также фотодиод, принцип действия которого рассмотрен ниже.

Светодиоды применяются не только в составе оптопар, но и как самостоятельный элемент устройств отображения информации. Основными характеристиками светодиода являются вольт-амперная, спектральная и интенсивности излучения от тока.

На рис. 8 дана в качестве примера вольт-амперная характеристика светодиодов АЛ102А—АЛ102Д и ЗЛ102А—ЗЛ102Д при окружающей температуре +25 °С (1 и 3 — границы 95%-ного разброса, 2 — среднее значение). На рис. 9 показана зависимость силы света I в относительных единицах от тока диода $I_{пр}$.

Второй основной частью оптопары является фотоприемник, реагирующий на излучение светодиода. В зависимости от принципа действия фотоприемника оптопары делятся на резистивные, диодные, транзисторные и тиристорные. Рассмотрим принцип действия основных видов оптопары с разными фотоприемниками и их характеристики [4].

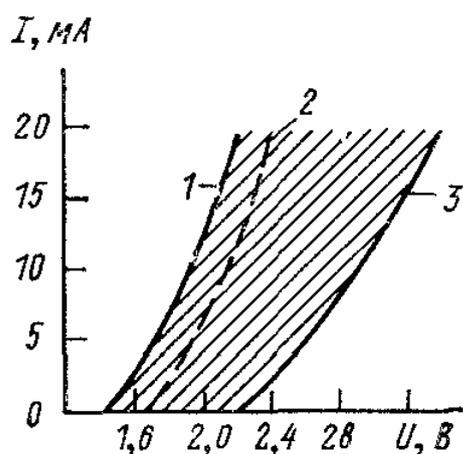


Рис. 8. ВАХ для АЛ102А—АЛ102Д
ЗЛ102Д

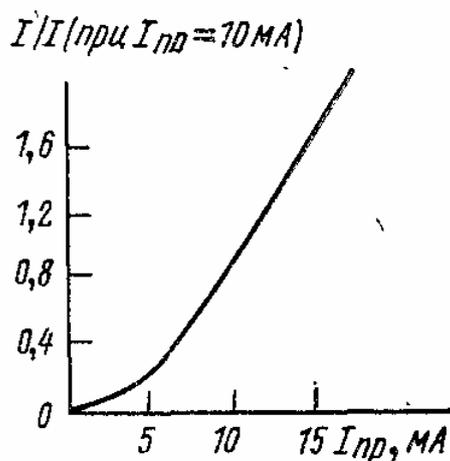


Рис. 9. ВАХ для ЗЛ102А-
ЗЛ102Д

2.3. Резистивная оптопара

В этом виде оптопары фотоприемником является фоторезистор. Схема и конструкция резистивной оптопары приведены на рис. 10. В широко используемых фоторезисторах применяют материалы CdS и CdSe. Для оценки качества коммутации основное значение имеет характер изменения выходного сопротивления резистивной оптопары при подаче управляющего напряжения на вход. Например, зависимость выходного сопротивления резистивной оптопары АОР104А от тока, протекающего через светодиод, при температуре окружающей среды 25 °С приведена на рис. 11. Как видно из рисунка, сопротивление изменяется в 10 000 раз — от сотен МОм до 50 ... 100 кОм.

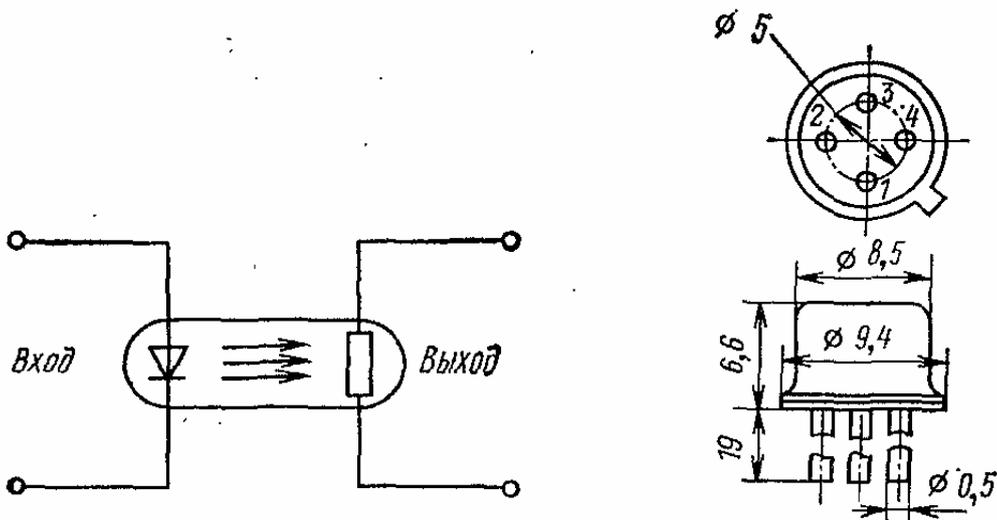


Рис. 10. Резистивная оптопара

В основе принципа действия фоторезистора лежит эффект фотопроводимости, т.е. изменения сопротивления полупроводника при освещении. Важной особенностью резистивной оптопары является линейность его выходной цепи. Из рис. 12, на котором приведены ее вольт-амперные выходные характеристики, следует, что между коммутируемым напряжением $U_{КОМ}$ и током $I_{КОМ}$ существует линейная зависимость. Управляющий ток $I_{УПР}$, не меняя линейности, изменяет значение сопротивления. При $I_{УПР}$, равном нулю, т. е. когда цепь должна быть разомкнута, выходное сопротивление максимально. При увеличении $I_{УПР}$ сопротивление уменьшается и при том же $U_{КОМ}$ ток в коммутируемой цепи увеличивается. При максимально допустимом токе управления для данного светодиода сопротивление будет минимально и падение напряжения на нем также минимально [1].

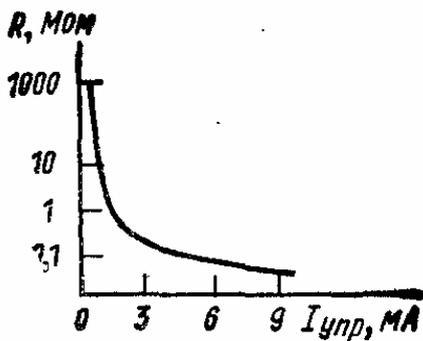


Рис. 11. Характеристика AOP104A

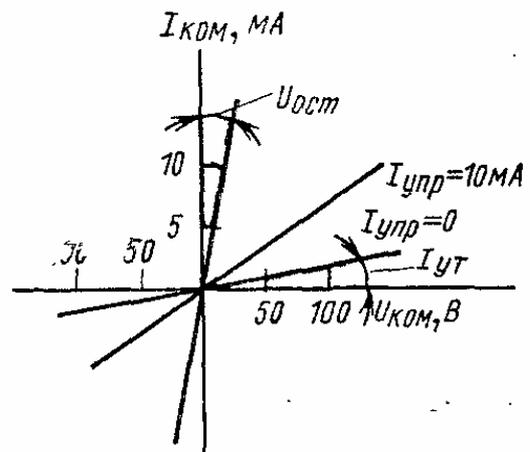


Рис. 12. ВАХ для AOP104A

Совместное рассмотрение входной вольт-амперной характеристики (цепи управления), приведенной на рис. 8 и вольт-амперной выходной характеристики (цепи коммутации), приведенной на рис. 12, позволяет

оценить возможности резистивной оптопары для разных применений. Благодаря линейности выходных вольт-амперных характеристик, резистивные оптопары могут быть использованы для коммутации постоянного и переменного токов и не вносят искажений в форму коммутируемого сигнала. Ограничения применения резистивных оптопар определяется, во-первых, тем, что существует конечное максимальное сопротивление, которое не позволяет полностью разомкнуть цепь, и конечное минимальное сопротивление, которое определяет падение напряжения на оптопаре, ограничивая возможности коммутаций цепей с малым внутренним сопротивлением. Например, использование оптопары для коммутации катушек индуктивности резонансных контуров не может быть рекомендовано, так как минимальное сопротивление оптопары составляет не менее 200 Ом. Такие оптопары можно использовать в некоторых случаях для замены реле при переключении цепей, так как при этом нелинейный характер входной вольт-амперной характеристики не имеет значения. Во-вторых, резистивные оптопары, обладая высокой фоточувствительностью, имеют самое низкое быстродействие, что делает невозможным их использование в высокочастотных цепях.

2.4. Диодная оптопара

В диодной оптопаре СИД применяется вместе с фотодиодом. Для создания фотодиодов используются некоторые виды полупроводников, например GaAlAs и GaAsP, в которых при изменении освещения фотодиода изменяются условия протекания тока. На рис. 13, где схематически изображен фотодиод: p -, n -области соответственно с дырочной и электронной проводимостью; 1 — световой поток (свет), падающий на фотодиод от СИД; 2 — прозрачный слой; 3 — выводы.

При отсутствии освещения вольт-амперная характеристика фотодиода такая же, как для обычного диода. При действии светового потока на активную область фотодиода (например, p -область, как показано на рис. 13) за счет фотонов генерируются (инжектируются) неосновные носители заряда — электроны. Если на p - n переходе фотодиода имеется напряжение, при котором он открыт (не рабочий режим), то инжектированные неосновные носители (электроны) соединяются с основными носителями p -области (дырками) и количество носителей, которое может участвовать в протекании тока, уменьшается. Ток в фотодиоде снижается. Если изменить полярность напряжения так, как это показано на рис. 13, то фотодиод будет находиться в рабочем режиме и инжектированные неосновные носители (электроны) проходят через p - n переход и протекают по внешней цепи, создавая ток в фотодиоде, который при отсутствии освещения ($I_{\text{УПР}}=0$) закрыт. Чем больше освещение, тем больше генерируется

носителей и тем больше ток в закрытом, при отсутствии освещения, диоде. Следовательно, чем выше управляющее напряжение на светодиоде ($U_{упр}$), тем больше ток через фотодиод.

На рис. 14 приведены выходные вольт-амперные характеристики диодной оптопары при разном токе управляющей цепи $I_{упр}$. Штриховой линией показана характеристика фотодиода при отсутствии освещения, т. е. при $I_{упр} = 0$. Как видно, в диодной оптопаре выходная вольт-амперная характеристика нелинейна, в отличие от резистивной оптопары. Зависимость между токами управления и коммутируемым также нелинейна.

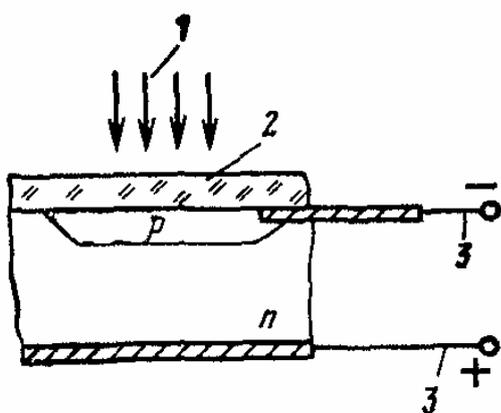


Рис. 13. Характеристика АОР104А

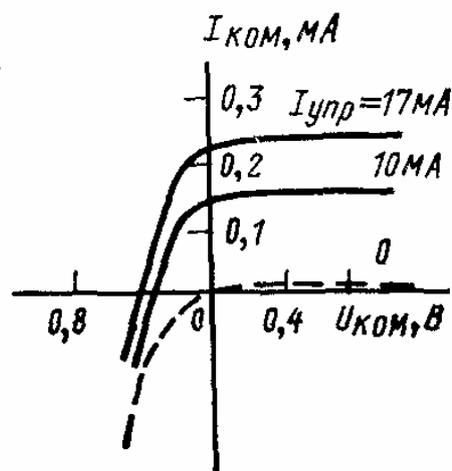


Рис. 14. ВАХ для АОР104А

Используя эффект компенсации, можно создать оптоэлектронный диодный коммутатор для аналогового сигнала (рис. 15). Как видно из схемы рис. 15, фотодиоды в этом случае включены встречно [5].

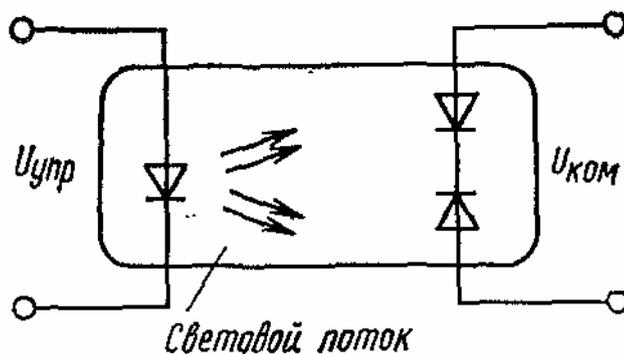


Рис. 15. Диодный коммутатор

В случае оптопары с одним фотодиодом при коммутируемом напряжении $U_{КОМ}=0$ коммутируемый ток $I_{КОМ}$ не равен нулю, а при $I_{КОМ}$ остаточное напряжение $U_{ост}$ не равно нулю. Это определяется нелинейностью характеристики и приводит к искажению аналогового

сигнала. В оптопаре с двумя фотодиодами (см. рис. 15) при их идеальной идентичности остаточные напряжения будут противоположны по знаку и одинаковы по значению, поэтому они скомпенсируются. Реально имеются небольшие остаточные напряжения (доли микровольт), и поэтому искажение аналогового сигнала незначительно.

Диодные оптопары обладают наивысшим быстродействием, однако не имеют внутреннего усиления сигнала.

2.5. Транзисторная оптопара

В транзисторной оптопаре используется не только фотоэффект, но и эффект усиления фототока. Благодаря использованию транзистора в оптопаре токовая чувствительность, т. е. изменение выходного тока

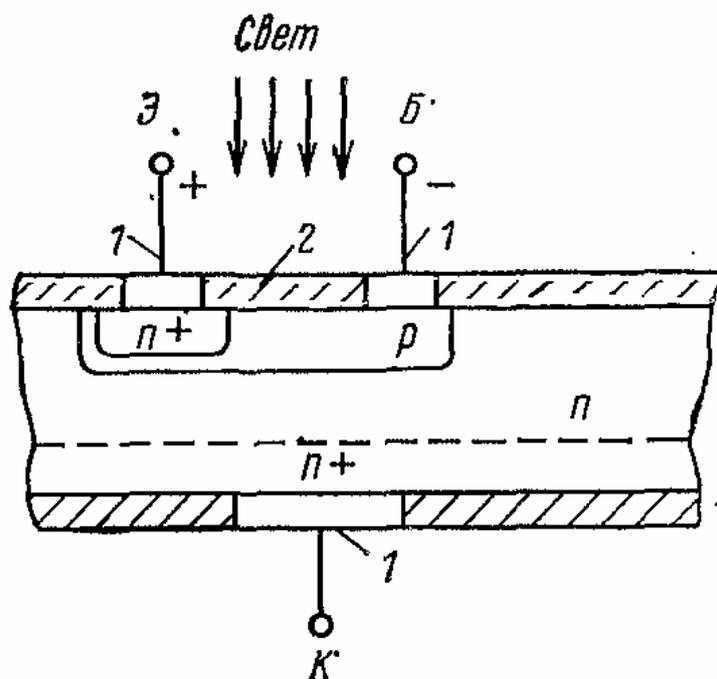


Рис. 16. Фотоприемник транзисторной оптопары

при изменениях входного, возрастает в соответствии с коэффициентом усиления транзисторной части. Фотоприемник транзисторной оптопары схематически изображен на рис. 16, где n^+ — легированная область эмиттера (Э) с электронной проводимостью; p — область базы (Б) с дырочной проводимостью; n — область коллектора (К) с электронной проводимостью; n^+ — легированная область коллектора с электронной проводимостью; 1 — металлические электроды с выводами; 2 — прозрачный слой.

Через прозрачный слой на фотоприемник падает световой пучок от светодиода. Если база не освещена, то такой фотоприемник будет работать как обычный транзистор (режим не рабочий) и ток по цепи коллектора будет протекать только при условии, когда цепь эмиттер — база открыта, т. е. на базу подано положительное, а на эмиттер — отрицательное напряжение.

В рабочем режиме значение тока, протекающего в транзисторе, должно определяться действием света, поступающего от светодиода через световод. Для этого фотодиод, образованный эмиттером и базой, как было показано выше, при отсутствии света закрыт. В этом случае на эмиттер должно быть подано положительное напряжение, а на базу отрицательное. Ток по цепи коллектора не протекает, поскольку неосновные носители не переходят из области эмиттера в область базы и не могут участвовать в образовании тока коллектора [1].

Как только от светодиода на область базы типа p будет попадать световой поток, фотоны, взаимодействуя с атомами, будут «выбивать» из них электроны. Если область базы тонкая, то создаются благоприятные условия для того, чтобы положительное напряжение коллектора вызвало движение электронов через $p-n$ переход к коллектору. По цепи коллектора начинает протекать ток. В этом случае одновременно используется и эффект воздействия света на фотодиод, образованный эмиттером и базой, и эффект усиления в транзисторе. Характеристики у транзисторной оптопары лучше, но вместе с тем, стабильность ниже и шумы больше чем у диодной. Характеристика транзисторной оптопары приведена на рис. 17. Как видно, выходная вольт-амперная характеристика транзисторной оптопары нелинейна, так же, как и характеристика диодной оптопары.

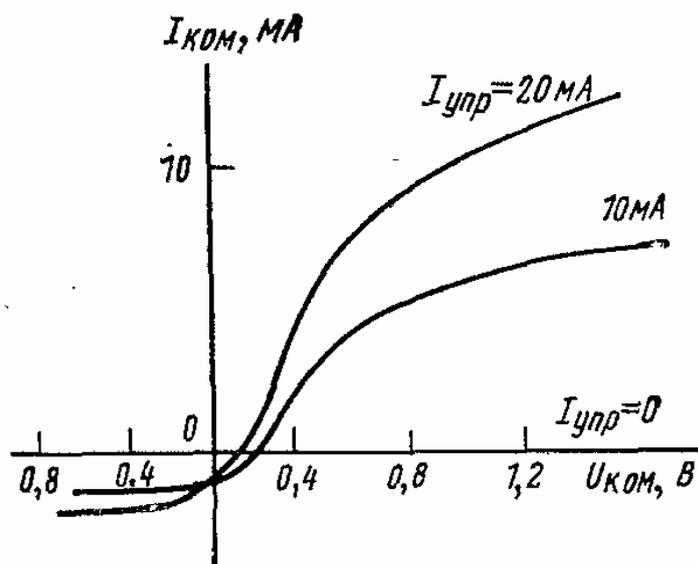


Рис. 17. Фотоприемник транзисторной оптопары

В связи с изложенным, коммутация сигнальных цепей, не допускающих искажения формы сигнала, связана со следующими трудностями. На линейном участке дифференциальное сопротивление транзисторной оптопары, характеризующее протекание переменной составляющей тока, много меньше, чем у диодной, а тем более у резисторной, и составляет всего несколько десятков Ом. Это также следует из рис. 17, где в области коммутируемого напряжения, равного $0,2 \dots 0,4$ В, ток $I_{\text{ком}}$ значительно изменяется при изменении $U_{\text{упр}}$. При использовании этих оптопар для коммутации аналоговых сигналов возникают те же трудности, что и при использовании диодных оптопар. Однако также как и для диодных оптопар, разработаны схемы с компенсацией. Пример простейшей схемы с компенсацией приведен на рис. 18. При этом фото-ЭДС, наводимые на промежутке эмиттер — база, компенсируют друг друга. Остаточное напряжение в этом случае составляет всего десятки микровольт. Сопротивление в открытом состоянии может быть равно нескольким десяткам Ом [5].

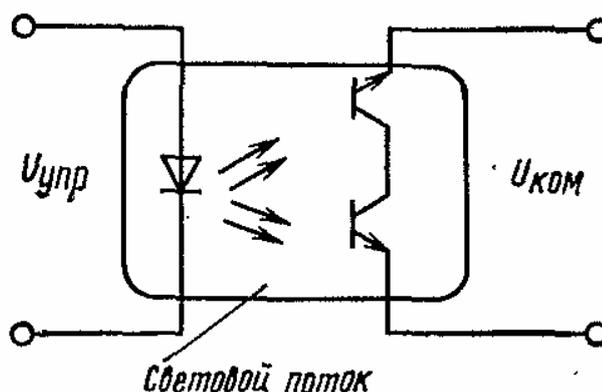


Рис. 18. Простейшая схема с компенсацией

2.6. Свойства оптоэлектронных коммутаторов

Из ранее сказанного видно, что оптопары можно применять для коммутации электрических цепей с использованием электрического управляющего напряжения (тока), что удобно для дистанционного управления, а также в случаях, когда управление должно производиться автоматически. При таком применении оптопар необходимо иметь в виду, что если не использовать компенсацию, в коммутируемой цепи (кроме резистивной оптопары) будут наблюдаться нелинейные искажения. В этом случае сигналы, несущие информацию, перед коммутацией должны преобразовываться в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) в цифровой код. Поэтому более перспективным является использование оптоэлектронных коммутаторов аналогового сигнала с компенсацией.

Если оптопары использовать в соединителях, то из-за нелинейности их характеристик сигналы также нужно преобразовывать в АЦП в цифровой код.

Рассмотрим достоинства и недостатки оптоэлектронных коммутаторов [3].

Основные достоинства: практически полная электрическая (гальваническая) развязка между входом и выходом; малая проходная емкость; однонаправленность распространения сигналов; широкая полоса пропускания по частоте, возможность коммутировать импульсные сигналы, постоянную составляющую, аналоговые сигналы, цифровые сигналы; конструкторско-технологическая совместимость с полупроводниковыми приборами и микросхемами; высокая помехозащищенность канала, возможность построения сложных разветвленных устройств управления; управление работой оптопары как входным сигналом, так и оптическим каналом.

К недостаткам можно отнести: значительную потребляемую мощность и низкий КПД, так как необходимо двойное преобразование энергии; чувствительность параметров к воздействию повышенной температуры и ядерной радиации; «старение» параметров; высокий уровень собственных шумов; большое контактное сопротивление в открытом состоянии (единицы и сотни Ом), в то время как контактные устройства имеют контактное сопротивление, равное десятым и сотым долям Ом; существенное ограничение коммутируемой мощности, в то время как контактные устройства при соответствующих конструкциях и габаритах могут коммутировать очень большие мощности (1 кВт и больше); существенное ограничение коммутируемого напряжения (известны конструкции контактных переключателей с напряжениями, не достижимыми для оптоэлектронных коммутаторов).

Вопросы

1. Перечислите основные виды оптопар.
2. Что является основной составной частью оптопары?
3. Назовите основные характеристики оптопар.
4. В чем заключаются главные достоинства и недостатки оптоэлектронных коммутаторов?
5. Что означает понятие открытый и закрытый диод?

ГЛАВА 3 ТЕОРИЯ КОНТАКТА

3.1. Контактное сопротивление

Включение в электрическую цепь разъединяющего элемента всегда связано с введением дополнительного сопротивления. Это легко доказать на основании следующего опыта: если мы имеем проводник, по которому протекает ток I и между точками А и Б заметим падение напряжения U , то по закону Ома можем определить сопротивление этого участка проводника – R_0 , теперь, если разрезать проводник, соединить его части в стык и вновь измерить падение напряжения между точками А и Б, то оно несколько увеличится и станет равным U' , что указывает на увеличение сопротивления проводника тех же геометрических размеров:

$$U' = (R_0 + R_K) \cdot I.$$

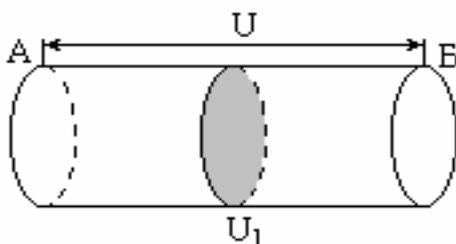


Рис. 19. Контактное сопротивление двух тел

Дополнительное сопротивление – R_K – называется контактным сопротивлением.

Контактное сопротивление – R_K – состоит из двух частей и в первом приближении можно считать, что они не зависят друг от друга:

$$R_K = R_{\Pi} + R_{\text{ПЕР}}.$$

Первая составляющая – R_{Π} – вызывается поверхностными пленками, образующимися на контактных поверхностях и препятствующих протеканию тока. Вторая составляющая – $R_{\text{ПЕР}}$ – вызывается наличием неровностей на поверхности металла, в результате, соединенные в стык проводники соприкасаются лишь в отдельных точках. По проводимости эти точки можно разделить на три группы:

1. Металлические соприкасающиеся поверхности.
2. Квазиметаллические соприкасающиеся поверхности, покрытые газовой пленкой толщиной в несколько молекул.
3. Несущие поверхностные пленки с высоким сопротивлением – R_{Π} .

Сопротивление металлических поверхностей в отдельных местах приводит к стягиванию линий тока к местам с хорошей проводимостью.

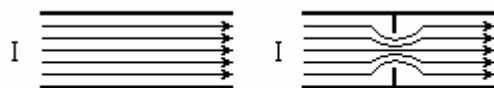


Рис. 20. Пример эффекта стягивания

При этом плотность тока может достигать величины $10^7 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$. Стягивание обуславливает дополнительное сопротивление контакта, так называемое переходное сопротивление $R_{\text{ПЕР}}$.

Точное определение связи между переходным сопротивлением, формой поверхности соприкосновения и удельным сопротивлением соприкасающихся проводников, зависящих от температуры, довольно сложно. Поэтому обычно ограничиваются решением, независимым во времени случаем симметричных контактов, приняв, что в месте стягивания нет перепада температур и, следовательно, удельное сопротивление постоянно.

Эта задача сводится к решению частного дифференциального уравнения второго порядка, являющегося основным уравнением теории потенциала:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0.$$

В решении, пригодном для нашего случая, эквипотенциальные поверхности будут представлять собой эллипсоиды, форма которых с увеличением расстояния от поверхности соприкосновения будет приближаться к полушариям. Контактная поверхность представляет собой круг, возникший из эллипсоида вследствие равенства его осей.

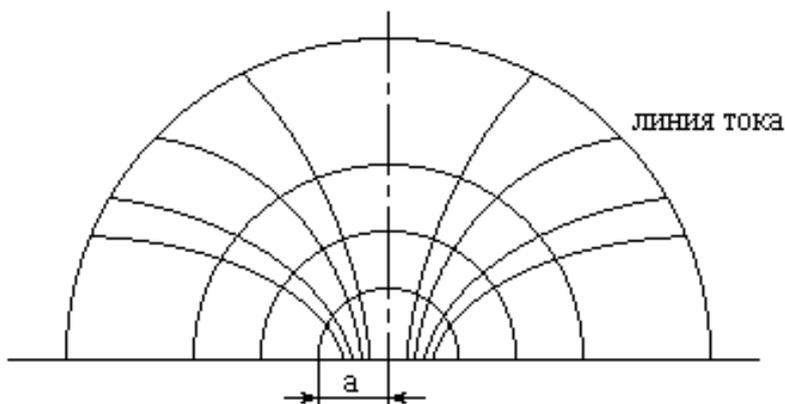


Рис. 21. Контактная поверхность и линии тока

Для переходного сопротивления обеих полусфер получим выражение:

$$R_{\text{ПЕР}} = \frac{\rho}{2 \cdot a},$$

и для падения напряжения в области стягивания:

$$U_{\text{ПЕР}} = I \cdot R_{\text{ПЕР}} = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot a},$$

где: $R_{\text{ПЕР}}$ - переходное сопротивление, Ом;

$U_{\text{ПЕР}}$ - падение напряжения из-за наличия переходного сопротивления, В;

ρ - удельное сопротивление проводника, Ом·см;

a - радиус круговой поверхности соприкосновения, см.

Если контакты изготовлены из разных металлов, то выражение принимает вид:

$$R_{\text{ПЕР}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2 \cdot a}.$$

Плотность тока (j) не является постоянной для всей поверхности соприкосновения, а увеличивается по направлению к ее краю. Для любой точки поверхности находящейся от центра на расстоянии (z) она составляет:

$$j(z) = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \frac{1}{\sqrt{a^2 - z^2}}.$$

Установлено, что половина всего тока протекает внутри окружности с радиусом 0,866а.

Формула для $R_{\text{ПЕР}}$ при больших размерах контактов соответствует экспериментальным данным если:

1. между контактами нет поверхностных пленок, сопротивление которых соизмеримо с $R_{\text{ПЕР}}$;
2. отдельные контактные точки находятся на таком расстоянии, что линии тока не влияют одна на другую;
3. проходящие токи настолько малы, что контактное сопротивление не меняется в результате выделения джоулева тепла.

Первое условие на практике не всегда выполняется и, особенно при малых контактных усилиях, протекание тока через контакт происходит через посторонние пленки, покрывающие контактные поверхности. Если эти пленки мономолекулярные адсорбирующие, то дополнительным сопротивлением можно пренебречь.

При толстых химических пленках типа окислов и сульфидов, этого делать нельзя, т.к. их сопротивление обычно больше переходного сопротивления. В этом случае нельзя найти общее сопротивление простым сложением двух составляющих, т.к. поверхностная пленка изменяет распределение линий тока вблизи поверхности соприкосновения и

распределение плотности тока, при этом, становится более равномерным по всей поверхности и переходное сопротивление увеличивается.

Для случая, когда переходное сопротивление металлического контакта мало по сравнению с поверхностным сопротивлением:

$$R_{\text{ПЕР}} = \frac{2 \cdot \rho}{\pi \cdot a}.$$

В общем случае ток будет проходить через несколько контактных площадок, неравномерно распределенных по кажущейся поверхности соприкосновения до тех пор, пока они удалены друг от друга настолько, что их линии тока не влияют друг на друга. Общее переходное сопротивление равно сумме параллельно включенных сопротивлений отдельных областей стягивания:

$$\frac{1}{R_{\text{ПЕР}}^n} = \frac{1}{\rho} \sum_1^n a_n.$$

Если контактные площадки сближаются, то второе условие теряет силу и переходное сопротивление увеличивается.

Условие третье также выполняется очень редко. Обычно площадь контакта нагревается, образуется температурный перепад по обе стороны поверхности сопротивления вглубь контактирующих частей. При этом удельное сопротивление обоих проводников будет увеличиваться, и повышать переходное сопротивление.

Если учесть, что для симметричного контакта пограничная поверхность имеет максимальную температуру $T_{\text{МАКС}}$ в месте стягивания тока и потенциал, который по сравнению с удаленной точкой в теле контакта (при температуре T_0) равен половине контактного напряжения U . При условии, что разница температур T_0 и $T_{\text{МАКС}}$ не слишком велика, можно получить простую формулу для прироста сопротивления

$$R(T_{\text{МАКС}}) = R(T_0) \cdot \left[1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot (T_{\text{МАКС}} - T_0) \right],$$

где: $R(T_{\text{МАКС}})$ – переходное сопротивление в нагретом состоянии, Ом;

$R(T_0)$ – переходное сопротивление без нагрева, Ом;

α – температурный коэффициент удельного сопротивления, $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ (при $t = T_0$).

Нужно иметь ввиду, что при импульсной работе, когда термическое равновесие установиться не может, сопротивление будет значительно меньше:

$$R(T_{\text{МАКС}}) = R(T_0) \left\{ 1 + \frac{1}{5} \cdot \ln[1 + \alpha \cdot (T_{\text{МАКС}} - T_0)] \right\}.$$

3.2. Эквивалентная схема контактного сопротивления

Сопротивление контакта больше суммы сопротивлений двух контактирующих тел на значение переходного сопротивления контакта R_{Π} , которое может быть значительным. Наличие сопротивления R_{Π} обусловлено: присутствием на поверхности металла тонких пассивирующих пленок, увеличивающих сопротивление на величину $R_{\Pi\Pi}$ (для благородных металлов этим сопротивлением можно пренебречь); прохождением тока по выступам, имеющим в сумме меньшую площадь поперечного сечения, чем тело контакта, что увеличивает сопротивление на $R_{\text{В}}$; эффектом «стягивания», состоящим в том, что ток из одного металла в другой проходит в точках, редко расположенных на поверхности, в результате путь тока по проводнику усложняется. Поскольку путь тока удлиняется, сопротивление увеличивается на $R_{\text{СТ}}$.

Таким образом, эквивалентную схему контактного сопротивления контакта можно представить на рис. 22,

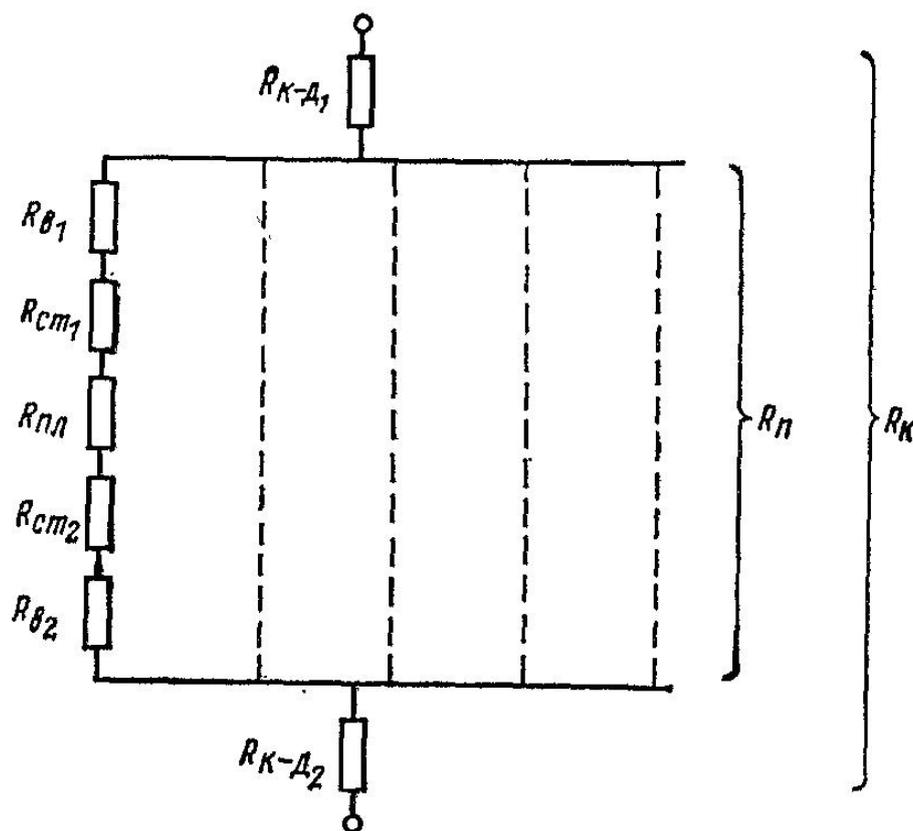


Рис. 22. Эквивалентная схема контактного сопротивления

где: $R_{\text{В}1}$ и $R_{\text{В}2}$ — сопротивления, обусловленные выступами на обеих поверхностях;

$R_{\text{СТ}1}$, $R_{\text{СТ}2}$ — сопротивления стягивания для обоих контактов пары;

$R_{\text{К-Д}1}$, $R_{\text{К-Д}2}$ — сопротивление контакт-деталей ($R_{\text{К-Д}1} + R_{\text{К-Д}2} = R_{\text{К-Д}}$);

$R_{\text{ПЛ}}$ — сопротивление, обусловленное пленками.

Сопротивления $R_{\text{В1}}$, $R_{\text{В2}}$, $R_{\text{СТ1}}$, $R_{\text{СТ2}}$, $R_{\text{ПЛ}}$ соединены в каждой ветви последовательно. Их параллельное соединение составляет переходное сопротивление $R_{\text{П}}$. Оно определяется эффективной площадью контактирования и равно отношению падения напряжения на контактном переходе к току через этот переход. Контактное сопротивление $R_{\text{К}}$ равно сумме ($R_{\text{К-д}} + R_{\text{П}}$). В среднем можно считать переходное сопротивление по упрощенной формуле:

$$R_{\text{П}} = \frac{0.12 \cdot \rho \cdot E \cdot h_{\text{в}}}{Q \cdot (1 - \mu)},$$

где:

ρ - удельное сопротивление материала контакта;

μ - коэффициент Пуассона (механическая характеристика);

E – модуль упругости материала;

Q – усилие контактного нажатия;

$h_{\text{в}}$ – средняя высота выступа.

В зависимости от приложенной силы изменяется количество соприкасающихся точек — параллельных цепей (штриховые линии на рис. 22). На надежность контактирования в основном влияет сопротивление $R_{\text{ПЛ}}$ и контактное нажатие. Если усилие мало или пленки прочные, то $R_{\text{ПЛ}}$ велико. При небольшом нажатии точек соприкосновения мало. Поэтому $R_{\text{П}}$ может резко увеличиться и в цепи наступит разрыв. Чтобы этого не происходило, надо увеличивать нажатие. Но при больших нажатиях происходят большие деформации, и, следовательно, быстрый износ.

Минимальное значение контактного нажатия Q , достаточное для контакта, невелико (для золота 1 гс, для серебра 15 гс). При этом переходное сопротивление составляет, например, для золота, примерно, 30 мОм, для серебра — 3 мОм. Однако в контактных устройствах (переключателях) редко применяется такое нажатие, обычно оно больше. Это обусловлено несколькими причинами: контактное нажатие, создаваемое пружиной, имеет большие отклонения, поэтому среднее значение нажатия должно быть в несколько раз больше минимально допустимого (примерно в 3 раза); переходное сопротивление и, следовательно, Q являются ограничивающими факторами для увеличения максимального допустимого значения тока $I_{\text{МАХ}}$, зная которое можно найти допустимое переходное сопротивление, контактное нажатие и площадь контактов; во многих случаях важно не только значение переходного сопротивления, но и его стабильность. При малых Q включения сопровождаются различным расположением контактных точек, которое и обуславливает статическое изменение переходного сопротивления $\Delta R_{\text{ДСТ}}$. С увеличением Q эта статическая нестабильность снижается.

3.3. Переходное сопротивление и контактное нажатие (усилие)

В действительности каждый материал деформируется при контактном усилии, при этом наблюдается два вида деформации - упругая, если усилие не велико, и пластическая, если усилие превышает определенную для данного материала границу. При замыкании контактов преобладает пластическая деформация.

Процесс механического замыкания контакта можно представить следующим образом: сначала соприкасаются наиболее высокие микровыступы, покрытые газовой оболочкой или поверхностной пленкой. При давлении несколько десятых тонны на 1 см^2 толщина газовых оболочек уменьшается до слоя в два-три атома, при этом выступы подвергаются упругой деформации. При увеличении давления материал начинает «течь», разрываются поверхностные пленки, поверхность соприкосновения увеличивается, возникают новые точки соприкосновения за счет небольших микровыступов. (Предел текучести металла, лежащий в пределах нескольких тонн на 1 см^2 , легко достигается при нажатии в несколько грамм, за счет очень малых поверхностей контакта). При достаточно большой нагрузке отдельные контактные точки растекаются и заполняют кажущуюся поверхность соприкосновения.

Общую зависимость величины контактной поверхности от контактного усилия вывести невозможно, с достаточной точностью можно применить выражение для круглых контактных поверхностей:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot P \cdot \left(\frac{1 - \sigma_1^2}{E_1} + \frac{1 - \sigma_2^2}{E_2} \right) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)^{-1}},$$

где: a - радиус круглой поверхности соприкосновения, см;

P - контактное давление, кг;

$\sigma_{1,2}$ - коэффициенты Пуассона для контактных элементов;

$E_{1,2}$ - модуль упругости, кг/см²;

$r_{1,2}$ - радиусы контактных элементов, см.

Это соотношение справедливо для контактов шар-шар, шар-плоскость, взаимно перпендикулярные цилиндры.

Для золота (Au), серебра (Ag) и палладия (Pd), коэффициент Пуассона которых примерно равен 0,4, формула упрощается:

$$a = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot r}{E}},$$

для железа (Fe), никеля (Ni) и меди (Cu) (коэффициент Пуассона - 0,3):

$$a = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot r}{E}}.$$

Подставив в первоначальное выражение для переходного сопротивления, получим соотношение между контактным усилием и сопротивлением (для золота, серебра и палладия):

$$R_{\text{ПЕР}} = 0,58 \cdot \rho \cdot \sqrt[3]{\frac{E}{P \cdot r}}$$

Процесс деформации контактов очень сложен, т.к. пластический материал течет не только в стороны, но и деформируется в глубь контакта, при этом происходит укрепление кристаллической решетки и предел текучести также увеличивается с увеличением нагрузки. При достаточно большой нагрузке твердость H может рассматриваться как постоянная величина.

Для состояния равновесия можно принять:

$$P = F \cdot f = F \cdot H = \pi \cdot a^2 \cdot H,$$

где: P - контактное давление, кг;

F - поверхность соприкосновения, см²;

f - предел текучести, кг/см²;

a - радиус шаровой поверхности соприкосновения, см;

H - контактная твердость материала, кг/см².

(H не равнозначна твердости по Бринеллю H_B , но мало отличается от нее и часто на практике H заменяют твердостью H_B).

Выражение приводит к связи между переходным сопротивлением шаровой поверхности соприкосновения и контактным усилием при пластической деформации:

$$R_{\text{ПЕР}} = 0,89 \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{H}{P}}$$

Если обе токопроводящие части выполнены из разных материалов, то с достаточной точностью можно использовать выражение:

$$R_{\text{ПЕР}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \cdot \sqrt{\frac{H^X}{P}},$$

где: H^X - твердость более мягкого материала, кг/см².

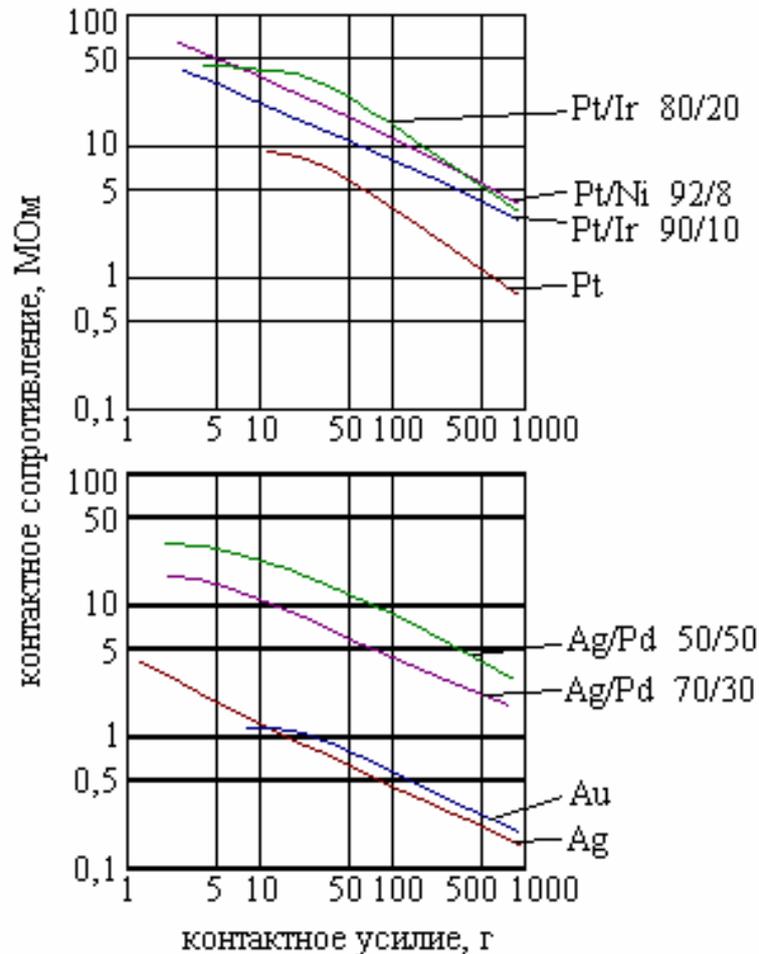


Рис. 23. Зависимость контактного сопротивления от контактного усилия

Эта формула, несмотря на ряд упрощений, дает результаты, хорошо согласующиеся с экспериментом. На рисунке показаны кривые сопротивлений взаимно-перпендикулярных цилиндров, выполненных из различных материалов. При оценке материалов по приведенным графикам следует учитывать их поведение в рабочих условиях.

Например, для контактов с небольшой электрической нагрузкой золото предпочтительнее серебра, плохо переносящего атмосферу сернистых газов. Если возможно возникновение дуги, отдают предпочтение сплаву платина-иридий (80/20) перед сплавом платина-никель (92/8), т.к. никель в противоположность иридию легко окисляется и образует на поверхности прочную пленку окисла.

Введение твердости как параметра в выражение переходного сопротивления приводит к тому, что, во-первых - контактное сопротивление будет зависеть от предварительной обработки контакта. Не безразлично, припаивается ли контакт к поверхности пружины и поэтому является мягким или из того же материала под прессом делают контакт-заклепку, т.е. подвергают холодной обработке и получают твердым.

Переходное сопротивление для мягкого контакта получают меньшим, чем для твердого. Однако на практике предпочитают твердые контакты, особенно для работы в открытой атмосфере, потому что в мягкую поверхность легко въедаются частицы пыли, влияющие на прохождение тока. Также предпочитают твердые контакты, когда момент замыкания играет существенную роль, поскольку вероятность изменения расстояния между контактами из-за сплющивания уменьшается.

Во-вторых, - твердость H зависит от продолжительности нагрузки и от температуры материала, она уменьшается с течением времени и приближается к пограничной величине, что объясняется стремлением металлов переходить от нарушенного состояния (при холодной обработке) в нормальное (более мягкое состояние) при этом температура играет решающее значение.

Приближенно зависимость между твердостью (H), температурой (T) и временем действием нагрузки (t) можно выразить следующим образом:

$$H = H_0 \cdot e^{-\alpha \cdot T \cdot (\beta + \gamma) \cdot \ln t},$$

где: α - температурный коэффициент удельного сопротивления, 1/град;

β - температурный коэффициент теплопроводности, 1/град;

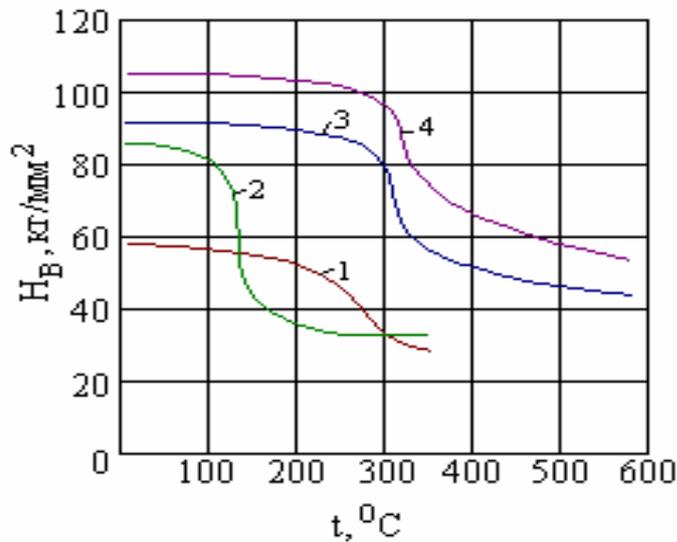
γ - перенос металла, вызванный дугой, 10^{-6} см³/кулон

(α , β и γ - величины, характеризующие материал контакта).

Обычно изменение твердости происходит тем медленнее, чем выше модуль упругости металла.

При пороговой температуре, равной температуре рекристаллизации твердость падает до значения ее для раскаленного металла. Пороговая температура или температура потери прочности (т.к. материал резко меняет свою прочность) зависит от степени деформации контакта и от содержания посторонних примесей. Чем сильнее деформация контакта, тем ниже температура рекристаллизации. Однако, за счет незначительных количеств посторонних примесей ($10^{-4} \div 10^{-2}$) можно сдвигать эту температуру в область более высоких температур, но при этом будет увеличиваться контактное сопротивление.

Например, добавкой к серебру долей % никеля, меди или кремния получают т.н. твердое серебро, со сдвинутыми температурами. Однако применять его целесообразно там, где важным является износостойкость и повышенная устойчивость к слипанию и свариванию, а не величина контактного сопротивления.



- 1 - мягкое серебро, мало деформированное
- 2 - мягкое серебро, сильно деформированное
- 3 - серебро с 0,1% никеля
- 4 - серебро с 1,35% кремния и 0,15% никеля

Рис. 24. Твердость серебра различного вида и состава

Переходное сопротивление, изменяющееся при наличии механических воздействий, называется динамической нестабильностью. Изменения переходного сопротивления тем больше, чем меньше контактное усилие Q .

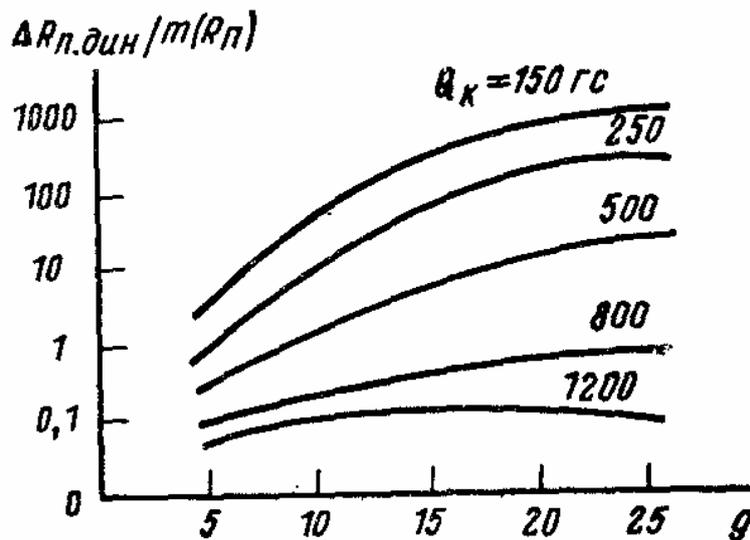


Рис. 25. Кривые динамической нестабильности

На рис. 25 приведены экспериментальные кривые зависимостей динамической нестабильности (отношение максимальных выбросов сопротивления к его среднему значению) для соединителя 2PM18×7 при

частоте 150 Гц от ускорения вибрации g . При конструировании следует учитывать, что с ростом контактного нажатия увеличиваются габариты элементов конструкции. При увеличении контактного нажатия у врубающихся и вставных контактов увеличивается *усилие сочленения* (расчленения). Если число разъединяемых пар большое, то суммарное усилие сочленения при увеличении контактного нажатия может оказаться значительным, при этом затрудняется выполнение сочленения и расчленения оператором.

3.4. Зависимость сопротивления контакта от напряжения

При достижении температуры потери прочности все процессы протекают в материале контакта быстрее и на большую глубину. Вследствие этого поверхности соприкосновения контактов под нагрузкой увеличиваются, и контактное сопротивление скачкообразно падает. Это хорошо видно из графика зависимости сопротивления от напряжения. При этом любому падению напряжения в области стягивания тока соответствует вполне определенная температура.

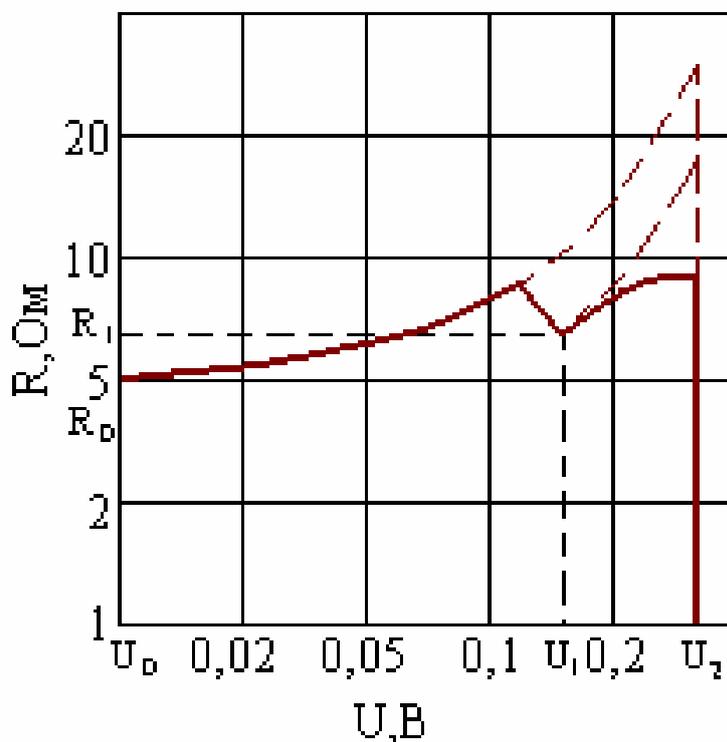


Рис. 26. Зависимость R_k от U

Два контакта должны прижиматься друг к другу с такой силой, чтобы поверхность соприкосновения F была только металлической. Контактное сопротивление для данного давления обозначим через R_0 , а падение

напряжения в области стягивания - U_0 . При возрастании тока падение напряжения и температура увеличиваются, а вместе с температурой увеличивается контактное сопротивление. При достижении напряжения U_1 , поверхность соприкосновения возрастает на величину, соответствующую уменьшению прочности металла от нормальной до прочности рекристаллизационного состояния, а контактное сопротивление падает до значения R_1 .

В дальнейшем, кривая теоретически должна идти вверх, однако при относительно высоких температурах заметна текучесть металла.

При неизменном токе контактирующие поверхности увеличиваются, и кривая отклоняется вниз. Это отклонение тем больше, чем дольше протекает ток через контакт, и чем легче металл контакта деформирует при данных давлении и температуре. При увеличении тока падение напряжения достигает пороговой величины U_2 , которая является максимальной. Дальнейшее увеличение тока лишь уменьшает контактное сопротивление, т.к. при этом плавятся другие участки в месте контакта, что приводит к увеличению токопроводящей поверхности. Кривая R в этом случае резко спадает.

Характер кривой изменяется незначительно и в том случае, когда поверхность соприкосновения не является чисто металлической и имеет участки, покрытые плохо проводящей пленками, только начальное сопротивление R_0 сдвинуто вверх. Изгиб в первой области будет более плавным, т.к. токопроводящая поверхностная пленка характеризуется отрицательным температурным коэффициентом.

Увеличение сопротивления при повышающейся температуре в металле частично компенсируется в этом случае улучшением проводимости поверхностной пленки.

В области более высоких напряжений может произойти уменьшение сопротивления R_0 , если часть контактных площадок покрыта поверхностной пленкой и несет на себе часть контактного усилия. Только при разрушении контактных пленок в результате нагрева, контактное сопротивление снижается до величин, характеризующих сопротивление чисто-металлического контакта.

Для пересчета напряжения, соответствующего значениям U_1 и U_2 в температуру T_{II} и T_{III} используют правило (Видеманна-Франца-Лоренца) по которому соотношение тепло- и электропроводность приблизительно одинаково для всех металлов-проводников и зависит от абсолютной температуры.

$$\rho \cdot \lambda = L \cdot T,$$

где: ρ - удельное сопротивление материала, Ом·см;

λ - удельная теплопроводность, $\frac{\text{Вт}}{\text{град} \cdot \text{см}}$;

L - коэффициент Лоренца, $\frac{В^2}{град.^2}$, ($L = 2,4 \cdot 10^{-8} \frac{В^2}{град.^2}$);

T - абсолютная температура, $^{\circ}К$.

Используя это свойство, находят формулу для определения максимальной температуры переходной зоны и ее зависимость от падения напряжения в области стягивания:

$$L \cdot (T_{\text{МАКС}}^2 - T_0^2) = \frac{U^2}{4},$$

где: U - контактное падение напряжения, $В$.

Максимально допустимая температура переходной зоны определяется температурой размягчения (рекристаллизации) материала контакта. Она находится в пределах от 100 до 1000 $^{\circ}С$; для золота (Au) $t = 100$ $^{\circ}С$, для серебра (Ag) $t = 180$ $^{\circ}С$, для вольфрама (W) $t = 1000$ $^{\circ}С$. Выше этой температуры происходит скачкообразное изменение площади контактирования и переходного сопротивления.

Формула для определения максимальной температуры справедлива при выполнении следующих условий:

1. распределение температур в области стягивания не должно меняться во времени, т.е. существует неизменное тепловое равновесие,
2. потери тепла с поверхности за счет излучения теплопроводности минимальны,
3. материал контактов подчиняется закону Видеманна-Франца-Лоренца.

Условия 1 и 2, как правило, выполняются ввиду относительно малых размеров контактных поверхностей. Третье условие не выполняется применительно к сплавам и применимо ограниченно к чистым металлам. Формула:

$$\rho \cdot \lambda = L \cdot T$$

дает хорошее совпадение для меди, серебра и золота при температурах от 25 $^{\circ}С$ до точки плавления, а для металлов платиновой группы дает сильное отклонение. Коэффициент Лоренца можно рассматривать постоянным в интервале температур от 150 до 200 $^{\circ}С$.

Для благородных металлов в интервале, где лежит температура потери прочности (400-800 $^{\circ}К$):

$$T_{\text{МАКС}} = 3100 \cdot \sqrt{U^2 + 0,009},$$

для платиновой группы большее совпадение дает эмпирическая формула:

$$T_{\text{МАКС}} = 2800 \cdot (U - a),$$

где: a - постоянная (для палладия 0,095 и платины 0,075).

В этих формулах интерес представляет напряжение, при котором происходит плавление металла контакта, поскольку это напряжение определяет тенденцию материала контакта к свариванию.

Для приближенного расчета допустимого тока через контакт применяют эмпирическую формулу:

$$I_{\text{доп}} \leq j \cdot F_{\text{мин}} \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{з}} \cdot K_{\text{д}},$$

где: $I_{\text{доп}}$ - допустимый ток через контакт, А;

j - максимально допустимая плотность тока, А/мм²;

$F_{\text{мин}}$ - наименьшее сечение контактной пары, мм²;

$K_{\text{п}}$ - коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта;

$K_{\text{д}}$ - коэффициент, учитывающий влияние допусков на толщину материала, ($K_{\text{д}}=1,1-1,3$);

$K_{\text{з}}$ - коэффициент запаса, учитывающий токовую перегрузку.

Плотность тока берется для цилиндрических контактных пар $j = 4-6$ А/мм², для плоских $j = 2-6$ А/мм², причем большие значения могут применяться при хорошей теплоотдаче.

Вопросы

1. Что такое контактное сопротивление? Откуда оно берет физическое начало?
2. Из чего складывается контактное сопротивление?
3. Что такое эффект стягивания?
4. В чем смысл эквивалентной схемы контактного сопротивления?
5. Какие факторы влияют на переходное сопротивление?
6. Для чего в серебро, применяющееся в контактных устройствах, добавляют никель или кремний?

ГЛАВА 4

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТАХ

4.1. Поверхностные пленки на контакте

Вместе с физическими свойствами материалов, на работу контактов оказывает большое влияние отношение материала контакта к химическим реакциям, особенно если внешние условия (температура, состав атмосферы и т.д.) способствуют образованию поверхностных пленок. Из всех существующих материалов нет такого, который бы, работая в качестве контакта, не покрывался поверхностной пленкой.

По своему виду пленки могут быть:

- * коррозионные-окисные, сернистые;
- * адгезионные, толщиной $(2-15) \cdot 10^{-10}$ м;
- * пассивирующие, толщиной $(2-15) \cdot 10^{-10}$ м;
- * граничные смазывающие (масло, вода);
- * органические, толщиной $15 \cdot 10^{-10}$ м.

Действие пленок на контакты практически всегда одинаково:

- * уменьшают сцепление и трение между частями контакта;
- * вызывают дополнительное сопротивление;
- * влияют на процесс разряда между контактами.

По своей структуре пленки могут быть пористыми и сплошными. Сплошные пленки более прочные и одновременно более тонкие, они образуются на свежезачищенных поверхностях почти мгновенно. Такие сплошные пленки образуются на благородных металлах и при толщине до нескольких сотен ангстрем практически незначительно влияют на переходное сопротивление контакта.

Пористые пленки, в отличие от сплошных пропускают реагенты к поверхности металла и поэтому способны расти в глубину. При толщине более 5000 ангстрем они способны прервать электрическую цепь.

Пленки могут обладать разной механической прочностью в зависимости от металла. Они могут быть механически прочными, хрупкими (например, на алюминии) или эластичными (например, на меди). Это имеет большое значение для работы контактного устройства, так как определяет условия, при которых происходит разрушение пленок при соединении. Часто в окружающей среде содержатся газообразные фракции сернистых соединений, что приводит к образованию сульфидных пленок, отличающихся большой толщиной и прочностью. Пленки могут осаждаться на поверхности в связи с испарением органических соединений и диэлектриков, находящихся рядом с контактным устройством [1].

Помимо оксидных и сульфидных пленок на контактной поверхности образуются пленки из органических продуктов выделения пластмассы, окружающей контакт, эти пленки оказывают значительное сопротивление току. Они наиболее быстро образуются в закрытых изолированных корпусах из пластмассы. При этом органические продукты выделения не удаляются в атмосферу, а осаждаются на внутренних поверхностях, особенно рабочих поверхностях контактных пар, покрытых палладием, платиной, радием. Это объясняется высоким каталитическим действием этих металлов в атмосфере органических паров.

Уменьшить образование поверхностных пленок можно применением покрытий контактов благородными металлами, а также герметизацией контактов материалами, не выделяющими органических паров, или наполнение герметичной зоны инертными газами с небольшим избыточным давлением.

Сопротивление поверхностной пленки можно характеризовать поверхностным сопротивлением, которое можно определить по формуле:

$$R_{\Pi} = \frac{\rho_{\Pi} \cdot d}{F},$$

где: R_{Π} - поверхностное сопротивление;

ρ - удельное сопротивление;

d - толщина пленки;

F - площадь соприкосновения контактов.

Эту формулу можно несколько упростить, если принять во внимание, что при тонких пленках их сопротивление зависит от вида пленки. В этом случае вместо $\rho_{\Pi} \cdot d$ целесообразнее подставить σ ($\text{Ом} \cdot \text{см}^2$) - удельное поверхностное сопротивление.

Если соприкосновение контактной пары происходит по окружности, радиусом - a , то:

$$R_{\Pi} = \frac{\sigma}{\pi \cdot a^2}$$

и общее контактное сопротивление, состоящие из переходного сопротивления $R_{\text{ПЕР}}$ и сопротивления поверхностной пленки R_{Π} будет равно:

$$R_{\text{К}} = \frac{\rho}{2 \cdot a} + \frac{\sigma}{\pi \cdot a^2},$$

где: $R_{\text{К}}$ - контактное сопротивление;

ρ - удельное сопротивление контактного материала;

σ - удельное поверхностное сопротивление пленки на контакте;

a - радиус поверхности соприкосновения.

Эта формула дает приблизительный результат, т.к. она была выведена в предположении, что пленка тонкая, равномерная и поверхностное

сопротивление не зависит от переходного сопротивления и наоборот. Однако для практического применения она дает хорошие результаты.

Как для чисто металлического контакта, так и для системы контактов - поверхностная пленка - контакт можно построить зависимость сопротивления от напряжения.

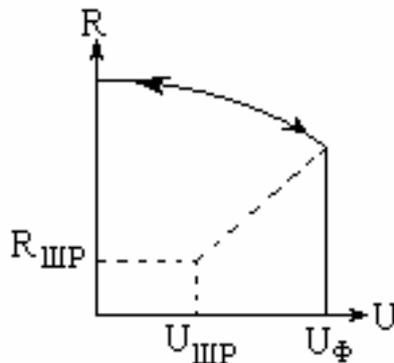


Рис. 27. Зависимость R от U для системы контактов

Контактное сопротивление при небольших контактных усилиях определяется в основном сопротивлением поверхностной пленки. Если к контакту подвести постоянно меняющееся напряжение, то график зависимости R от U будет иметь примерно такой вид: при низких напряжениях (0,1–0,01 В) контактное сопротивление измеряется в Мом. При повышении напряжения сопротивление падает, при уменьшении восстанавливается до первоначального значения. При достижении порогового напряжения U_{Φ} , зависящего от вида и толщины поверхностной пленки, сопротивление исчезает, и контактное напряжение достигает 0,3–0,5 В. Значит, ток нашел путь через поверхностную пленку, это явление называется *фриттингом*. Напряжение, при котором происходит это явление, называется напряжением фриттинга (оно несколько ниже напряжения, при котором плавится металл). Для начала фриттинга напряженность поля в поверхностной пленке должна быть около 10^6 В/см. Точная величина зависит от вида и от возраста пленки. Влажность воздуха не оказывает влияния на процесс.

Например, при толщине пленки $(5...15) \cdot 10^{-10}$ м и напряжении 1 В напряженность поля составляет 10^7 В/см. При такой напряженности во многих точках возникает пробой диэлектрика, сопровождающийся расплавлением металла и образованием токопроводящих «мостиков». Из этого следует, что для надежной коммутации слаботочных цепей можно использовать контакты из благородных металлов, которые при обычных условиях не имеют пассивирующих пленок, или герметизировать контакты.

Металлы, которые покрываются пассивирующими пленками, особенно при высоких температурах, не могут быть использованы для

маломощных контактов, но с успехом могут применяться в контактах, где коммутируются большие токи и напряжения. Металлы, покрывающиеся толстыми пленками, вообще не пригодны для осуществления надежного контакта. Как видно, требования к материалам тем жестче, чем меньше напряжение и ток, выше температура и больше загрязненность атмосферы. По изложенным причинам выбор материала контакт-деталей требует учета многих факторов и вызывает большие трудности.

Полного объяснения процесса фриттинга в настоящее время нет. Существует несколько гипотез, одна из них объясняет явление фриттинга тепловым пробоем: при прохождении через полупроводниковую пленку силовые линии тока концентрируются в каналах с повышенной проводимостью и вызывают в них повышение температуры, что приводит к повышению проводимости металла, вследствие чего силовые линии еще больше сужаются; наконец происходит тепловой пробой, как у изоляционных материалов. При этом в канал разряда может быть втянут мостик жидкого металла или же этот мостик возникнет из ионов металла, вырывааемых из сильно разогретой поверхности контакта.

На практике фриттинг контактов ограничивается электрической прочностью более толстых, плохо проводящих поверхностных пленок. Например, если контакты из никеля покрыты слоем окиси никеля толщиной 10 мкм, то напряжение фриттинга должно быть выше 1000 В. В этом случае мирятся с более высоким механическим износом контакта и продавливают пленку, еще лучше снять пленку механическим путем (содрать). Притирание контактов важно для механического снятия покровных пленок. Однако, при применении контактов платиновой группы нужно иметь в виду, что притирание только способствует образованию поверхностных пленок. Притирание тем эффективнее, чем более шероховатая поверхность контактов.

Под воздействием электрической дуги рабочие поверхности контактов становятся шероховатыми, однако, при малых электрических нагрузках они могут заполироваться, в этом случае целесообразно введение в контактную поверхность твердых посторонних кристаллов, царапающих поверхность, например, вместо мягкого серебра применяют сплав - *серебро, медь, кремний*, в котором медь и кремний образуют очень твердые иглообразные кристаллы Cu_3Si .

Поверхностные пленки на контактах могут быть твердыми и хрупкими (например, смесь окислов вольфрама W_4O_{11}) или мягкими и тягучими (например, сульфид серебра Ag_2S). Поэтому нельзя вывести общего закона для подсчета контактного усилия для всех контактных материалов. Однако из практики известно, что нижняя граница контактного давления для замыкания с мягким трением составляет: для золота менее 1 г., для серебра около 15 г., для вольфрама около 70 г.

4.2. Механический износ

Большое влияние на работу контактных устройств в отсутствие тока оказывает механический износ контактирующих поверхностей. Износ может быть абразивным в результате выработки поверхности из-за трения и усталости поверхностных слоев [1]. Если для защиты контактных поверхностей от пленок контакты в некоторых конструкциях, рассчитанных на малое число соединений, покрываются коррозионно-стойкими металлами (серебро, золото, платина), то при многократном переключении контактов это покрытие разрушается.

4.3. Тепловые явления при контактировании

При протекании тока через контактное устройство в месте контакта происходит выделение тепловой энергии и перегрев контакта по сравнению с температурой окружающей среды [2].

Общая температура перегрева зависит от потерь в точках контактирования и в теле контакта при прохождении по нему тока, а также от температуры окружающей среды. Для иллюстрации на рис. 28 показана идеализированная конструкция контактного устройства, состоящего из двух цилиндрических контактов, соприкасающихся торцами. На рисунке видны две зоны перегрева, имеющие температуры перегрева ΔT_K в точках

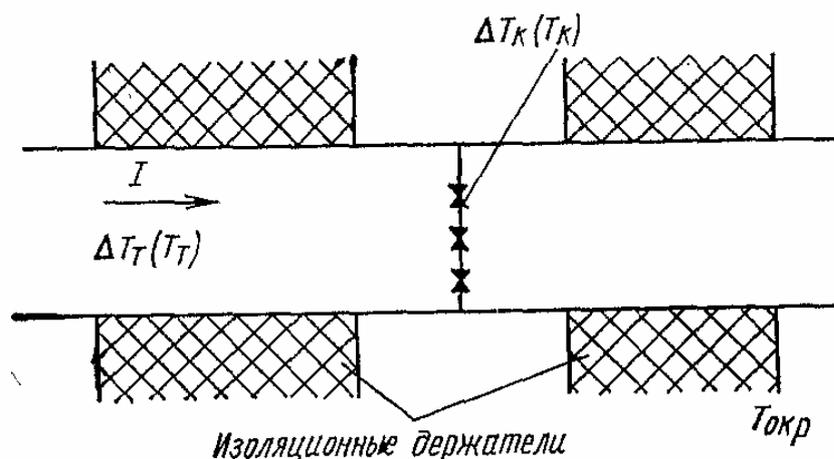


Рис. 28. Идеализированная конструкция контактного устройства контактирования и ΔT_T в теле контакта. Температуру перегрева тела контакта ΔT_T относительно температуры окружающей среды ΔT_{OKP} можно представить как сумму:

$$\Delta T_T = \Delta T_T' + \Delta T_T'',$$

где: $\Delta T_T'$ и $\Delta T_T''$ - температура перегрева тела контакта, обусловленная мощностью, выделяемой на переходном сопротивлении ($I^2 R_{\Pi}$), и мощностью, выделяемой на сопротивлении тела контакта при прохождении по нему тока, соответственно. Вывод формулы для определения ΔT_T сложен. Поэтому, опуская его, приведем выражение, полученное Хольмом:

$$\Delta T_T = I^2 / D_K [R_{\Pi}(\Delta T_K) / \sqrt{\pi \lambda_T k_T} + 4\rho / (\pi \cdot k_T D_T)],$$

где: k_T - коэффициент теплопередачи с поверхности цилиндра длиной 1 см;
 D_K - диаметр тела контакта;
 ρ - удельное электрическое сопротивление материала контакта;
 λ_T - его теплопроводность.

Расчет температуры перегрева ΔT_K также вызывает много трудностей из-за сложной конфигурации поверхности контактирования. Выражение для определения ΔT_K по Хольму:

$$\Delta T_K = I^2 R_{\Pi}^2 / 8\rho \lambda_T.$$

Результирующая температура в точках контактирования:

$$T_K = T_{OKP} + \Delta T_T + \Delta T_K,$$

а в теле контакта:

$$T_K = T_{OKP} + \Delta T_T.$$

Пользуясь приведенными выше выражениями, можно рассчитать температуры T_K и T_T . Во многих случаях, особенно для контактных устройств сложной конфигурации, T_K и T_T определяются экспериментально.

Температуры T_K и T_T определяются током, протекающим по контактному устройству. Эти температуры не могут превышать определенных значений, что приводит к ограничению допустимого тока. Температура T_K ограничена тем, что при ее повышении активизируется процесс образования пленок. Допустимая температура тела контакта ограничена допустимой температурой для диэлектриков, используемых в конструкции. Например, для пластмассы $T_T < 80$ °С, для керамики $T_T < 200$ °С. В зависимости от конструкции контактного устройства и используемых материалов максимальный ток ограничивается T_K или T_T .

4.4. Процессы при размыкании и замыкании при наличии напряжений (токов)

Наиболее сложные электрические и механические процессы в контактных устройствах возникают в динамическом режиме, когда соединение происходит при наличии токов и напряжений. При малых токах и напряжениях (порядка микровольт и микроампер) влиянием электрических процессов на работу контактного устройства можно пренебречь. Однако, когда коммутируемые токи и напряжения достаточно велики, они оказывают существенное влияние на работу контактных устройств.

Процесс замыкания происходит сравнительно просто. По мере сближения контакт-деталей воздушные промежутки пробиваются напряжением, действующим в цепи. Этот пробой существенно не влияет на работу контактного устройства, кроме случаев коммутации высоких напряжений, так как контакты продолжают сближаться до соприкосновения.

Более сложные процессы происходят при размыкании контакт-деталей, и надежность контактов при частом размыкании ухудшается. При определенном соотношении между током и напряжением при размыкании возникает дуга, сопровождающаяся переносом металла с одной поверхности контакт-детали на другую и его потерей, появлением неровностей на поверхностях контактов и образованием пленок из-за высокой температуры. Это так называемая дуговая эрозия контактов.

Возникновение дуги определяется тем, что при разведении контакт-деталей возникает значительная напряженность электрического поля. В результате происходит образование дуги, которая не исчезает и при дальнейшем раздвижении контактов в результате сильной ионизации. Условия образования дуги зависят от многих факторов: металла контакт-деталей, значений напряжений и токов, состава окружающей среды, состояния контактирующих поверхностей, наличия емкостей и индуктивностей в электрической цепи. Загрязнение окружающей среды и наличие индуктивностей в цепи облегчают возникновение дуги и ухудшают работу контактного устройства.

Характеристики дугообразования для незагрязнённой окружающей среды, чистых поверхностей и при отсутствии индуктивностей и емкостей в цепи известны. В первом приближении справедливо выражение для условия дугообразования:

$$(U - U_{\text{д}}) (I - I_{\text{д}}) \geq k_{\text{д}},$$

где: $U_{\text{д}}$ и $I_{\text{д}}$ — минимальные значения напряжения и тока дуги;

U и I — напряжение и ток в цепи;

$k_{\text{д}}$ — коэффициент, зависящий от скрытой теплоты испарения контактов.

На рис. 29 показаны области образования дуги для некоторых металлов. Обычно $U_{\text{д}} = 8 \dots 25 \text{ В}$, $I_{\text{д}} = 0,5 \dots 1,3 \text{ А}$. Так, например, для серебра $U_{\text{д}} = 8 \text{ В}$, $I_{\text{д}} = 0,9 \text{ А}$; для золота $U_{\text{д}} = 25 \text{ В}$, $I_{\text{д}} = 0,5 \text{ А}$; для меди $U_{\text{д}} = 25 \text{ В}$, $I_{\text{д}} = 1,3 \text{ А}$. Эти значения указывают границы, в пределах которых следует учитывать явление дуговой эрозии.

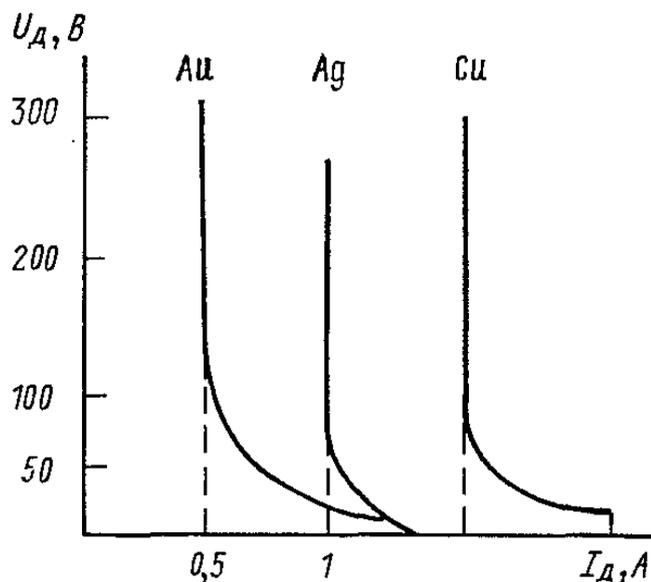


Рис. 29. Области образования дуг

Если напряжение и ток в цепи меньше $U_{\text{д}}$ и $I_{\text{д}}$, то дуга не образуется, когда в цепи нет индуктивности. Если в цепи есть индуктивность, то после резкого изменения тока, связанного с размыканием, на ней создается большое напряжение $U_{\text{к.РАЗМ}}$, которое практически оказывается приложенным к размыкаемому промежутку. Поскольку $U_{\text{к.РАЗМ}} > U_{\text{р}}$, то происходит пробой воздушного промежутка между контакт-детальями. Чем больше коммутируемый ток и индуктивность, тем легче возникает дуга. Очевидно, что этот эффект не наблюдается в соединителях, которые сочленяются и расчленяются в нерабочем состоянии аппаратуры [1].

При малых токах и напряжениях при размыкании не образуются дуги, но происходит мостиковая эрозия. Из-за шероховатости поверхности при размыкании контактов все больше и больше контактных точек перестает контактировать. При этом возрастает переходное сопротивление и падение напряжения на нем, а плотность тока в точках контактирования достигает 1000 А/см^2 . Мощность, выделяемая в контакте, резко увеличивается и рассеивается в нескольких точках, где металл начинает плавиться. Контактующие поверхности продолжают расходиться, металл «тянется» до тех пор, пока механически не разрушается. На поверхности остаются

«столбики», которые из-за повышенной температуры окисляются. Постепенно поверхность разрушается.

Для каждого металла характерно определенное напряжение, при котором наблюдается плавление при размыкании. Значения напряжений и

Таблица 2.
Температуры плавления для различных металлов

Металл	$U_{пл}, В$	$T_{пл}, ^\circ C$
Платина	0,65	1773
Серебро	0,35	960
Золото	0,45	1063

температур плавления для некоторых металлов приведены в табл. 1. Напряжение меньше 0,3 В практически не создает условий для мостиковой эрозии.

4.5. Слипание и сваривание контактов

Если две металлические поверхности сжаты вместе, то для их разъединения нужно будет затратить определенную силу, при этом сила сцепления тем больше, чем больше было усилие сжатие, чем чище соприкасающиеся поверхности и чем меньше их шероховатость. Сцепление основано на взаимодействии ионов металла верхних слоев структурной решетки при достаточно сильном сближении поверхностей. Возникающие при этом силы притяжения соизмеримы с силами взаимных связей атомов структурной решетки. Однако радиус воздействия сил притяжения настолько мал, что даже газовая оболочка толщиной в одну молекулу может ослабить силу сцепления в десятки раз.

Практически контактные поверхности почти всегда покрыты тонкими пленками и опасность слипания относительно не велика до тех пор, пока поверхности не подвергаются пластической деформации.

В случае пластической деформации газовая оболочка как бы выдавливается, а химические поверхностные пленки разрываются. Для уменьшения контактного сопротивления используется именно пластическая деформация. Т.о. хорошее электрическое соединение двух токопроводящих частей может вызвать слипание. Силы сцепления, возникающие при деформации твердого металла, являются небольшими по сравнению с силами пружин, применяющихся в контактах. Сложности возникают тогда, когда температура в области стягивания тока достигает температуры плавления контактного материала, ибо в этом случае происходит скачкообразное увеличение истинной контактной поверхности; из множества одиночных, маленьких контактных площадок

образуется единая зона плавления. Из-за высокого напряжения на поверхности жидкого металла все плавающие в его толще посторонние тела собираются в комки и сдвигаются к пограничной зоне твердого и жидкого металла.

После затвердевания образуется мостик сплошной проводимости, размеры которого превосходят величину соприкасающихся поверхностей перед сплавлением. В этом случае наблюдается не слипание, а сваривание контактов. При этом сила сваривания может быть больше силы возвратных пружин и цепь не прерывается.

Наклонность к свариванию тем больше, чем меньше перепад напряжений в области стягивания, необходимый для плавления металла, т.е. чем ниже температура плавления металла. Кроме того, эта склонность увеличивается с увеличением удельного сопротивления и твердости, т.к. эти параметры увеличивают перепад напряжения и, следовательно, температуру в области контакта.

Если есть предпосылки к свариванию, то площадь поверхности расплавленного металла будет зависеть от теплопроводности материала, т.к. часть энергии, идущей на плавление, будет тем меньше, чем больше тепла может перейти в металл, т.е. чем выше теплопроводность данного металла. Кроме того, с повышением температуры плавления объем расплавленного металла уменьшается. Поэтому приварившаяся поверхность будет большей при низкой теплопроводности и низкой температуре плавления.

Как уменьшить силу сваривания?

Это достигается тем, что контактное напряжение в любой момент короткого замыкания должно оставаться ниже напряжения плавления контактного материала.

Для неподвижных контактов это достигается следующим образом: переходное сопротивление за счет увеличения контактного давления уменьшается до величины ниже порогового значения, зависящего от тока и удельного сопротивления:

$$R_{\text{ПЕР}} = 0,89 \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{H}{P}},$$

и для контактов подбирают металл с возможно большей температурой плавления.

При разрывных контактах, оплавление почти неизбежно, т.к. при замыкании цепи тока контактное напряжение изменяется от напряжения холостого хода до контактного напряжения стационарного состояния. Если напряжение холостого хода выше напряжения плавления, то металл плавится в любом случае. Кроме того, короткому замыканию часто предшествует пробой газового промежутка, при котором на электродах выделяется столько тепла, что металл еще до первого замыкания становится жидким. В этом случае замыкание вызывается уже не

взаимным движением контактов, а перекрытием зазора буграми металла, возникающими под воздействием мощного поля.

Т.о. при разрывных контактах можно рассчитывать только на уменьшение силы сваривания, что может быть достигнуто двумя путями:

- 1) применением материалов с низким удельным сопротивлением, низкой прочностью на разрыв (в жидком состоянии) и высокой температурой плавления;
- 2) уменьшением общей контактной поверхности.

Первое условие можно выполнить, применяя такие металлы, как *вольфрам, молибден и тантал*. Сплавы не годятся из-за высокого удельного сопротивления, другие чистые металлы, имеющие высокую теплопроводность, обладают высокой прочностью на разрыв.

Если необходимы другие материалы, то используют второй путь, при этом контактная поверхность может быть рифленой или покрытой тонко распыленными плохими проводниками, окислами металлов или графитом.

Также может применяться металлокерамическая композиция, работающая на принципе разделения контактной поверхности на множество частей.

Такой эффект получается при применении твердого серебра, который содержит окисел меди или никеля, или их смесь. Медь и никель окисляются и откладываются на поверхности контакта как непроводящие химические соединения. Сила сваривания при этом может быть уменьшена на 60%. Еще лучше применение добавок к серебру окиси кадмия CdO (серебро - окись кадмия 8+12%) или окиси олова SnO_2 (серебро - окись олова 5+8%). Оба соединения хорошо работают при слабых токах и превосходят чистое серебро. Добавки заранее подмешиваются в серебро в виде мелкого порошка, но свойства смеси сильно зависят от дисперсии окисла, т.е. от способа производства.

Применение композиции серебро-графит, которая при содержании графита от 2 до 8 %, дает абсолютную гарантию от сваривания. Возгонка графита происходит при $4000\text{ }^{\circ}C$, в противоположность окислам, которые возгоняются при $1500 - 1800\text{ }^{\circ}C$. Кроме того, частицы графита не свариваются и поверхность серебряно-графитовых контактов остается ровной и мелкозернистой.

Вопросы

1. Перечислите основные виды пленок и причины их возникновения.
2. Назовите разрушающие факторы для контактных устройств.
3. Что происходит между контактными поверхностями в процессе размыкания/замыкания при больших токах?
4. Что такое фриттинг?
5. Какие факторы влияют на возникновение электрической дуги?
6. Что происходит при малых токах и напряжениях в процессе размыкания контактов?
7. От чего зависит склонность к свариванию? Как можно уменьшить вероятность сваривания?

ГЛАВА 5

ВИДЫ КОНТАКТОВ

Контакты, применяемые в электронных устройствах можно разделить по роду работы на: неразъемные, разъемные, скользящие и разрывные.

Неразъемные контакты служат для постоянного соединения электрических элементов схем. К ним относятся паяные, клееные, сварные, зажимные и накрученные контакты. Они отличаются простотой выполнения и при хорошем исполнении обладают малым и стабильным переходным сопротивлением.

Разъемные контакты позволяют осуществлять замену отдельных частей или блоков электронных устройств, характерным для этого типа контактов является неподвижность контактной пары при прохождении тока и то, что расчленение и сочленение контактов происходит при обесточенной цепи.

Скользящие контакты работают без разрыва электрической цепи, за счет изменения своего положения.

Разрывные контакты - это контакты, с помощью которых происходит размыкание и замыкание электрической цепи, находящейся под током. Если переключение производится за счет электромагнита, то такие разрывные контакты называются реле и применяются в маломощных устройствах.

5.1. Неразъемные контакты

Цельнометаллические контакты – к этим контактам относятся соединения проводников с помощью пайки и сварки, когда два проводника соединяются механически со сравнительно малым переходным сопротивлением, устойчивым к внешним воздействиям. При выполнении этого соединения нужно иметь в виду, что площадь спая или сварки должна превышать сечение проводника с тем, чтобы падение напряжения на участке контакта не превышало падение напряжения на проводнике. Из опыта известно, что место спая превышает сопротивление в 4-6 раз, следовательно, и сечение спая должно превышать сечение проводника во столько же раз, т.к. если падение напряжения в месте спая будет превышать падение напряжения на проводнике, то оно может перегреваться и приводить к разрушению контакта.

Исходя из этого, рекомендуется следующая длина места спая: при пайке внахлест $2,5 \cdot d$ провода, при пайке встык длина муфты из припоя должна быть равной приблизительно $5 \cdot d$ провода; толщина припоя вокруг провода примерно определяется из соотношения сечения провода к периметру провода по соотношению:

$$\frac{\pi \cdot r^2}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{r}{2}$$

При сварке получают надежное соединение, если в соединяемых деталях присутствует медь (контактный лепесток, провод), а если соединяемые элементы не медные, то хорошо производить сварку с присадкой меди в виде тонких проволочек или ленты, обвивая ими место сварки.

Зажимные контакты - это контакты, которые осуществляют соединение с помощью зажимов или винтов. Основным требованием является определенность давления сжатия, которое зависит от материала соединяемых проводников и состояния их поверхности. Например, для алюминия - 200-300 кг/см², меди 50-150 кг/см², стали луженой оловом 100-150 кг/см², цинковых сплавов 20-50 кг/см².

В слаботочных цепях, где площадь соприкосновения может быть незначительной, зажимные контакты создаются за счет развальцовки трубчатых окончаний контактных лепестков. Другим типом такого же контакта является навитой контакт, когда контактирование осуществляется за счет намотки провода на стержни прямоугольной формы. Начальные и конечные витки служат для создания усилия прижима на средних витках. При этом усилие должно быть таким, чтобы ребра контактных стержней врезались в провод, что обеспечивает самозакрепление и самозачистку контакта.

Таблица 3.

Соотношение между диаметром провода и количеством витков при соединении накруткой

d, мм	0,2-0,29	0,3-0,4	0,41-0,5	0,51-0,6	0,61-1,2	1,21 и более
Количество витков	7	6	5	5	4	3

Пленочные контакты - этот тип контакта получил широкое распространение в связи с развитием микроэлектроники. Это электрическое соединение образуется последовательным осаждением двух тонких металлических пленок. Такие контакты образуются между пленочным резистором и соединительной пленкой, между контактными площадками последовательных слоев многослойных печатных схем и т.п. Количество пленочных контактов в больших интегральных схемах достигает 100 и более. Основными характеристиками пленочных контактов являются: его сопротивление, равное мгновенному значению падения напряжения на контакте, отнесенному к мгновенному значению тока, протекающего через контакт; выделяющаяся на контакте мощность; шумы контакта.

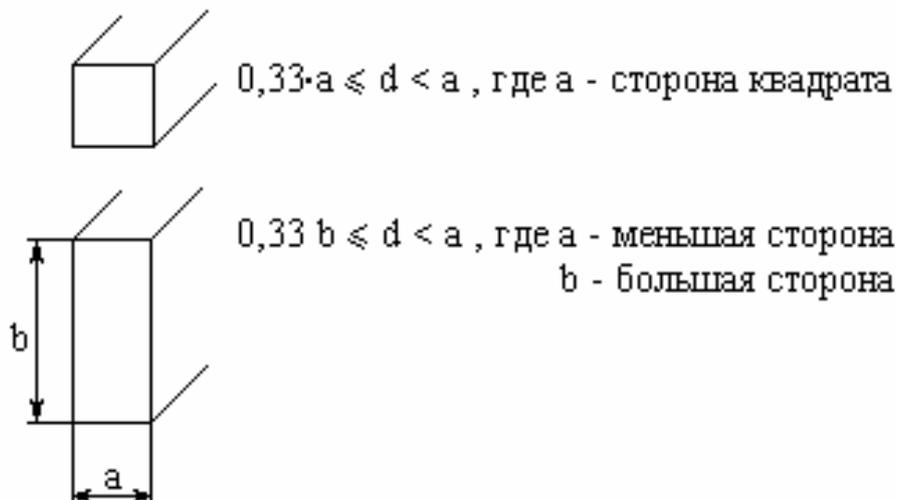


Рис. 30. Диапазон допустимых значений d , мм

Нужно иметь в виду, что в пленочных контактах сопротивление в значительной степени зависит от сопротивления контактных элементов, а не только от переходного сопротивления, как это свойственно всем другим типам контактов.

Задача конструирования пленочного контакта заключается в выборе материалов контактных элементов, определении размеров области перекрытия и составлении технологических требований с тем, чтобы переходное сопротивление и рассеиваемая мощность на контакте были меньше заданных.

Материалы контакта должны удовлетворять следующим требованиям:

1. обладать высокой электропроводностью;
2. обладать хорошей адгезией друг к другу и к подложке;
3. контакт не должен создавать выпрямляющих и термоэлектрических эффектов;
4. в контактной паре не должны создаваться интерметаллические соединения, приводящие к выходу контакта из строя;
5. в контактных материалах должны отсутствовать явления переноса металла при нормальных температурах и токовых перегрузках;
6. металлы контакта должны быть достаточно прочными;
7. в контактах должны отсутствовать гальванические процессы;
8. к выбранным материалам должны быть применены стандартные методы осаждения.

При расчете пленочного контакта заданными являются погонные сопротивления выбранных металлов (z_1 и z_2), погонная проводимость переходного слоя (y), допустимое сопротивление контакта ($R_{к, доп}$), ширина пленки контакта - (b).

Наиболее простой формой контакта является прямоугольная. Длина области перекрытия (l_0) с минимальным переходным сопротивлением

может быть определена из выражения:

$$l_0 = \sqrt{\frac{1}{(z_1 + z_2) \cdot y}} \operatorname{arch} \left(1 + \frac{z_1 + z_2}{z_1 \cdot z_2} \right),$$

а сопротивление контакта, когда для контактной пары выбран одинаковый материал:

$$R_{\text{к.мин}} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{z}{y}}.$$

Полученное значение сопротивления контакта не должно быть больше ($R_{\text{к}}$) допустимого.

Клееные контакты - относятся также к неразъемным контактам и применяются там, где нельзя применять сварку или пайку, например, при применении органических подложек. Этот вид контакта может осуществляться за счет склейки и сжатия двух лент, причем наибольшее количество контактных точек получается, если одна из лент имеет меньшую толщину. Для склеивания применяют смолы: эпоксидные или фенольные, нейтральные к контактируемым материалам.

5.2. Разъемные контакты

Условия работы разъемных контактов значительно тяжелее, чем у неразъемных. Это можно объяснить тем, что разъемные контакты, оставаясь длительное время не включенными, в большей мере подвергаются воздействию внешней среды. Кроме этого они должны быть приспособлены к меньшим контактным усилиям, т.к. их замыкание и размыкание производится непосредственно оператором.

Облегчающим обстоятельством является только то, что в их конструкции легко предусмотреть самозачистку контактов. Т.к. они должны устойчиво работать, независимо от продолжительности их включенного и выключенного состояний, то использование в них легко окисляемых материалов (медь, латунь, алюминий) в большинстве случаев недопустимо, и их заменяют серебряными, золочеными или палладированными контактами.

Применение контактов покрытых благородными металлами, позволяет не только повысить их устойчивость в работе, но и значительно снизить контактные усилия. Так если контакты, сделанные из бронзы, латуни или меди и работающие в цепях с током не более 5 А должны иметь контактные усилия не менее 0,5 кг, то в тех же условиях контакты покрытые благородными металлами (серебро, золото) обеспечивают надежную работу при усилиях 0,1 кг. При больших токах контактные усилия следует рассчитывать исходя из величины контактного сопротивления.

При выборе контактных усилий рекомендуется исходить из максимально допустимого падения напряжения на контакте U_K , при котором температура контакта достигает значения, когда его механические свойства начинают резко падать.

Эти падения напряжения зависят от материала контакта и представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Падение напряжения для материалов

Материалы контакта	Падение напряжения, В.
Платина	0,22 -0,40
Золото	0,08 -0,14
Медь	0,09 -0,13
Алюминий	0,12 -0,20
Никель	0,16 -0,30
Серебро	0,08 -0,10
Вольфрам	0,12 -0,25

В реальных условиях работы контактов это падение должно быть меньше в 2–3 раза.

Зная материал, из которого изготовлен контакт и максимальное значение тока, можно определить контактное сопротивление:

$$R_K = \frac{U_K}{I},$$

а по контактному сопротивлению можно определить контактное усилие:

$$R_{\text{ПЕР}} = 0,89 \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{H}{P}}.$$

Основные термины и определения в контактных парах устанавливает ГОСТ 14312-62.

Контактные пары электрических соединителей состоят из двух частей: гнезда и штыря.

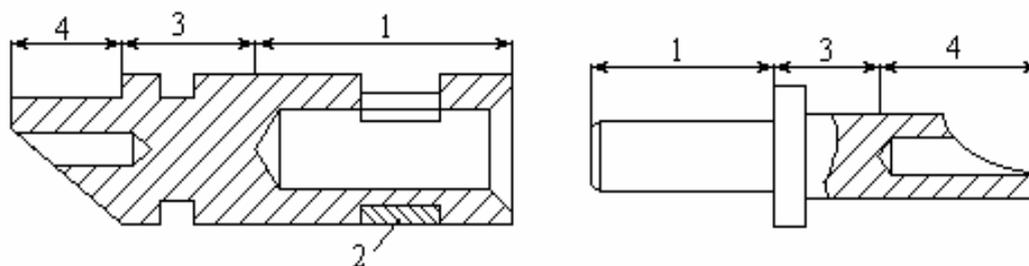


Рис. 31. Изображение контактных соединителей

Каждая часть состоит, как правило, из 4-х элементов. 1 - собственно электрического контакта; 2 - упругого (пружинного) элемента, сжимающего контактные части с определенным контактным усилием; 3 - элемента, предназначенного для крепления контакта в корпусе или

изоляторе, 4 - хвостовика (вывода) для присоединения проводов. В некоторых контактах могут отсутствовать отдельные элементы, например пружины, выполняются на одной части контакта.

Для данной контактной пары процесс соединения называется сочленением, обратный - расчленением; для ножевых контактов - соответственно - врубанием и вырубанием.

Каждая контактная пара характеризуется следующими параметрами:

- переходным и контактным сопротивлением;
- максимальным рабочим током;
- статической и динамической нестабильностью сопротивления.

Переходное сопротивление, как было разобрано выше, обусловлено электрическими явлениями в зоне контакта и сопротивлением поверхностных пленок:

$$R_K = R_{\text{ПЕР}} + R_{\text{П}} = \frac{\rho}{2 \cdot a} + \frac{\sigma}{\pi \cdot a^2}.$$

Полное контактное сопротивление состоит из переходного сопротивления контактов и омического сопротивления материала обоих контактов. Измеряется оно в сочлененном состоянии между точками подпайки проводов.

Максимальный рабочий ток - это наибольший ток, который может быть пропущен через контактную пару без перегрева и потери работоспособности в течение заданного времени.

Под нестабильностью подразумевают величину изменения переходного сопротивления, при этом различают статическую и динамическую нестабильность.

Статическая нестабильность характеризует изменение переходного сопротивления при неоднократных сочленениях контактов. Она равна среднеквадратическому отклонению переходного сопротивления от его среднего значения:

$$\Delta R_{\text{СТ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_n - R_{ni})^2}{n}}.$$

Динамическая нестабильность характеризует изменения переходного сопротивления, вызываемого механическими воздействиями (ударами, вибрациями). Она характеризует возможный уровень контактных шумов и определяет виброустойчивость контактного устройства. Динамическая нестабильность определяется из следующего выражения:

$$\Delta R_{\text{Д}} = \frac{R_{\text{П.МАКС}} - R_{\text{П.МИН}}}{R_{\text{П.НОРМ}}},$$

где: $R_{\text{П.НОРМ}}$ - переходное сопротивление, установленное ТУ.

К механическим параметрам контактов относятся:

- усилие сжатия контактов;
- наименьшее усилие сочленения и расчленения контактов;
- износоустойчивость контактов - характеризуемая предельным количеством сочленений, после которого переходное сопротивление выходит за пределы установленные ТУ.

Разъемные контакты делятся по роду проходящего тока на:

1. низкочастотные ($f_{\text{МАКС}} = 15$ кГц):
 - низковольтные $U_p < 1$ кВ;
 - высоковольтные $U_p > 1$ кВ.
2. радиочастотные:
 - высокочастотные $f < 30$ МГц;
 - сверхвысокочастотные $f > 30$ МГц.

По габаритным размерам делятся на:

1. нормальные;
2. малогабаритные;
3. миниатюрные;
4. субминиатюрные;
5. микроминиатюрные.

По своему конструктивному выполнению разъемные контакты делятся на контакты с цилиндрическим телом и на контакты с плоской пружиной.

Разъемные контакты с цилиндрическим телом состоят из штыря в виде цилиндрического тела с разрезным концом и целого неразрезного цилиндра. При такой конструкции контактное усилие обеспечивается упругостью раздвоенной ножки штыря. Диаметр гнезда делается несколько больше диаметра штыря, поэтому штырь касается гнезда только в двух точках. При работе такого контакта в качестве одиночного его недостатком является большая жесткость контактного штыря, что приводит к значительному разбросу контактных усилий и к сжатию контактных ножек, что уменьшает надежность работы. Если учесть, кроме того, производственный разброс размеров гнезда и штыря, то может произойти уменьшение контактного усилия, до значений, которые не обеспечат зачистку контакта при сочленении. В результате увеличится контактное сопротивление и температура контакта, а это приведет к понижению упругих свойств штыря и к снижению надежности соединения.

Более сложно обстоит дело с групповым устройством – штепсельным соединением. Все усугубляется тем, что к допускам, влияющим на прогиб контактного штыря нужно прибавить допуск на расстояние между отдельными контактами. Часто эта сумма отклонений больше допустимого прогиба штыря, в результате при сочленении появляется остаточная деформация или часть штырей не будут контактировать.

Ликвидировать это можно, если сделать или гнезда или штыри

подвижными, т.е. имеющими определенные степени свободы, при этом гнезда будут ориентированы по отношению к штырям.

Для штепсельных разъемов с большим количеством пар, работающих при малых токах, делают неразрезанные штыри и разрезанные гнезда, при этом диаметр штыря выбирают по ходовой посадке по отношению к диаметру гнезда.

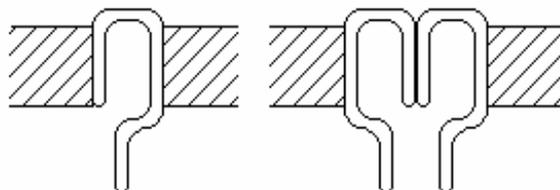


Рис. 32. Разъемные контакты

Стремление придать контактному усилию большее постоянство, как в пределах группы, так и во времени, привело к созданию разъемных контактов с плоской пружиной (из фосфористой, бериллиевой и др. бронзы).

В этих конструкциях контактное давление обеспечивается изогнутой пружиной, вставленной в гнездо в сжатом состоянии.

Первая конструкция с одной пружиной дает большее переходное сопротивление вследствие одностороннего соприкосновения. Уменьшение контактного сопротивления и усилия получают при двустороннем контакте. Благодаря значительному прогибу контактных пружин в этой конструкции ножи могут крепиться жестко.

В электронике наиболее часто применяются приборные разъемы. По назначению они делятся на межблочные, блочные, кабельные и проходные. Каждый разъем состоит из вилки с контактными штырями и розетки с контактными гнездами. В разъемах всегда применяются два вида контактов – разъемные и неразъемные.

5.3. Скользящие и разрывные контакты

Скользящий контакт должен работать, не нарушая цепи тока. При перемещении скользящего контакта, происходит зачистка контактирующих поверхностей, приводящая к улучшению контакта. Однако при этом происходит истирание поверхности, что может приводить к попаданию частиц на рабочую поверхность контакта и к ухудшению свойств контакта.

Материалом для изготовления скользящих контактов служит латунь, бронза, серебро, а в случае прецизионных контактов - золото, палладий, платина и их сплавы. Алюминий и нержавеющая сталь непригодны, т.к. их поверхность быстро покрывается толстой окисной пленкой. Для подвижных частей скользящих контактов чаще всего употребляют латунь

или бронзу (токоєм в конденсаторе переменной емкости). В скользящих контактах большое значение имеет правильно выбранное усилие; при малых усилиях скользящий контакт не в силах разрушить достаточно твердую окисную пленку, при больших усилиях происходит разрушение не только пленки, но и материала самого контакта, что приводит к образованию стружки, которая, попадая на рабочую поверхность, вызывает помехи. Усилие выбирают исходя из склонности материала к окислению. Так золотые и платиновые контакты для малых токов могут работать при контактных усилиях всего в несколько граммов, для серебряных – 0,025–0,05 кгс, для латунных и бронзовых 0,15–0,25 кгс.

При больших токах следует не увеличивать контактное усилие, что может привести к разрушению контакта, а включать несколько контактов параллельно.

Для уменьшения истирания скользящих контактов вводят тела вращения: шарик или ролик, но это приводит к большему окислению и загрязнению поверхности, что вынуждает прибегать к покрытию этих контактов благородными металлами. К недостаткам такой конструкции следует отнести наличие двух последовательных контактов.

Материалы для разрывных контактов, применяемые при больших силах тока и высоких напряжениях, должны обеспечивать высокую надёжность при малом переходном электрическом сопротивлении контактов в замкнутом состоянии, то есть исключать возможность обгорания контактирующих поверхностей и приваривания их друг к другу под действием электрической дуги, возникающей при разрыве контакта.

В качестве конструкционных материалов для разрывных контактов, помимо чистых тугоплавких металлов (например, вольфрама), применяются различные сплавы и металлокерамические композиции. Большое применение нашёл материал системы серебро - окись кадмия (Ag - CdO). Для разрывных контактов в установках большой мощности применяют композиции серебра (Ag) с кобальтом (Co), никелем (Ni), хромом (Cr), вольфрамом (W), молибденом (Mo), и танталом (Ta); меди (Cu) с вольфрамом и молибденом; золота (Au) с вольфрамом и молибденом.

Материалы для скользящих контактов должны обладать высокой стойкостью к истиранию. Для их изготовления применяют холоднотянутую (твёрдую) медь, бериллиевую бронзу, а также материалы системы Ag - CdO.

Для образования скользящего контакта между неподвижной и вращающейся частями электрической машины, то есть для подвода (или отвода) тока к коллектору или контактными кольцам, служат щётки.

Выпускается несколько марок щёток, отличающихся друг от друга составом и технологией изготовления. Для различных марок характерны определённые значения удельного сопротивления, допустимой плотности

тока, линейной скорости на коллекторе, коэффициента трения, твёрдости щёток и т.д.

Различают щётки угольно-графитные (УГ), графитные (Г), электрографитированные (ЭГ), то есть подвергнутые термической электрообработке - графитированию, медно-графитные (М и МГ) - с содержанием металлической меди.

Щётки с содержанием порошкового металла обладают особенно малым электрическим сопротивлением и дают незначительное контактное падение напряжения между щётками и коллектором.

Для создания постоянного (не разрывного или скользящего) контакта с малым переходным сопротивлением применяются пайка и сварка металлов.

Вопросы

1. Перечислите основные виды контактов.
2. Дайте классификацию неразъемным и разъемным контактам.
3. Дайте определение скользящим и разрывным контактам.
4. Какими свойствами должны обладать материалы, используемые в разрывных и скользящих контактах?
5. Какие виды контактных устройств применяются в разъемах?

ГЛАВА 6 КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

6.1. Общие сведения о полупроводниках

К полупроводникам относятся вещества, которые по своим электрическим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками.

Отличительным признаком полупроводников является сильная зависимость их электропроводности от температуры, концентрации примесей, воздействия светового и ионизирующего излучений.

В создании электрического тока могут принимать участие только подвижные носители электрических зарядов. Поэтому электропроводность вещества тем больше, чем больше в единице объема этого вещества находится подвижных носителей электрических зарядов. В металлах практически все валентные электроны (являющиеся носителями элементарного отрицательного заряда) свободны, что и обуславливает их высокую электропроводность. Например, удельное сопротивление меди $\rho = 0,017 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. В диэлектриках и полупроводниках свободных носителей значительно меньше, поэтому их удельное сопротивление велико. Например, для диэлектрика полиэтилена $\rho = 10^{15}$ Ом·м, а для полупроводника кремния $\rho = 2 \cdot 10^3$ Ом·м.

Характерной особенностью полупроводников является ярко выраженная температурная зависимость удельного электрического сопротивления. С повышением температуры оно, как правило, уменьшается на 5...6% на градус, в то время как у металлов удельное электрическое сопротивление с повышением температуры растет на десятые доли процента на градус. Удельное сопротивление полупроводника также резко уменьшается при введении в него незначительного количества примеси.

Большинство применяемых в настоящее время полупроводников относится к кристаллическим телам, атомы которых образуют пространственную решетку. Взаимное притяжение атомов кристаллической решетки осуществляется за счет ковалентной связи, т. е. общей пары валентных электронов, вращающихся по одной орбите вокруг этих атомов. Согласно принципу Паули, общую орбиту могут иметь только два электрона с различными спинами, поэтому число ковалентных связей атома определяется его валентностью [6].

Каждой орбите соответствует своя энергия электрона. Электрон в атоме обладает только некоторыми, вполне определенными значениями энергии, составляющими совокупность дискретных энергетических уровней атома.

В процессе образования кристаллической решетки между атомами возникает сильное взаимодействие, приводящее к расщеплению энергетических уровней, занимаемых электронами атомов (рис. 33). Совокупность этих уровней называют энергетической зоной. Число подуровней в каждой зоне определяется числом взаимодействующих атомов.

Разрешенные энергетические зоны 1, 3 отделены друг от друга запрещенной зоной 2. Запрещенная зона объединяет уровни энергий, которые не могут принимать электроны атомов данного вещества. Поскольку ширина разрешенных зон в твердом теле не превосходит нескольких электрон-вольт (эВ), а число атомов в 1 см^3 достигает 10^{22} , разность между уровнями составляет 10^{-22} эВ. Таким образом, в пределах разрешенной зоны получается практически непрерывный спектр энергетических уровней.

Верхняя разрешенная зона, в которой при абсолютном нуле температуры все энергетические уровни заняты, называется заполненной или валентной зоной (на рис. 33 зона 3). Разрешенная зона, в которой при $T=0^\circ\text{K}$ электроны отсутствуют, называется свободной (на рис. 33 зона 1).

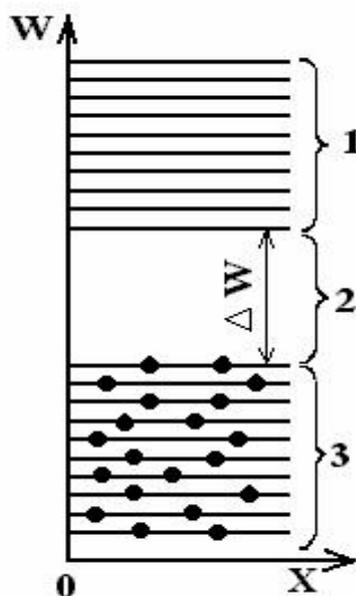


Рис. 33. Энергетическая диаграмма кристалла при $T=0^\circ\text{K}$

Ширина запрещенной зоны (на рис. 33 зона 2) является важным параметром, определяющим свойства твердого тела. Вещества, у которых ширина запрещенной зоны $\Delta W \leq 3$ эВ, относятся к полупроводникам, а при $\Delta W > 3$ эВ - к диэлектрикам. У металлов запрещенная зона отсутствует.

В полупроводниковой электронике широкое применение получили германий ($\Delta W = 0,67$ эВ) и кремний ($\Delta W = 1,12$ эВ) - элементы 4-й группы

периодической системы. На плоскости кристаллическую решетку этих элементов изображают так, как показано на рис. 34 (а). Здесь кружками с цифрой 4 обозначены атомы без валентных электронов, называемые атомным остатком с результирующим зарядом $+4q$ (q - заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). При температуре абсолютного нуля (0° К) все электроны находятся на орбитах, энергия электронов на которых не превышает энергетических уровней валентной зоны. Свободных электронов нет, и полупроводник ведет себя, как диэлектрик.

При комнатной температуре часть электронов приобретает энергию, достаточную для разрыва ковалентной связи (рис. 34 (а)). При разрыве ковалентной связи в валентной зоне появляется свободный энергетический уровень (рис. 34 (б)). Уход электрона из ковалентной связи сопровождается появлением в системе двух электрически связанных атомов единичного положительного заряда, получившего название дырки, и свободного электрона [6].

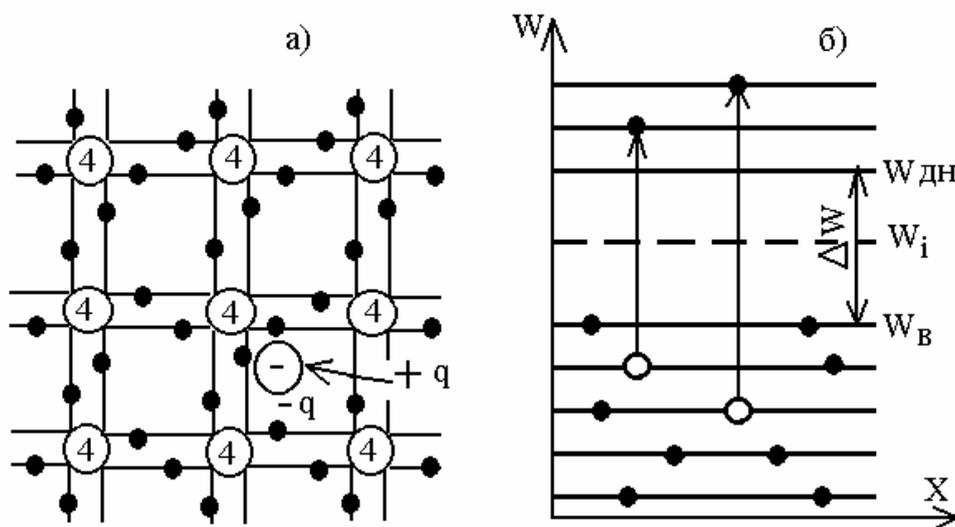


Рис. 34. Условное обозначение кристаллической решетки (а) и энергетическая диаграмма (б) полупроводника с собственной электропроводностью

Разрыв ковалентной связи на энергетической диаграмме характеризуется появлением в валентной зоне свободного энергетического уровня (см. рис. 34 (б)), на который может перейти электрон из соседней ковалентной связи. При таком перемещении первоначальный свободный энергетический уровень заполнится, но появится другой свободный энергетический уровень. Другими словами, заполнение дырки электроном из соседней ковалентной связи можно представить как перемещение дырки. Следовательно, дырку можно считать подвижным свободным носителем элементарного положительного заряда. Процесс образования пар электрон-дырка называют **генерацией** свободных носителей заряда. Очевидно, что количество их тем больше, чем выше температура и меньше ширина запрещенной зоны. Одновременно с процессом генерации

протекает процесс **рекомбинации** носителей, при котором электрон восстанавливает ковалентную связь. Из-за процессов генерации и рекомбинации носителей зарядов при данной температуре устанавливается определенная концентрация электронов в зоне проводимости n_i , и равная ей концентрация дырок p_i , в валентной зоне. Из курса физики известно, что:

$$\begin{aligned} n_i &= A_n \exp((W_\Phi - W_{\text{дн}})/(kT)); \\ p_i &= A_p \exp((W_B - W_\Phi)/(kT)); \end{aligned} \quad (1.1)$$

где: W_Φ - уровень Ферми, соответствующий уровню энергии, формальная вероятность заполнения которого равна 0,5 (формальная потому, что уровень Ферми находится в запрещенной зоне и фактически не может быть занят электронами; кривая распределения Ферми-Дирака, характеризующая вероятность нахождения электрона на том или ином энергетическом уровне, всегда симметрична относительно уровня Ферми); $W_{\text{дн}}$ - энергия, соответствующая "дну" зоны проводимости; W_B - энергия, соответствующая "потолку" валентной зоны; A_n, A_p - коэффициенты пропорциональности; k - постоянная Больцмана, равная $1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/град; T - абсолютная температура, К.

В химически чистых полупроводниках уровень Ферми совпадает с серединой запрещенной зоны W_i , а также:

$$A_n = A_p = A.$$

Поэтому можно записать:

$$n_i = p_i = A \exp(-\Delta W / (2kT)). \quad (1.2)$$

Из последнего выражения следует, что в чистом полупроводнике концентрации носителей зарядов зависят от ширины запрещенной зоны и при увеличении температуры возрастают приблизительно по экспоненциальному закону (температурные изменения A играют незначительную роль). Равенство концентраций n_i и p_i показывает, что такой полупроводник обладает одинаковыми электронной и дырочной электропроводностями и называется полупроводником с собственной электропроводностью.

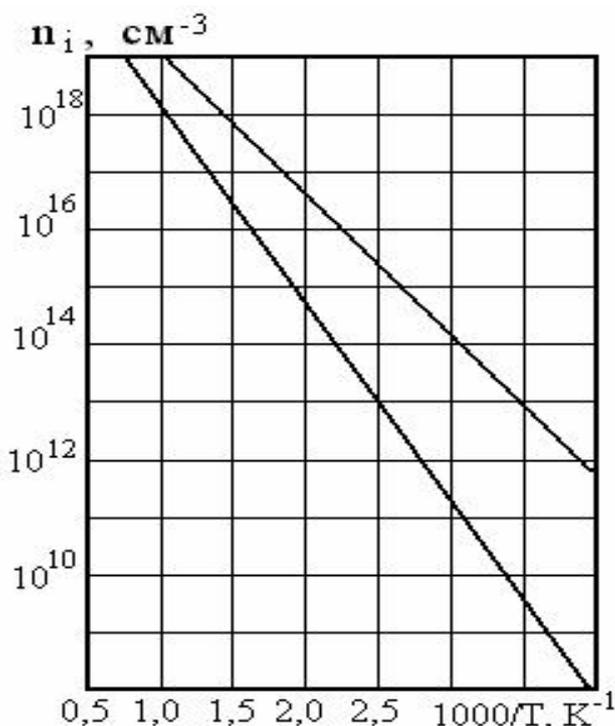


Рис. 35. Зависимость концентрации носителей от температуры

6.2. Полупроводники с электронной электропроводностью

При введении в 4-валентный полупроводник примесных 5-валентных атомов (фосфора P, сурьмы Sb) атомы примесей замещают основные атомы в узлах кристаллической решетки (рис. 36 (а)). Четыре электрона атома примеси вступают в связь с четырьмя валентными электронами соседних атомов основного полупроводника. Пятый валентный электрон слабо связан со своим атомом и при сообщении ему незначительной энергии, называемой энергией активации, отрывается от атома и становится свободным. Примеси, увеличивающие число свободных электронов, называют донорными или просто донорами. Доноры подбирают таким образом, чтобы их энергетические уровни W_d располагались в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости основного полупроводника (рис. 36 (б)). Поскольку концентрация доноров в большинстве случаев не превышает $10^{15} \dots 10^{17}$ атомов в 1 см^3 , что составляет $10^{-4} \%$ атомов основного вещества, то взаимодействие между атомами доноров отсутствует и их энергетические уровни не разбиваются на зоны.

Малая энергия активации примесей, равная 0,04-0,05 эВ для кремния, и 0,01-0,13 эВ для германия, уже при комнатной температуре приводит к полной ионизации 5-валентных атомов примесей и появлению в зоне проводимости свободных электронов. Поскольку в этом случае

появление свободных электронов в зоне проводимости не сопровождается одновременным увеличением дырок в валентной зоне, в таком полупроводнике концентрация электронов оказывается значительно больше концентрации дырок. Дырки в полупроводниках образуются только в результате разрыва ковалентных связей между атомами основного вещества.

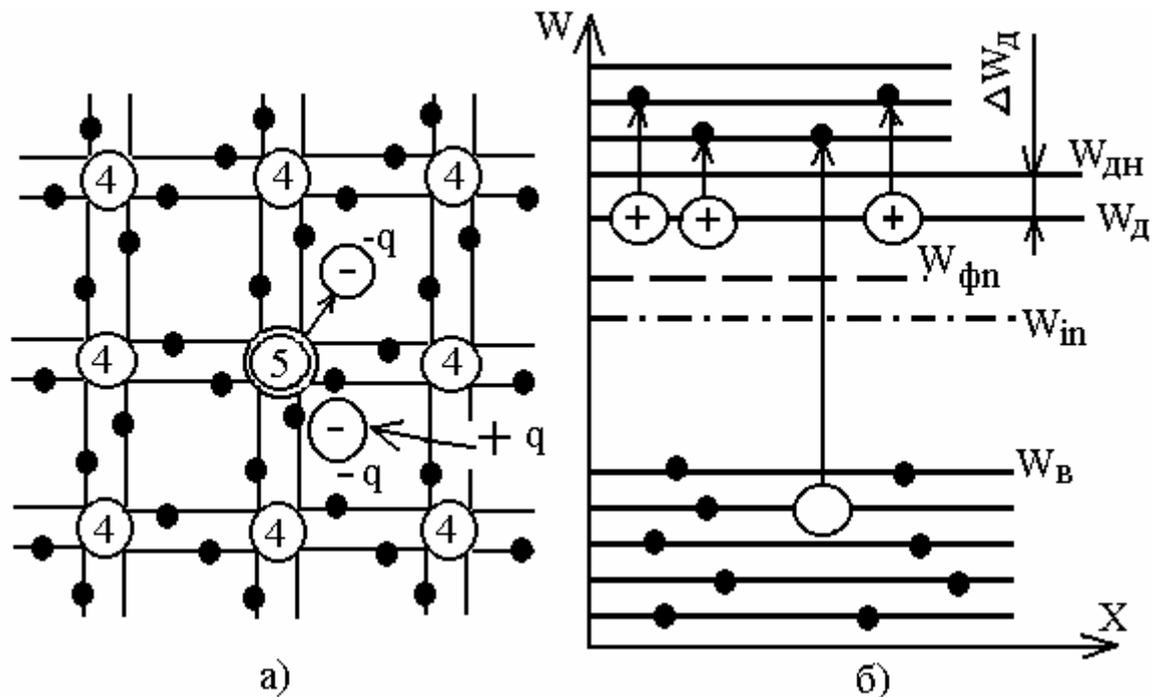


Рис. 36. Условное обозначение кристаллической решетки (а) и энергетическая диаграмма (б) полупроводника с электронной электропроводностью

Полупроводники, в которых концентрация свободных электронов в зоне проводимости превышает концентрацию дырок в валентной зоне, называются полупроводниками с **электронной** электропроводностью или полупроводниками n-типа.

Подвижные носители заряда, преобладающие в полупроводнике, называют основными. Соответственно, те носители заряда, которые находятся в меньшем количестве, называются **неосновными** для данного типа полупроводника [6]. В полупроводнике n-типа основными носителями заряда являются электроны, а неосновными - дырки. В состоянии теплового равновесия в таком полупроводнике концентрации свободных электронов (n_{n_0}) и дырок (p_{n_0}) определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} n_{n_0} &= A_n \exp((W_{\phi n} - W_{дн})/(kT)); \\ p_{n_0} &= A_p \exp((W_{в} - W_{\phi n})/(kT)). \end{aligned} \quad (1.3)$$

С учетом соотношений (1.1), выражения (1.3) можно представить в следующем виде:

$$n_{n_0} = n_i \exp((W_{\phi n} - W_{иn})/(kT)); \quad (1.4)$$

$$p_{n_0} = n_i \exp((W_{in} - W_{fn})/(kT)). \quad (1.5)$$

Из этих соотношений следует, что для полупроводника n-типа выполняется неравенство $n_{n_0} \gg p_{n_0}$.

Атомы 5-валентных примесей, "потерявшие" по одному электрону, превращаются в *положительные* ионы. В отличие от дырок, положительные ионы прочно связаны с кристаллической решеткой основного полупроводника, и являются неподвижными положительными зарядами и, следовательно, не могут принимать непосредственное участие в создании электрического тока в полупроводнике.

Если считать, что при комнатной температуре все атомы донорных примесей ионизированы ($n_{n_0} = N_d$, $p_{n_0} \approx 0$), то на основании выражения (1.4) можно записать:

$$W_{fn} = W_{in} + kT \ln(N_d / n_i), \quad (1.6)$$

где: N_d - концентрация донорных атомов в полупроводнике.

Из соотношения (1.6) видно, что в полупроводниках n-типа уровень Ферми располагается в верхней половине запрещенной зоны, и тем ближе к зоне проводимости, чем больше концентрация доноров. При увеличении температуры, уровень Ферми смещается к середине запрещенной зоны за счет ионизации основных атомов полупроводника.

Повышение концентрации электронов в данном полупроводнике значительно снижает его удельное сопротивление. Например, чистый кремний имеет $\rho = 2 \cdot 10^3$ Ом·м, а легированный фосфором - $(0,25 \dots 0,4) \cdot 10^2$ Ом·м.

6.3. Полупроводники с дырочной электропроводностью

Если в кристалле 4-валентного элемента часть атомов замещена атомами 3-валентного элемента (галлия Ga, индия In), то для образования четырех ковалентных связей у примесного атома не хватает одного электрона (рис. 37 (а)). Этот электрон может быть получен от атома основного элемента полупроводника за счет разрыва ковалентной связи. Разрыв связи приводит к появлению дырки, так как сопровождается образованием свободного уровня в валентной зоне. Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны, называют акцепторными или акцепторами. Энергия активации акцепторов составляет для германия 0,0102-0,0112 эВ и для кремния 0,045-0,072 эВ, что значительно меньше ширины запрещенной зоны беспримесного полупроводника. Следовательно, энергетические уровни примесных атомов располагаются вблизи валентной зоны (рис. 37 (б)).

Ввиду малого значения энергии активации акцепторов уже при комнатной температуре электроны из валентной зоны переходят на уровни акцепторов. Эти электроны, превращая примесные атомы в отрицательные ионы, теряют способность перемещаться по кристаллической решетке, а образовавшиеся при этом дырки могут участвовать в создании электрического тока.

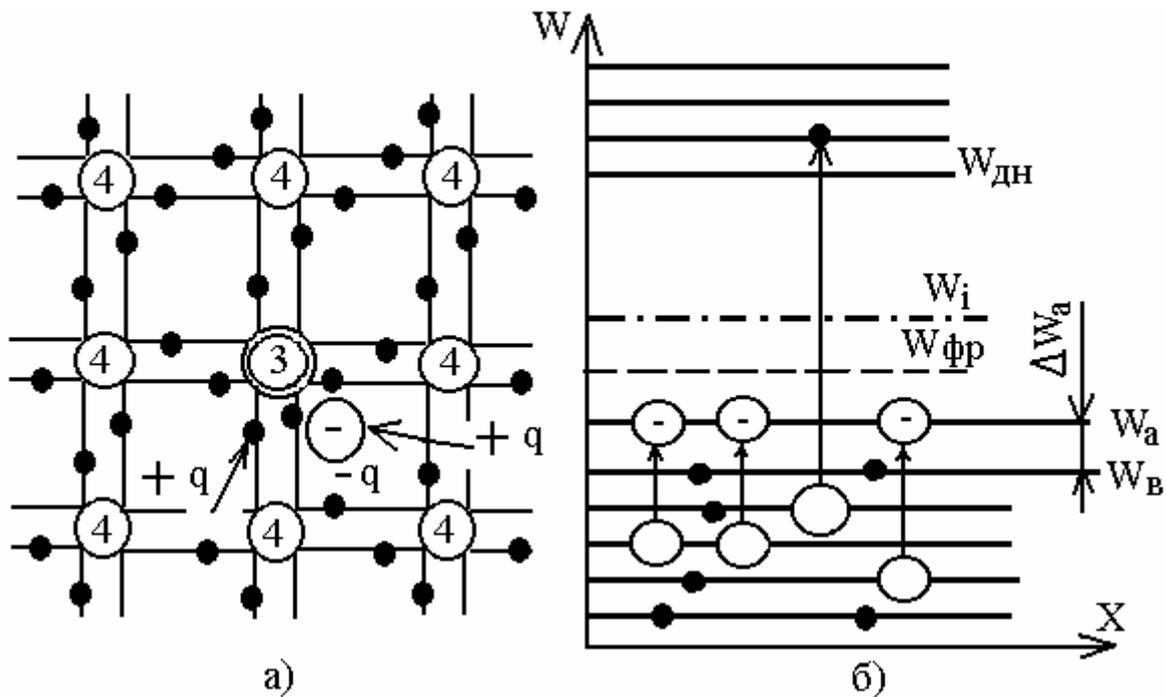


Рис. 37. Условное изображение кристаллической решетки (а) и энергетическая диаграмма (б) полупроводника с дырочной электропроводностью

За счет ионизации атомов исходного материала из валентной зоны часть электронов попадает в зону проводимости. Однако электронов в зоне проводимости значительно меньше, чем дырок в валентной зоне. Поэтому дырки в таких полупроводниках являются основными, а электроны – неосновными подвижными носителями заряда. Такие полупроводники носят название полупроводников с **дырочной** электропроводностью или полупроводников р-типа. В состоянии теплового равновесия концентрация дырок в полупроводнике р-типа (p_{p0}) и свободных электронов (n_{p0}) определяется из соотношений:

$$p_{p0} = n_i \exp((W_{ip} - W_{фр})/(kT)); \quad (1.7)$$

$$n_{p0} = n_i \exp((W_{фр} - W_{ip})/(kT)). \quad (1.8)$$

Из уравнений (1.7) и (1.8) следует, что для полупроводника р-типа выполняется неравенство $n_{p0} \gg p_{p0}$.

Если считать, что при комнатной температуре все акцепторные атомы ионизированы, т. е. $P_{p0} \approx N_a$, $n_{p0} \approx 0$, то на основании соотношения (1.7) можно записать:

$$W_{\text{фр}} = W_{\text{ip}} - kT \ln(N_a / n_i), \quad (1.9)$$

где: N_a — концентрация акцепторных атомов в полупроводнике.

Соотношение (1.9) показывает, что уровень Ферми в полупроводнике р-типа располагается в нижней половине запрещенной зоны, так как $N_a \gg n_i$, и при повышении температуры смещается к середине запрещенной зоны за счет ионизации атомов основного полупроводника.

Кроме того, на основании уравнений (1.4), (1.5), (1.7) и (1.8) можно записать следующее выражение:

$$n_{n_0} p_{n_0} = p_{n_0} n_{p_0} = n_i^2, \quad (1.10)$$

которое показывает, что введение в полупроводник примесей приводит к увеличению концентрации одних носителей заряда и пропорциональному уменьшению концентрации других носителей заряда за счет роста вероятности их рекомбинации.

6.4. Токи в полупроводниках. Дрейфовый ток

В полупроводниках свободные электроны и дырки находятся в состоянии хаотического движения. Поэтому, если выбрать произвольное сечение внутри объема полупроводника и подсчитать число носителей заряда, проходящих через это сечение за единицу времени слева направо и справа налево, значения этих чисел окажутся одинаковыми. Это означает, что электрический ток в данном объеме полупроводника отсутствует [6].

При помещении полупроводника в электрическое поле напряженностью E на хаотическое движение носителей зарядов накладывается составляющая направленного движения. Направленное движение носителей зарядов в электрическом поле обуславливает появление тока, называемого дрейфовым (рис. 38 (а)). Из-за столкновения носителей зарядов с атомами кристаллической решетки их движение в направлении действия электрического поля прерывисто и характеризуется подвижностью μ . Подвижность равна средней скорости \bar{v} , приобретаемой носителями заряда в направлении действия электрического поля напряженностью $E = 1$ В/м, т. е.:

$$\mu = \bar{v} / E. \quad (1.11)$$

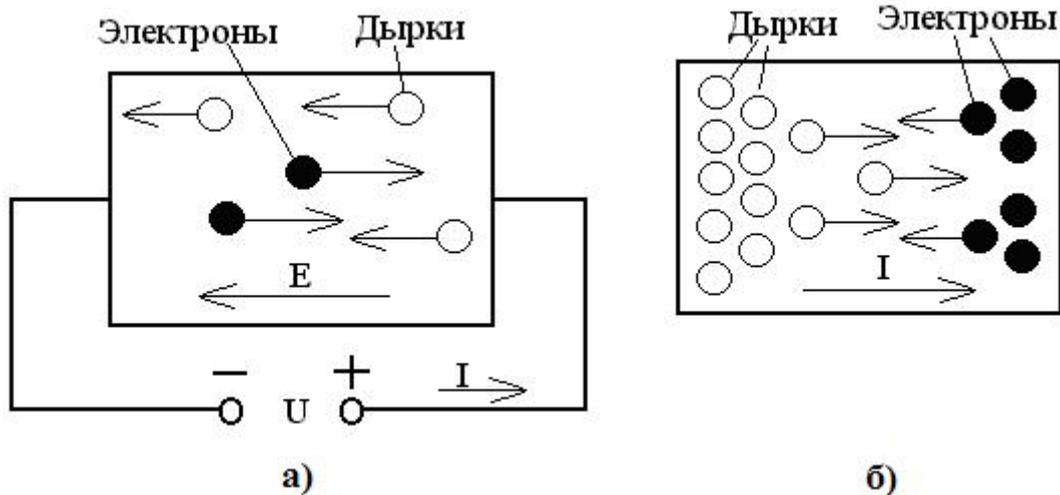


Рис. 38. Дрейфовый (а) и диффузионный (б) токи в полупроводнике

Подвижность носителей зарядов зависит от механизма их рассеивания в кристаллической решетке. Исследования показывают, что подвижности электронов μ_n и дырок μ_p имеют различное значение ($\mu_n > \mu_p$) и определяются температурой и концентрацией примесей. Увеличение температуры приводит к уменьшению подвижности, что зависит от числа столкновений носителей зарядов в единицу времени.

Плотность тока в полупроводнике, обусловленного дрейфом свободных электронов под действием внешнего электрического поля со средней скоростью \bar{v}_n , определяется выражением:

$$j_n = qn\bar{v}_n.$$

Перемещение (дрейф) дырок в валентной зоне со средней скоростью \bar{v}_p создает в полупроводнике дырочный ток, плотность которого равна:

$$j_p = qp\bar{v}_p.$$

Следовательно, полная плотность тока в полупроводнике содержит электронную j_n и дырочную j_p составляющие и равна их сумме (n и p — концентрации соответственно электронов и дырок).

Подставляя в выражение для плотности тока соотношение для средней скорости электронов и дырок (1.11), получаем:

$$j = q(n\mu_n + p\mu_p)E. \quad (1.12)$$

Если сравнить выражение (1.12) с законом Ома $j = \sigma E$, то удельная электропроводность полупроводника определяется соотношением:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = q(n\mu_n + p\mu_p).$$

У полупроводника с собственной электропроводностью концентрация электронов равна концентрации дырок ($n_i = p_i$), и его удельная электропроводность определяется выражением:

$$\sigma = qn_i(\mu_n + \mu_p) = qp_i(n\mu_n + p\mu_p).$$

В полупроводнике n-типа $n_{n_0} > p_{p_0}$, и его удельная электропроводность с достаточной степенью точности может быть определена выражением:

$$\sigma \approx \sigma_n = q\mu_n n_{n_0}.$$

В полупроводнике p-типа $p_{p_0} > n_{n_0}$, и удельная электропроводность такого полупроводника:

$$\sigma \approx \sigma_p = q\mu_p p_{p_0}.$$

В области высоких температур концентрация электронов и дырок значительно возрастает за счет разрыва ковалентных связей и, несмотря на уменьшение их подвижности, электропроводность полупроводника увеличивается по экспоненциальному закону.

6.5. Диффузионный ток

Кроме теплового возбуждения, приводящего к возникновению равновесной концентрации зарядов, равномерно распределенных по объему полупроводника, обогащение полупроводника электронами до концентрации n_p и дырками до концентрации p_n может осуществляться его освещением, облучением потоком заряженных частиц, введением их через контакт (инжекцией) и т. д. В этом случае энергия возбудителя передается непосредственно носителям заряда и тепловая энергия кристаллической решетки остается практически постоянной. Следовательно, избыточные носители заряда не находятся в тепловом равновесии с решеткой и поэтому называются неравновесными. В отличие от равновесных они могут неравномерно распределяться по объему полупроводника (см. рис. 38 (б)).

После прекращения действия возбудителя за счет рекомбинации электронов и дырок концентрация избыточных носителей быстро убывает и достигает равновесного значения.

Скорость рекомбинации неравновесных носителей пропорциональна избыточной концентрации дырок ($p_n - p_{n_0}$) или электронов ($n_p - n_{p_0}$):

$$dp / dt = -(p_n - p_{n_0}) / \tau_p ;$$

$$dn / dt = -(n_p - n_{p_0}) / \tau_n ,$$

где: τ_p - время жизни дырок; τ_n - время жизни электронов. За время жизни концентрация неравновесных носителей уменьшается в 2,7 раза. Время жизни избыточных носителей составляет 0,01...0,001 с.

Носители зарядов рекомбинируют в объеме полупроводника и на его поверхности. Неравномерное распределение неравновесных носителей зарядов сопровождается их диффузией в сторону меньшей концентрации.

Это движение носителей зарядов обуславливает прохождение электрического тока, называемого диффузионным (см. рис. 38 (б)).

Рассмотрим одномерный случай. Пусть в полупроводнике концентрации электронов $n(x)$ и дырок $p(x)$ являются функциями координаты. Это приведет к диффузионному движению дырок и электронов из области с большей их концентрацией в область с меньшей концентрацией.

Диффузионное движение носителей зарядов обуславливает прохождение диффузионного тока электронов и дырок, плотности которых определяются из соотношений:

$$j_{n\text{диф}} = qD_n \frac{dn(x)}{dx}; \quad (1.13)$$

$$j_{p\text{диф}} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}; \quad (1.14)$$

где: $dn(x)/dx$, $dp(x)/dx$ - градиенты концентраций электронов и дырок; D_n , D_p - коэффициенты диффузии электронов и дырок.

Градиент концентрации характеризует степень неравномерности распределения зарядов (электронов и дырок) в полупроводнике вдоль какого-то выбранного направления (в данном случае вдоль оси x). Коэффициенты диффузии показывают количество носителей заряда, пересекающих в единицу времени единичную площадку, перпендикулярную к выбранному направлению, при градиенте концентрации в этом направлении, равном единице. Коэффициенты диффузии связаны с подвижностями носителей зарядов соотношениями Эйнштейна:

$$D_n = \mu_n kT / q;$$

$$D_p = \mu_p kT / q.$$

Знак "минус" в выражении (1.14) означает противоположную направленность электрических токов в полупроводнике при диффузионном движении электронов и дырок в сторону уменьшения их концентраций.

Если в полупроводнике существует и электрическое поле, и градиент концентрации носителей, проходящий ток будет иметь дрейфовую и диффузионную составляющие [6]. В таком случае плотности токов рассчитываются по следующим уравнениям:

$$j_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn(x)}{dx};$$

$$j_p = qn\mu_p E - qD_p \frac{dp(x)}{dx}.$$

6.6. Контактные явления в полупроводниках. Электронно-дырочный переход в состоянии равновесия

Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на физических явлениях, происходящих в области контакта твердых тел. При этом преимущественно используются контакты: полупроводник-полупроводник; металл-полупроводник; металл-диэлектрик-полупроводник.

Если переход создается между полупроводниками n-типа и p-типа, то его называют электронно-дырочным или p-n переходом.

Электронно-дырочный переход создается в одном кристалле полупроводника с использованием сложных и разнообразных технологических операций.

Рассмотрим p-n переход, в котором концентрации доноров N_d и акцепторов N_a изменяются скачком на границе раздела (рис. 39 (а)). Такой p-n переход называют резким. Равновесная концентрация дырок в p-области (p_{p_0}) значительно превышает их концентрацию в n-области (n_{n_0}). Аналогично для электронов выполняется условие $n_{n_0} > n_{p_0}$. Неравномерное распределение концентраций одноименных носителей зарядов в кристалле (рис. 39 (б)) приводит к возникновению диффузии электронов из n-области в p-область и дырок из p-области в n-область. Такое движение зарядов создает диффузионный ток электронов и дырок. С учетом выражений (1.13) и (1.14) плотность полного диффузионного тока, проходящего через границу раздела, определится суммой:

$$j_{\text{диф}} = j_{n\text{диф}} + j_{p\text{диф}} = q \left(D_n \frac{dn(x)}{dx} + D_p \frac{dp(x)}{dx} \right).$$

Электроны и дырки, переходя через контакт навстречу друг другу (благодаря диффузии), рекомбинируют и в приконтактной области дырочного полупроводника образуется нескомпенсированный заряд отрицательных ионов акцепторных примесей, а в электронном полупроводнике нескомпенсированный заряд положительных донорных ионов. Таким образом, электронный полупроводник заряжается положительно, а дырочный - отрицательно. Между областями с различными типами электропроводности возникает собственное электрическое поле напряженностью $E_{\text{соб}}$ (рис. 39 (а)), созданное двумя слоями объемных зарядов.

Этому полю соответствует разность потенциалов U_k между n- и p-областями, называемая контактной (рис. 39 (г)). За пределами области

объемного заряда полупроводниковые области n- и p-типа остаются электрически нейтральными. Собственное электрическое поле является тормозящим для основных носителей заряда и ускоряющим для неосновных. Электроны p-области и дырки n-области, совершая тепловое движение, попадают в пределы диффузионного электрического поля, увлекаются им и перебрасываются в противоположные области, образуя ток дрейфа, или ток проводимости.

Выведение носителей заряда из области полупроводника, где они являются неосновными, через электронно-дырочный переход ускоряющим электрическим полем называют экстракцией носителей заряда. Используя выражение (1.12) и учитывая, что $E = -dU/dx$, определяем плотность полного дрейфового тока через границу раздела p- и n-областей:

$$j_{др} = -q \frac{dU}{dx} (n\mu_n + p\mu_p).$$

Так как через изолированный полупроводник ток проходить не должен, между диффузионным и дрейфовым токами устанавливается динамическое равновесие:

$$j_{диф} + j_{др} = 0. \quad (1.15)$$

Приконтактную область, где имеется собственное электрическое поле, называют **p-n переходом**.

Поскольку потенциальная энергия электрона и потенциал связаны соотношением $W = -qU$, образование нескомпенсированных объемных зарядов вызывает понижение энергетических уровней n-области и повышение энергетических уровней p-области. Смещение энергетических диаграмм прекратится, когда уровни Ферми W_{fn} и W_{fp} совпадут (рис. 39 (д)). При этом на границе раздела ($x = 0$) уровень Ферми проходит через середину запрещенной зоны. Это означает, что в плоскости сечения $x = 0$ полупроводник характеризуется собственной электропроводностью и обладает по сравнению с остальным объемом повышенным сопротивлением. В связи с этим его называют запирающим слоем или областью объемного заряда.

Совпадение уровней Ферми n- и p-областей соответствует установлению динамического равновесия между областями и возникновению между ними потенциального барьера U_k для диффузионного перемещения через p-n переход электронов n-области и дырок p-области.

Из рис. 39 (д) следует, что потенциальный барьер:

$$U_k = \frac{1}{q} ((W_{ip} - W_{fp}) + (W_{fn} - W_{in})).$$

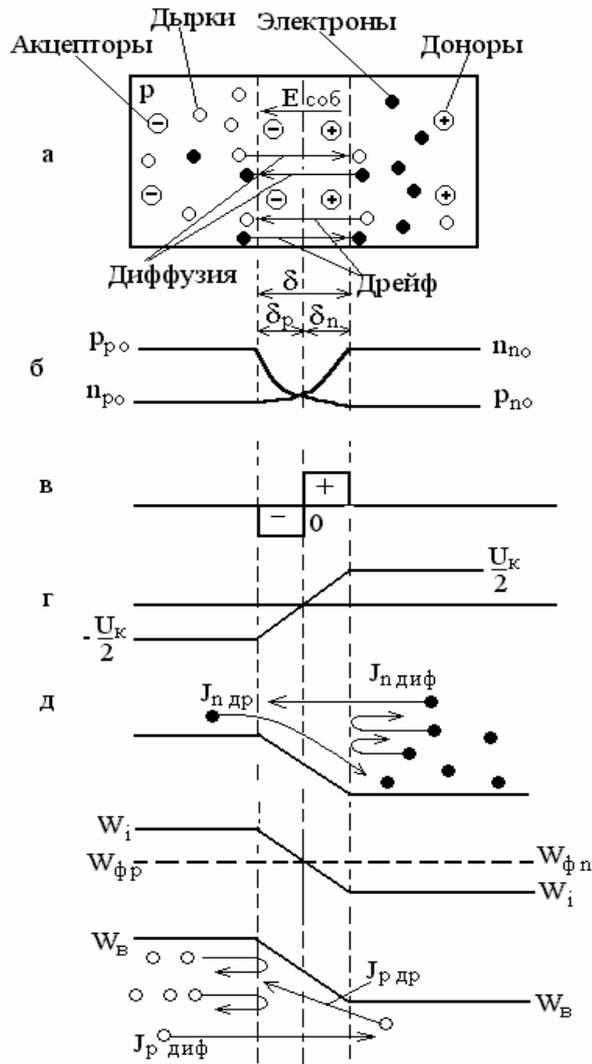


Рис. 39. Равновесное состояние p-n перехода

Подстановка в это выражение результатов логарифмирования соотношений (1.4) и (1.7) позволяет получить следующее равенство:

$$U_k = \frac{kT}{q} \text{Ln} \frac{n_{n0} p_{p0}}{n_i^2}.$$

Если обозначить $\varphi_T = kT/q$ и учесть уравнение (1.10), то можно записать:

$$U_k = \varphi_T \text{Ln} \frac{n_{n0}}{n_{p0}}; \tag{1.16}$$

$$U_k = \varphi_T \text{Ln} \frac{p_{p0}}{p_{n0}}. \tag{1.17}$$

Из уравнений (1.16) и (1.17) следует:

$$\begin{aligned} p_{n_0} &= p_{p_0} \exp(-U_k / \varphi_T); \\ n_{n_0} &= n_{p_0} \exp(-U_k / \varphi_T). \end{aligned} \quad (1.18)$$

При комнатной температуре ($T = 300 \text{ K}$) $\varphi_T \approx 0,026 \text{ В}$.

Таким образом, контактная разность потенциалов зависит от отношения концентраций носителей зарядов одного знака в p- и n-областях полупроводника.

Другим важным параметром p-n перехода является его ширина, обозначаемая $\delta = \delta_p + \delta_n$.

Ширину запирающего слоя δ можно найти, решив уравнения Пуассона для n-области и p-области:

$$d^2\varphi/dx^2 = qN_D/\varepsilon; \quad (1.19)$$

$$d^2\varphi/dx^2 = qN_A/\varepsilon. \quad (1.20)$$

Решения уравнений (1.19) и (1.20) при граничных условиях:

$$\varphi(-\delta_p) = 0; \quad \left. \frac{d\varphi}{dx} \right|_{x=-\delta_p} = 0 \quad \varphi(\delta_n) = U_k; \quad \left. \frac{d\varphi}{dx} \right|_{x=\delta_n} = 0$$

имеют вид:

$$\varphi_p = \frac{q}{2\varepsilon} N_A (\delta_p + x)^2 \quad \text{для } -\delta_p < x < 0;$$

$$\varphi_n = \frac{q}{2\varepsilon} N_A (\delta_p + x)^2 \quad \text{для } 0 < x < \delta_n; \quad (1.21)$$

В точке $x = 0$ оба решения должны давать одинаковые значения φ и $\frac{d\varphi_p}{dx}$. Приравняв $\left. \frac{d\varphi_p}{dx} \right|_{x=0}$ и $\left. \frac{d\varphi_n}{dx} \right|_{x=0}$, можно записать:

$$\delta_n / \delta_p = N_A / N_D. \quad (1.22)$$

Из равенства (1.22) видно, что ширина слоев объемных зарядов в n- и p-областях обратно пропорциональна концентрациям примесей и в несимметричном переходе запирающий слой расширяется в область с меньшей концентрацией примесей.

На основании равенства (1.22) можно записать:

$$\begin{aligned} \delta_n / \delta &= N_A / (N_D + N_A); \\ \delta_p / \delta &= N_D / (N_D + N_A), \end{aligned} \quad (1.23)$$

где: $\delta = \delta_n + \delta_p$.

Приравнивая правые части уравнений (1.21) и учитывая соотношения (1.23), при $x = 0$ получаем:

$$U_k = \frac{q}{2\varepsilon} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \delta^2.$$

На основании этого выражения формулу для определения ширины запирающего слоя р-п перехода можно записать в следующем виде:

$$\delta = \delta_n + \delta_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon(N_A + N_D)U_k}{qN_A N_D}}. \quad (1.24)$$

Из соотношения (1.24) видно, что на ширину запирающего слоя существенное влияние оказывает концентрация примесных атомов. Увеличение концентрации примесных атомов сужает запирающий слой, а уменьшение расширяет его. Это часто используется для придания полупроводниковым приборам требуемых свойств.

6.7. Прямое включение р-п перехода

При использовании р-п перехода в полупроводниковых приборах к нему подключается внешнее напряжение. Величина и полярность этого внешнего напряжения определяют электрический ток, проходящий через р-п переход.

Если положительный полюс источника питания подключается к р-области, а отрицательный полюс - к п-области, то включение р-п перехода называют прямым. При изменении указанной полярности источника питания включение р-п перехода называют обратным [6].

Прямое включение р-п перехода показано на рис. 40. Поскольку сопротивление р-п перехода значительно превышает сопротивление нейтральных р- и п-областей, внешнее напряжение $U_{пр}$ почти полностью падает на этом переходе.

Прямое напряжение создает в переходе внешнее электрическое поле, направленное навстречу собственному.

Напряженность результирующего поля падает, и уровни Ферми смещаются таким образом, что потенциальный барьер уменьшается до $U_k - U_{пр}$. Это сопровождается сужением запирающего слоя, ширина которого может быть найдена из соотношения (1.24) подстановкой вместо U_k величины $U_k - U_{пр}$:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon(N_A + N_D)}{qN_A N_D}} (U_k - U_{пр}).$$

В результате снижения потенциального барьера большее количество основных носителей зарядов получает возможность диффузионно переходить в соседнюю область, что сопровождается ростом тока

диффузии. Ток дрейфа при этом не изменится, поскольку он зависит от количества неосновных носителей, появляющихся на границах р-п перехода. Это количество зависит только от концентрации примесей в полупроводнике и температуры.

Увеличение диффузионной составляющей тока через р-п переход при неизменной дрейфовой составляющей приводит к нарушению термодинамического равновесия, устанавливаемого выражением (1.15). Через переход будет проходить результирующий ток, определяемый диффузионной составляющей.

Дополнительная диффузия носителей зарядов приводит к тому, что на границе р-п перехода повышаются концентрации дырок в области n-типа до некоторого значения P_{N1} и электронов в р-области до значения N_{P1} . Повышение концентраций неосновных носителей в р- и n-областях вследствие влияния внешнего напряжения, приложенного к электронно-дырочному переходу, получило название **инъекции** неосновных носителей. Область, из которой происходит инжекция, называют эмиттером, а область, в которую осуществляется инжекция, — базой.

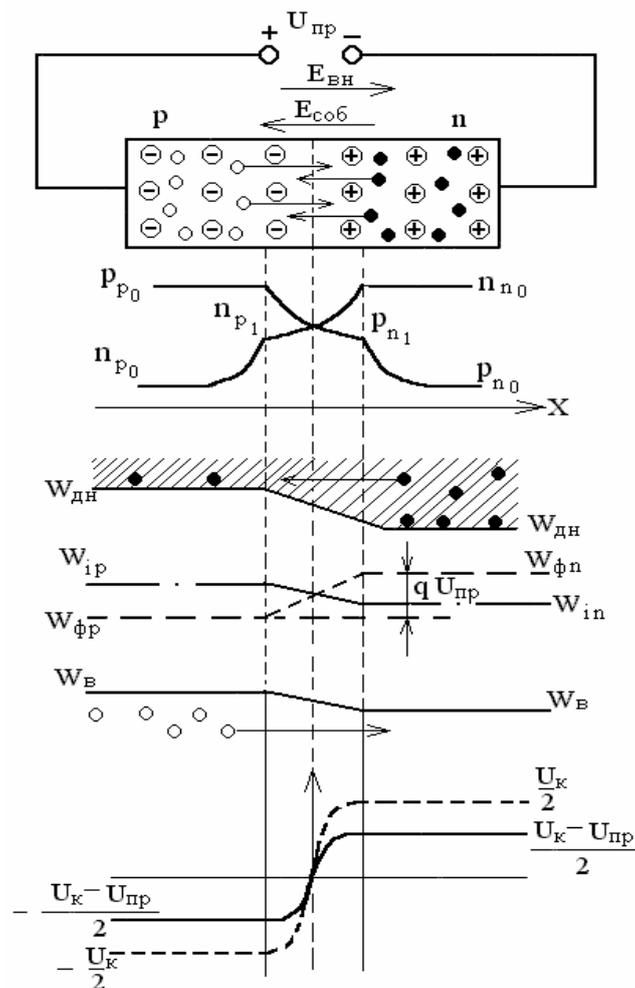


Рис. 40. Прямое включение р-п перехода

Поскольку при прямом включении р-п перехода потенциальный барьер уменьшается, концентрации неосновных носителей на границах р-п перехода могут быть рассчитаны по формулам (1.18) при замене U_K величиной $U_K - U_{\text{пр}}$. Тогда:

$$p_{n_1} = p_{p_0} \exp(-(U_K - U_{\text{пр}}) / \varphi_T) = p_{n_0} \exp(U_{\text{пр}} / \varphi_T); \quad (1.25)$$

$$n_{n_1} = n_{n_0} \exp(-(U_K - U_{\text{пр}}) / \varphi_T) = n_{p_0} \exp(U_{\text{пр}} / \varphi_T). \quad (1.26)$$

Из выражений (1.25) и (1.26) следует, что на границах р-п перехода под действием прямого напряжения $U_{\text{пр}}$ происходит увеличение концентраций неосновных носителей.

Неравновесные неосновные носители зарядов диффундируют в глубь полупроводника и нарушают его электронейтральность. Восстановление нейтрального состояния полупроводников происходит за счет поступления носителей зарядов от внешнего источника. Это является причиной возникновения тока во внешней цепи, называемого прямым и обозначаемого $I_{\text{пр}}$.

Концентрации неосновных носителей в нейтральной области полупроводника зависят от координаты x . Закон их распределения может быть найден путем решения уравнения непрерывности для установившегося состояния, т. е. состояния, при котором концентрация неосновных носителей не изменяется во времени. Этому условию соответствуют уравнения непрерывности, которые при $E = 0$ записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 p_n(x)}{\partial x^2} - \frac{p_n(x) - p_{n_0}}{L_p^2} = 0; \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial^2 n_p(x)}{\partial x^2} - \frac{n_p(x) - n_{n_0}}{L_n^2} = 0; \quad (1.28)$$

где: $L_p = \sqrt{\tau_p D_p}$ - диффузионная длина дырок в п-области; $L_n = \sqrt{\tau_n D_n}$ - диффузионная длина электронов в р-области.

Решения уравнений непрерывности (1.27) и (1.28) для нейтральной области полупроводников (начало отсчета координаты совпадает с границами р-п перехода) при очевидных из рис. 39 начальных условиях и с учетом соотношений (1.25) и (1.26) имеют вид:

$$p_n(x) = p_{n_0} + p_{n_0} (\exp(U_{\text{пр}} / \varphi_T) - 1) \exp(-x / L_p); \quad (1.29)$$

$$n_p(x) = n_{p_0} + n_{p_0} (\exp(U_{\text{пр}} / \varphi_T) - 1) \exp(-x / L_n). \quad (1.30)$$

Таким образом, на границе запирающего слоя ($x = 0$) за счет инжекции концентрация носителей повышается и достигает следующих значений:

$$p_{n_1} = p_{n_0} + p_{n_0} (\exp(U_{\text{пр}} / \varphi_T) - 1);$$

$$n_{p_1} = n_{p_0} + n_{p_0} (\exp(U_{\text{пр}} / \varphi_T) - 1).$$

Уравнения (1.29) и (1.30) показывают, что в неравновесном состоянии при удалении от р-п перехода концентрации неосновных носителей зарядов вследствие рекомбинации убывают по экспоненциальному закону от значений p_{n_1} и n_{p_1} до p_{n_0} и n_{p_0} .

При $x = L_p$ и $x = L_n$ концентрации неосновных носителей уменьшаются в 2,7 раза. Таким образом, диффузионная длина - это расстояние, на котором концентрация неосновных носителей в неравновесном состоянии уменьшается в e раз.

6.8. Обратное включение р-п-перехода

При включении р-п перехода в обратном направлении (рис. 41) внешнее обратное напряжение $U_{обр}$ создает электрическое поле, совпадающее по направлению с собственным, что приводит к росту потенциального барьера на величину $U_{обр}$ и увеличению относительного смещения энергетических диаграмм на $q(U_k + U_{обр})$. Это сопровождается увеличением ширины запирающего слоя, которая может быть найдена из соотношения (1.24) подстановкой вместо U_k величины $U_k + U_{обр}$.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon(N_A + N_D)}{qN_A N_D}} (U_k + U_{обр}). \quad (1.31)$$

Возрастание потенциального барьера уменьшает диффузионные токи основных носителей (т. е. меньшее их количество преодолет возросший потенциальный барьер). Для неосновных носителей поле в р-п переходе остается ускоряющим, и поэтому дрейфовый ток не изменится.

Уменьшение диффузионного тока приведет к нарушению условия равновесия, устанавливаемого выражением (1.15). Через переход будет проходить результирующий ток, определяемый в основном током дрейфа неосновных носителей [6].

Концентрация неосновных носителей у границ р-п перехода вследствие уменьшения диффузионного перемещения основных носителей уменьшится до некоторых значений n_{p_1} и p_{n_1} . По мере удаления от р-п перехода концентрация неосновных носителей будет возрастать до равновесной. Значение концентрации неосновных носителей заряда на любом удалении x от границ р-п перехода можно рассчитать по следующим формулам, полученным при решении уравнения непрерывности для обратного, включения р-п перехода:

$$p_n(x) = p_{n_0} + p_{n_0} (\exp(-U_{обр} / \varphi_T) - 1) \exp(-x / L_p); \quad (1.32)$$

$$n_p(x) = n_{p_0} + n_{p_0} (\exp(-U_{обр} / \varphi_T) - 1) \exp(-x / L_n). \quad (1.33)$$

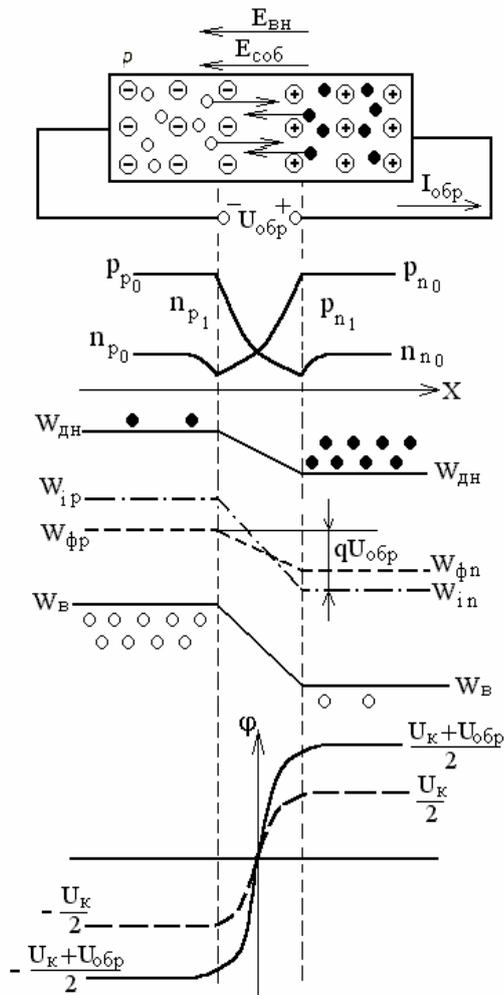


Рис. 41. Обратное включение p-n перехода

6.9. Теоретическая вольт-амперная характеристика p-n перехода

Вольтамперная характеристика представляет собой график зависимости тока во внешней цепи p-n перехода от значения и полярности напряжения, прикладываемого к нему. Эта зависимость может быть получена экспериментально или рассчитана на основании уравнения вольтамперной характеристики.

При включении p-n перехода в прямом направлении в результате инжекции возникает прямой диффузионный ток.

Уравнения для плотности электронной и дырочной составляющих прямого тока получаются подстановкой соотношений (1.29) и (1.30) в (1.13) и (1.14) и, записываются в следующем виде:

$$j_{p\text{диф}} = \frac{q p_{n0} D_p}{L_p} (\exp(U_{\text{ПР}} / \varphi_T) - 1) \exp(-x / L_p);$$

$$j_{n\text{диф}} = \frac{q n_{p0} D_n}{L_n} (\exp \frac{U_{\text{ПР}}}{\varphi_T} - 1) \exp \frac{x}{L_p}.$$

Плотность прямого тока, проходящего через р-п переход, можно определить как сумму $j_{\text{пр}} = j_{n\text{диф}} + j_{p\text{диф}}$, не изменяющуюся при изменении координаты x . Если считать, что в запирающем слое отсутствуют генерация и рекомбинация носителей зарядов, то плотность прямого тока, определяемая на границах р-п перехода (при $x = 0$):

$$j_{\text{ПР}} = j_{n\text{диф}} + j_{p\text{диф}} = q \left(\frac{p_{n0} D_p}{L_p} + \frac{n_{p0} D_n}{L_n} \right) (\exp \frac{U_{\text{ПР}}}{\varphi_T} - 1). \quad (1.34)$$

Включение р-п перехода в обратном направлении приводит к обеднению приконтактной области неосновными носителями и появлению градиента их концентрации. Градиент концентрации является причиной возникновения диффузионного тока неосновных носителей.

На основании соотношений (1.13), (1.14) и (1.32), (1.33) выражение для расчета плотности обратного тока может быть записано в виде

$$j_{\text{ОБР}} = q \left(\frac{p_{n0} D_p}{L_p} + \frac{n_{p0} D_n}{L_n} \right) (\exp(-\frac{|U_{\text{ОБР}}|}{\varphi_T}) - 1). \quad (1.35)$$

Объединяя выражения (1.34) и (1.35), можно записать уравнение для плотности тока в общем виде:

$$j = j_s (\exp(U / \varphi_T) - 1), \quad (1.36)$$

$$\text{где: } j_s = \left(\frac{p_{n0} D_p}{L_p} + \frac{n_{p0} D_n}{L_n} \right) q.$$

Величину j_s называют плотностью тока насыщения. Умножив правую и левую части выражения (1.36) на площадь Π р-п перехода, получим уравнение теоретической вольтамперной характеристики:

$$I = jn = I_s (\exp(U / \varphi_T) - 1), \quad (1.37)$$

где: I_s - ток насыщения. В это уравнение напряжение U подставляется со знаком "плюс" при включении р-п перехода в прямом направлении и со знаком "минус" при обратном включении.

Уравнение (1.37) позволяет рассчитать теоретическую вольтамперную характеристику тонкого электронно-дырочного перехода, в котором отсутствуют генерация и рекомбинация носителей зарядов.

Теоретическая вольтамперная характеристика р-п перехода, построенная на основании уравнения (1.37), приведена на рис. 42. При увеличении обратного напряжения ток через р-п переход стремится к

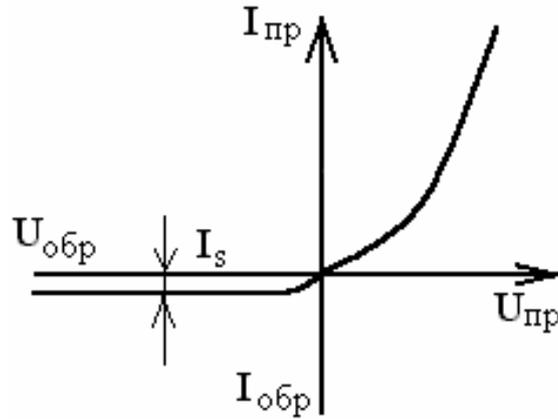


Рис. 42. Теоретическая вольтамперная характеристика p-n перехода

предельному значению j_s , которого достигает при обратном напряжении примерно 0,1...0,2 В.

На основании соотношений (1.2), (1.5), (1.8) и (1.10), считая, что все атомы примесей ионизированы, т. е. $p_{p_0} = N_a$, для области рабочих температур можно записать:

$$I_s = qA \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) A^2 \exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right). \quad (1.38)$$

Из соотношения (1.38) видно, что чем больше ширина запрещенной зоны полупроводника и концентрация примесей доноров и акцепторов, тем меньше ток насыщения, а с увеличением температуры ток насыщения растет по экспоненциальному закону.

Процессы генерации и рекомбинации носителей в запирающем слое оказывают существенное влияние на вид вольтамперной характеристики. В отсутствие внешнего напряжения между процессами генерации и рекомбинации устанавливается равновесие. При приложении к p-n переходу обратного напряжения дырки и электроны, образующиеся в результате генерации, выводятся полем запирающего слоя. Это приводит к возникновению дополнительного тока генерации $I_{ген}$, совпадающего с обратным током p-n перехода. Можно показать, что при $n_{n_0} = p_{p_0}$, $\tau_n = \tau_p = \tau_0$ и $L_n = L_p = L_0$ справедливо соотношение:

$$I_{ген} / I_s = n_{n_0} \delta_0 / (4n_i L_0), \quad (1.39)$$

где: δ_0 - толщина запирающего слоя.

Из выражения (1.39) видно, что генерационная составляющая обратного тока растет при увеличении ширины запрещенной зоны полупроводника, так как при этом уменьшается значение n_i , а также при увеличении концентрации примесей, при которой возрастает n_{n_0} . Например, при одинаковых значениях δ_0 и L_0 для германия $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ($\Delta W = 0,67 \text{ эВ}$) и $I_{ген} = 0,1 \cdot I_s$, а для кремния $n_i = 6,8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ($\Delta W = 1,12 \text{ эВ}$) и $I_{ген} = 3000 \cdot I_s$.

Таким образом, если в германиевых р-п переходах током генерации можно пренебречь, то в кремниевых р-п переходах он является основной составляющей обратного тока. Поэтому на вольтамперных характеристиках кремниевых р-п переходов нет выраженного участка насыщения.

6.10. Реальная вольт–амперная характеристика р-п перехода

При выводе уравнения (1.37) не учитывались такие явления, как термогенерация носителей в запирающем слое перехода, поверхностные утечки тока, падение напряжения на сопротивлении нейтральных областей полупроводника, а также явления пробоя при определенных обратных напряжениях. Поэтому экспериментальная вольтамперная характеристика р-п перехода (рис. 43 кривая 2) отличается от теоретической (рис. 43 кривая 1).

При обратном включении р-п перехода отличия обусловлены генерацией носителей зарядов и пробоем р-п перехода. Количество генерируемых носителей пропорционально объему запирающего слоя, который зависит от ширины р-п перехода. Поскольку ширина запирающего слоя пропорциональна $\sqrt{U_{\text{ОБР}}}$, ток генерации будет расти при увеличении обратного напряжения. Поэтому, на реальной характеристике при увеличении обратного напряжения до определенного значения наблюдается небольшой рост обратного тока [6]. Возрастанию обратного тока способствуют также токи утечки.

При некотором обратном напряжении наблюдается резкое возрастание обратного тока. Это явление называют пробоем р-п перехода. Существуют три вида пробоя: туннельный, лавинный и тепловой. Туннельный и лавинный пробой представляют собой разновидности электрического пробоя и связаны с увеличением напряженности электрического поля в переходе. Тепловой пробой определяется перегревом перехода.

Туннельный пробой обусловлен прямым переходом электронов из валентной зоны одного полупроводника в зону проводимости другого, что становится возможным, если напряженность электрического поля в р-п переходе из кремния достигает значения $4 \cdot 10^5$ В/см, а из германия $-2 \cdot 10^5$ В/см. Такая большая напряженность электрического поля возможна при высокой концентрации примесей в р- и n-областях, когда толщина р-п перехода становится весьма небольшой (см. формулу (1.31)).

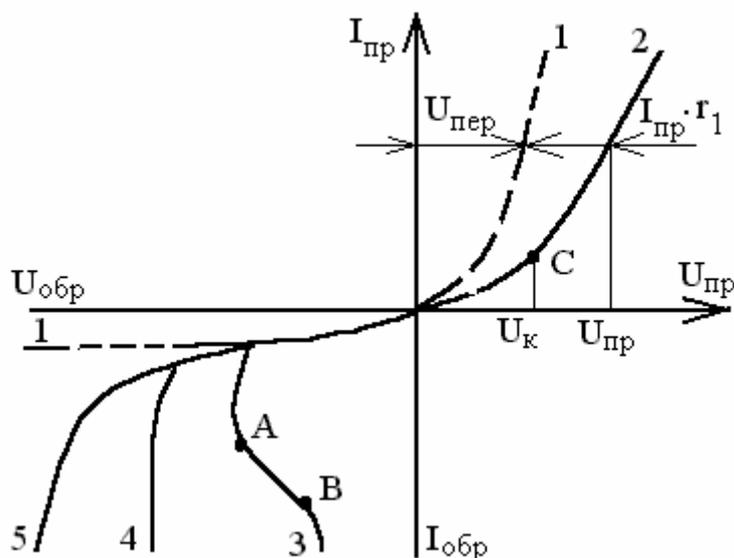


Рис. 43. Отличие реальной вольтамперной характеристики р-п перехода от теоретической

Под действием сильного электрического поля валентные электроны вырываются из связей. При этом образуются парные заряды электрон-дырка, увеличивающие обратный ток через переход. На рис. 42 кривая 5 представляет собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики перехода, соответствующую туннельному пробое.

В широких р-п переходах, образованных полупроводниками с меньшей концентрацией примесей, вероятность туннельного просачивания электронов уменьшается и более вероятным становится лавинный пробой. Он возникает тогда, когда длина свободного пробега электрона в полупроводнике значительно меньше толщины р-п перехода. Если за время свободного пробега электроны приобретают кинетическую энергию, достаточную для ионизации атомов в р-п переходе, наступает ударная ионизация, сопровождающаяся лавинным размножением носителей зарядов. Образовавшиеся в результате ударной ионизации свободные носители зарядов увеличивают обратный ток перехода. Увеличение обратного тока характеризуется коэффициентом лавинного умножения M :

$$M = \frac{1}{1 - (U_{\text{обр}} / U_{\text{проб}})^m}, \quad (1.40)$$

где: $U_{\text{проб}}$ - напряжение начала пробоя; m зависит от материала полупроводника. На рис 43 лавинному пробое соответствует кривая 4.

Тепловой пробой обусловлен значительным ростом количества носителей зарядов в р-п переходе за счет нарушения теплового режима. Подводимая к р-п переходу мощность $P_{\text{подв}} = I_{\text{обр}} U_{\text{обр}}$ расходуется на его нагрев.

Выделяющаяся в запирающем слое теплота отводится преимущественно за счет теплопроводности. Отводимая от р-п перехода мощность $P_{\text{отв}}$ пропорциональна разности температур перехода $T_{\text{пер}}$ и окружающей среды $T_{\text{окр}}$:

$$P_{\text{отв}} = (T_{\text{пер}} - T_{\text{окр}}) / R_T,$$

где: R_T - тепловое сопротивление, $^{\circ}\text{K}/\text{Вт}$, определяющее перепад температур, необходимый для отвода 1 Вт мощности от р-п перехода в окружающую среду.

При плохих условиях отвода теплоты от перехода возможен его разогрев до температуры, при которой происходит тепловая ионизация атомов. Образующиеся при этом носители заряда увеличивают обратный ток, что приводит к дальнейшему разогреву перехода. В результате такого нарастающего процесса р-п переход недопустимо разогревается и возникает тепловой пробой, характеризующийся разрушением кристалла (кривая 3).

Увеличение числа носителей зарядов при нагреве р-п перехода приводит к уменьшению его сопротивления и выделяемого на нем напряжения. Вследствие этого на обратной ветви вольтамперной характеристики при тепловом пробое появляется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (участок АВ на рис. 43).

Отличия реальной характеристики от теоретической на прямой ветви, в основном, обусловлены распределенным (объемным) сопротивлением электронной и дырочной областей r_1 за пределами запирающего слоя.

Если сопротивление запирающего слоя обозначить как r_d , то кристалл полупроводника с запирающим слоем можно представить в виде последовательного соединения резисторов r_d и r_1 .

При прохождении тока $I_{\text{пр}}$ на сопротивлении r_1 падает часть напряжения внешнего источника и на запирающем слое действует напряжение $U_{\text{пер}} = U_{\text{пр}} - I_{\text{пр}} \cdot r_1$. Уравнение вольтамперной характеристики в этом случае может быть записано в следующем неявном виде:

$$I_{\text{пр}} = I_S (\exp((U_{\text{пр}} - I_{\text{пр}} r_1) / \phi_T) - 1).$$

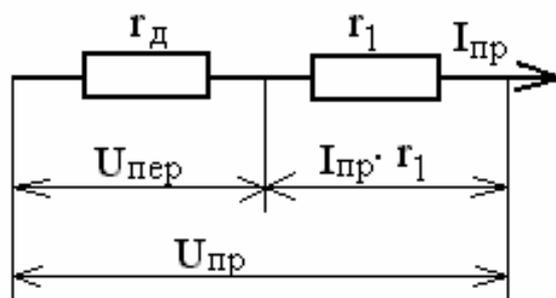


Рис. 44. Упрощенная эквивалентная схема р-п перехода с распределенным сопротивлением полупроводника

Поскольку $U_{\text{ПЕР}} < U_{\text{ПР}}$, то реальная характеристика идет ниже теоретической. Когда напряжение на запирающем слое становится равным контактной разности потенциалов, запирающий слой исчезает, и дальнейшее увеличение тока ограничивается распределенным сопротивлением полупроводников р- и n-типа. Таким образом, в точке С при $U_{\text{ПР}} = U_{\text{К}}$ вольтамперная характеристика переходит в прямую линию.

6.11. Емкости р-n перехода

Изменение внешнего напряжения dU на р-n переходе приводит к изменению накопленного в нем заряда dQ . Поэтому р-n переход ведет себя подобно конденсатору, емкость которого $C = dQ/dU$.

В зависимости от физической природы изменяющегося заряда различают емкости барьерную (зарядную) и диффузионную.

Барьерная (зарядная) емкость определяется изменением нескомпенсированного заряда ионов при изменении ширины запирающего слоя под воздействием внешнего обратного напряжения. Поэтому идеальный электронно-дырочный переход можно рассматривать как плоский конденсатор, емкость которого определяется соотношением

$$C_{\text{БАР}} = \varepsilon \Pi / \delta, \quad (1.41)$$

где: Π , δ - соответственно площадь и толщина р-n перехода.

Из соотношений (1.41) и (1.31) следует:

$$C_{\text{БАР}} = \Pi \sqrt{\frac{\varepsilon q N_A N_D}{2(U_K + |U_{\text{ОБР}}|)(N_A + N_D)}}.$$

В общем случае зависимость зарядной емкости от приложенного к р-n переходу обратного напряжения выражается формулой:

$$C_{\text{БАР}} = \frac{C_0}{(1 + |U_{\text{ОБР}}|/U_K)^\gamma},$$

где: C_0 — емкость р-n перехода при $U_{\text{ОБР}} = 0$;

γ - коэффициент, зависящий от типа р-n перехода (для резких р-n переходов $\gamma = 1/2$, а для плавных $\gamma = 1/3$).

Барьерная емкость увеличивается с ростом N_A и N_D , а также с уменьшением обратного напряжения. Характер зависимости $C_{\text{БАР}} = f(U_{\text{ОБР}})$ показан на рис. 45 (а).

Рассмотрим диффузионную емкость. При увеличении внешнего напряжения, приложенного к р-n переходу в прямом направлении, растет концентрация инжектированных носителей вблизи границ перехода, что приводит к изменению количества заряда, обусловленного неосновными носителями в р- и n-областях. Это можно рассматривать как проявление

некоторой емкости. Поскольку она зависит от изменения диффузионной составляющей тока, ее называют диффузионной. Диффузионная емкость представляет собой отношение приращения инжекционного заряда $dQ_{инж}$ к вызвавшему его изменению напряжения $dU_{пр}$, т. е. $C_{диф} = dQ_{инж} / dU_{пр}$. Воспользовавшись уравнением (1.30), можно определить заряд инжектированных носителей, например дырок в n-области:

$$Q_{р_{инж}} = q \pi \int_{\delta_{\square}}^{\infty} (p_n(x) - p_{n0}) dx = qL_p \pi p_{n0} (\exp(U_{пр} / \varphi_T) - 1).$$

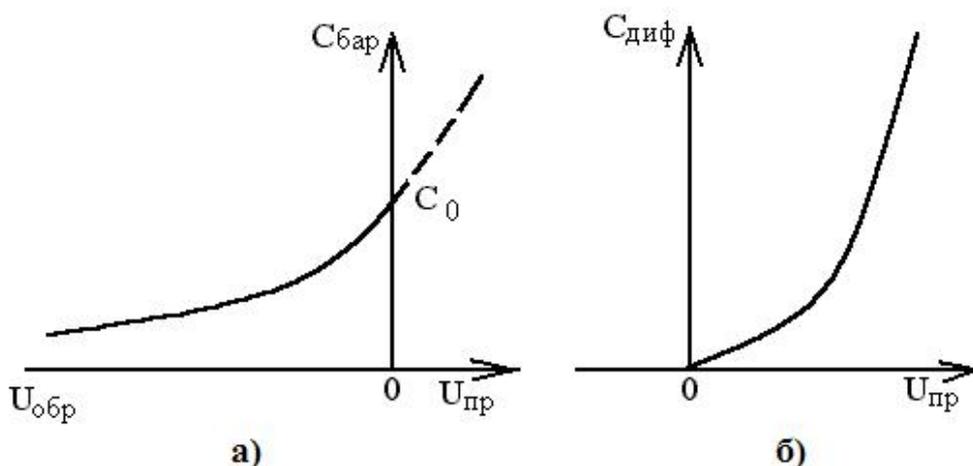


Рис. 45. Зависимость барьерной (а) и диффузионной (б) емкостей р-п перехода от напряжения

Тогда диффузионная емкость, обусловленная изменением общего заряда неравновесных дырок в n-области, определится по формуле:

$$C_{дифр} = \frac{dQ_p}{dU_{пр}} = \frac{qL_p \pi p_{n0}}{\varphi_T} \exp \frac{U_{пр}}{\varphi_T}.$$

Аналогично для диффузионной емкости, обусловленной инжекцией электронов в p-область:

$$C_{дифн} = \frac{dQ_n}{dU_{пр}} = \frac{qL_n \pi n_{p0}}{\varphi_T} \exp \frac{U_{пр}}{\varphi_T}.$$

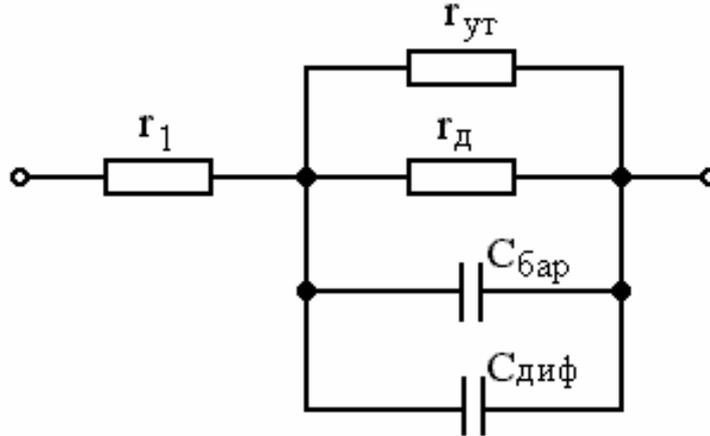


Рис. 46. Эквивалентная схема р-п перехода

Общая диффузионная емкость:

$$C_{\text{диф}} = C_{\text{диф}_p} + C_{\text{диф}_n} = (q\Pi / \varphi_T)(L_n n_{p0} + L_p p_{n0}) \exp(U_{\text{пр}} / \varphi_T).$$

Зависимость ёмкости от прямого напряжения на р-п переходе показана на рисунке 45 (б).

Полная емкость р-п перехода определяется суммой зарядной и диффузионной емкостей:

$$C_{\text{пер}} = C_{\text{бар}} + C_{\text{диф}}.$$

При включении р-п перехода в прямом направлении преобладает диффузионная емкость, а при включении в обратном направлении - зарядная.

На рис. 46 приведена эквивалентная схема р-п перехода по переменному току. Схема содержит дифференциальное сопротивление р-п перехода $r_{\text{д}}$, диффузионную емкость $C_{\text{диф}}$, барьерную емкость $C_{\text{бар}}$ и сопротивление объема р- и n-областей r_1 . На основании уравнения (1.37) можно записать:

$$\frac{1}{r_{\text{б}}} = \frac{dI}{dU} = \frac{I_s}{\varphi_T} \exp \frac{U}{\varphi_T}.$$

Если при прямом включении р-п перехода $U_{\text{пр}} \gg \varphi_T$, то:

$$I_{\text{.p}} = I_s (\exp(U_{\text{.p}} / \varphi_T) - 1) \approx I_s \exp(U_{\text{.p}} / \varphi_T);$$

$$r_{\text{б}} = \varphi_T / I_{\text{.p}}.$$

При комнатной температуре:

$$r_{\text{б}} = 0,026 / I_{\text{.p}}; \quad (1.42)$$

(в соотношении (1.42) значение тока подставляется в амперах). Сопротивление утечки $r_{\text{ут}}$ учитывает возможность прохождения тока по поверхности кристалла из-за несовершенства его структуры. При прямом включении р-п перехода $C_{\text{бар}} \ll C_{\text{диф}}$, дифференциальное сопротивление $r_{\text{д пр}}$ мало и соизмеримо с r_1 , поэтому эквивалентная схема принимает вид, показанный на рис. 47 (а).

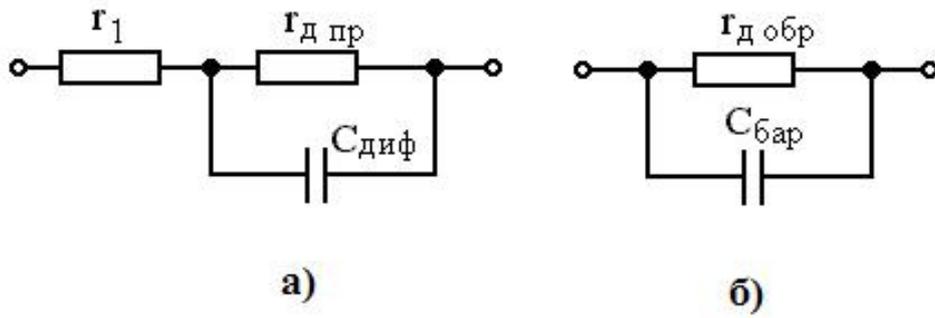


Рис. 47 Упрощенные эквивалентные схемы р-п перехода

При обратном смещении $r_{д обр} \gg r_1$, $C_{бар} \gg C_{диф}$ и эквивалентная схема имеет вид, показанный на рис. 47 (б).

Вопросы

1. Назовите основные характеристики полупроводников.
2. Чем отличаются полупроводники с электронной и дырочной проводимостью?
3. Какие виды токов существуют в полупроводниках? Опишите их свойства.
4. В чем отличие теоретической вольт-амперной характеристики p-n перехода от реальной?
5. На каком физическом явлении основывается принцип действия полупроводниковых приборов?

ГЛАВА 7 НАДЕЖНОСТЬ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ

7.1. Виды отказов

Оценивая конструкцию любого контактного устройства, необходимо определить те отклонения контактного нажатия, которые для него характерны. Это можно сделать, осуществив статистические испытания с большим количеством изготовленных контактных устройств. Обработка результатов этих испытаний позволит получить плотность распределения, среднее значение и среднеквадратическое отклонение контактного нажатия. Для уменьшения затрат целесообразно оценить вероятностные характеристики контактного нажатия на этапе расчета и разработки контактного устройства с тем, чтобы можно было внести заранее необходимые изменения в конструкцию.

В связи с наличием отклонений в контактном нажатии и изменении состояния поверхности могут наблюдаться отказы. Отказы в контактных устройствах могут быть следующих видов:

1. внезапные (поломка); для правильно сконструированного устройства они большого значения не имеют, кроме случаев работы при значительных механических воздействиях;

2. с устойчивым нарушением контакта, что может иметь место при значительном уменьшении контактного нажатия, сильной коррозии поверхности контактного материала в результате влияния агрессивной среды, при сильно выраженной эрозии и таком нарушении регулировки механизма, осуществляющего движение, при котором не происходит соприкосновения контакт-деталей. Такие отказы встречаются сравнительно редко;

3. перемежающиеся, когда контакты только при отдельных соединениях (переключениях) нарушаются полностью или осуществляются с большим переходным сопротивлением. Этот вид отказа предшествует, как правило, полному (устойчивому) отказу контактного устройства и имеет большое значение, так как даже один отказ на тысячу переключений сказывается на надежности всей аппаратуры.

В отличие от других элементов ЭА, на надежность контактных устройств часто влияет не просто время и условия работы, а количество переключений, которое во многих случаях за заданный интервал времени регламентировать сложно, так как оно (количество) определяется особенностями аппаратуры, в которой используется контактное устройство.

Количество переключений, на которое рассчитано контактное устройство, иногда оговаривается. Оно меняется от 100...300 для

приборных соединителей до нескольких миллионов для некоторых типов реле и до 100 млн. для герконов. Так как часто неизвестно, за какое время будет осуществлено оговоренное количество переключений, понятие среднего времени до отказа не всегда может быть применимо. Можно отметить два характерных случая соотношения между количеством переключений и временем функционирования [1].

Длительная работа контактного устройства без разъединения или с редким соединением и разъединением. Старение происходит из-за образования пленок, усталостных изменений в пружинах, приводящих к уменьшению Q_k . Отказы обычно происходят в результате механических воздействий или резкого изменения температуры. В этом случае с некоторой условностью можно пользоваться λ -характеристиками с учетом их изменения при внешних воздействиях.

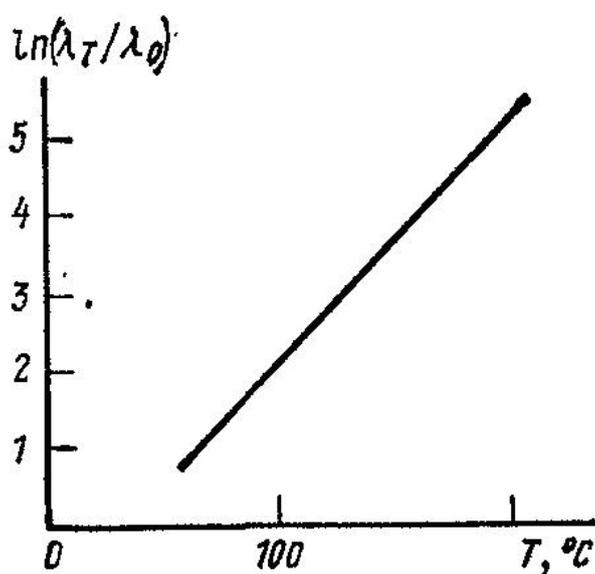


Рис. 48. Зависимость $\ln(\lambda_T/\lambda_0)$ от T °C

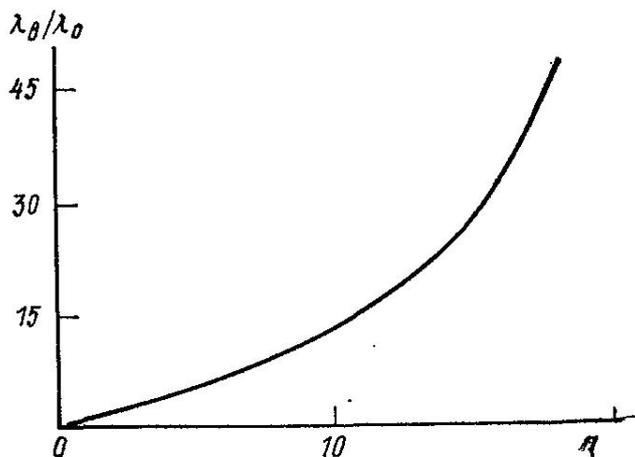


Рис. 49. Зависимость λ_B/λ_0 от g

На рис. 48 дан пример зависимости $\ln(\lambda_T/\lambda_0)$ от температуры, где λ_0 - интенсивность отказов при номинальных условиях. На рис. 49 приведена зависимость λ_B/λ_0 от механических воздействий, характеризуемых ускорением свободного падения g . Такой ход зависимостей может быть объяснен тем, что в статическом положении контактирующие поверхности плотно прилегают друг к другу, не подвергаясь коррозии, и наблюдается устойчивый контакт. При наличии механических воздействий и изменении температуры имеют место механические деформации и относительное перемещение контакт-деталей, изменяются условия, при которых происходит контакт. В результате он может нарушиться.

Частое переключение контактных устройств. Основное влияние на надежность оказывает износ. Поток отказов существенно отличается от пуассоновского, и применение постоянных λ -характеристик дает искаженное представление о надежности.

Для описания свойств контакт-деталей при длительном функционировании принято использовать граничное контактное нажатие ($Q_{к.гр}$) или граничное переходное сопротивление ($R_{п.гр}$), которое с ним связано, и определять условия их достижения в зависимости от времени и количества включений. При этом имеется в виду, что может быть установлено граничное значение $Q_{к.гр}$ или $R_{п.гр}$, при котором контакт обеспечивается с достаточной вероятностью.

Для установления $R_{п.гр}$ или $Q_{к.гр}$, а также допустимых отклонений контактного нажатия $\Delta Q_{к.гр}$ и переходного сопротивления $\Delta R_{п.гр}$ необходимо выполнить эксперимент, из которого при определенных значениях нажатия и значительном числе переключений для большого количества контакт-деталей находится вероятность ухудшения сопротивления и отказа контакта.

На рис. 50 показана зависимость вероятности отказа $P_{отк}$ от контактного нажатия. Значение $\Delta Q_{к.гр} = Q_{к.ном} - Q_{к.гр}$ (где $Q_{к.ном}$ — одно из возможных значений номинального контактного нажатия) определяются допустимой для определенных условий вероятностью отказа $P_{доп.отк}$, которая для качественных контактных устройств должна составлять не более $10^{-3} \dots 10^{-5}$.

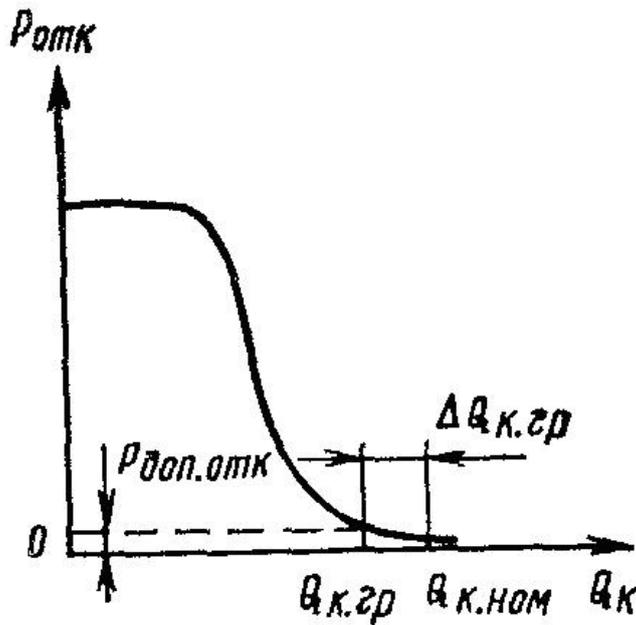


Рис. 50. Зависимость $P_{отк}$ от Q_k

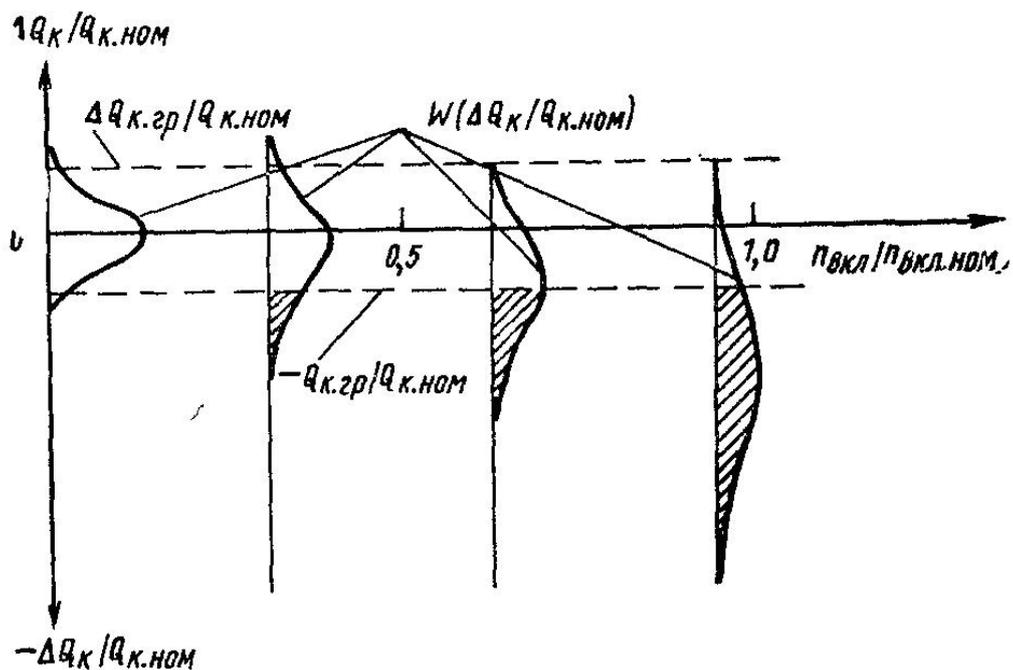


Рис. 51. Плотность распределения Q_k

Для иллюстрации процесса старения, характеризующего работу контакт-деталей при длительном функционировании, которое приводит к зависимости вероятности отказа от числа включений, на рис. 51 приведены плотности распределения для отклонений контактного нажатия при разном числе включений $n_{вкл}$, отнесенном к номинально допустимому числу включений $n_{вкл.ном}$. Из рис. 51 следует, что плотность распределения

контактного нажатия при увеличении числа переключений изменяется, уменьшается среднее значение нажатия. Соответственно среднее значение переходного сопротивления должно увеличиваться. Кроме того, происходит увеличение отклонений как контактного - нажатия, так и переходного сопротивления. В связи с этим вероятность того, что не будет обеспечено граничное значение контактного нажатия и переходного сопротивления, постепенно увеличивается с ростом числа переключений [1]. На рис. 51 эта вероятность соответствует площади заштрихованных участков.

Таким образом, закономерности, характеризующие работу контактного устройства при длительном функционировании, значительно сложнее, чем для других элементов ЭА как в отношении вероятности их правильного функционирования, так и продолжительности их работы. Это объясняет те трудности, с которыми сталкивается конструктор при применении контактных устройств в ЭА, а также при разработке, испытаниях и производстве контактных устройств, от которых требуется высокая надежность.

7.2. Защита от внешних воздействий

Важнейшим вопросом, который приходится решать при конструировании контактных устройств, является вопрос обеспечения защиты от внешних воздействий. Особенно уязвимыми для них являются контактирующие поверхности. Опыт показывает, что для врубающихся и вставных контактов, у которых разрушаются поверхностные пленки, достаточно принять такие меры, которые исключают коррозию и механические повреждения, т. е. можно, например, использовать для контакт-деталей такой металл как серебро.

Значительно сложнее решается вопрос защиты от внешних воздействий электромагнитных реле, которые управляются электромагнитными механизмами, и герконов, управляемых магнитным полем. В этих устройствах используются стыковые контакты. Если они предназначены для длительной работы с большим количеством включений и выключений и при малых токах и напряжениях, то даже применение благородных металлов при отсутствии герметизации может не обеспечить высокую надежность. Поэтому для электромагнитных реле часто применяют герметичные кожухи, что, однако, не решает полностью задачи защиты от внешних воздействий. Поскольку в герметичном объеме находятся изоляционные материалы, которые могут испаряться, и трущиеся детали электромеханизмов, то контакт-деталь даже из благородного металла подвержена загрязнению, на ней образуются пленки и контакт нарушается.

Большим достижением в развитии контактных устройств со стыковыми контактами, надежно работающих в условиях внешних воздействий, явилось создание герконов. Конструкция простейшего геркона приведена на рис. 52, на котором обозначены: 1 — колба из стекла; 2 — впаянные в колбу упругие пружины из материала с высокой магнитной проницаемостью; 3 — слой золота на концах пружины, через который осуществляется контакт; 4 — магнитные силовые линии. Благодаря соответствующей установке пружин при впаивании их в колбу между ними обеспечивается зазор.

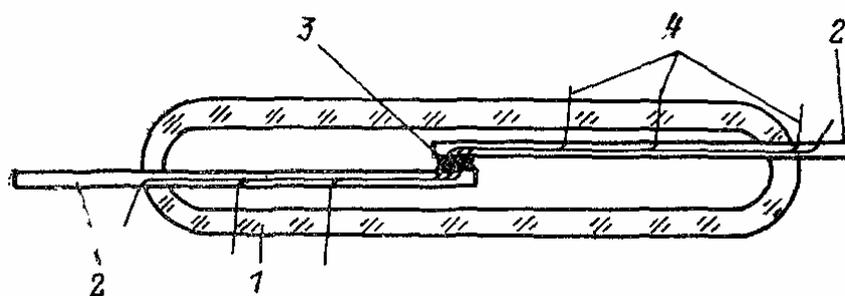


Рис. 52. Простейший геркон

Если поместить такое устройство в магнитное поле, которое свободно проникает через стеклянную колбу, то происходит намагничивание пружин и возникает сила, сближающая их. При определенной напряженности магнитного поля контакты прижимаются друг к другу с силой, которая определяется напряженностью магнитного поля, свойствами пружины и зазорами между контактами в отсутствие магнитного поля. В таких контактных устройствах нет трущихся частей, изоляционных прокладок, и поэтому они оказываются наиболее надежными. Магнитоуправляемые контактные устройства могут работать как на размыкание, так и на переключение. Их характеристики приведены в справочниках.

Вопросы

1. Назовите основные виды оценки надежности контактных устройств.
2. Опишите три основных вида отказа контактных устройств.
3. Какие существуют соотношения между количеством циклов переключений и износом?
4. Чем отличаются герконы от остальных видов реле?
5. Как защищают контактные устройства от внешних воздействий?

ГЛАВА 8 ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ И НОРМАТИВНО- ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА КОНТАКТНЫХ УЗЛОВ

8.1. Требования ГОСТ 10434-82

ГОСТ 10434-82 «Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования» вступил в силу 01.01.1983г. взамен устаревшего ГОСТ 10434-76. Стандарт распространяется на разборные и неразборные электрические контактные соединения шин, проводов или кабелей (далее - проводников) из меди, алюминия и его сплавов, стали, алюмомедных проводов с выводами электротехнических устройств, а также на контактные соединения проводников между собой на токи от 2,5 А. Для контактных соединений электротехнических устройств на токи менее 2,5 А требования стандарта являются рекомендуемыми. Требования стандарта в части допустимого значения электрического сопротивления и стойкости контактных соединений при сквозных токах распространяются также на контактные соединения в цепях заземляющих и защитных проводников из стали.

Стандарт не распространяется на электрические контактные соединения электротехнических устройств специального назначения.

Термины, применяемые в стандарте, соответствуют ГОСТ 14312-79, ГОСТ 18311-80.

(Измененная редакция, Изм. N 1, 2, 3).

1. КЛАССИФИКАЦИЯ

В зависимости от области применения электрические контактные соединения (далее - контактные соединения) подразделяются на классы в соответствии с табл.5.

Таблица 5.

Классификация контактных соединений по области применения

Область применения контактного соединения	Класс контактного соединения
1. Контактные соединения цепей, сечения проводников которых выбраны по допустимым длительным токовым нагрузкам (силовые электрические цепи, линии электропередачи и т.п.).	1
2. Контактные соединения цепей, сечения проводников которых выбраны по стойкости к сквозным токам, потере и отклонению напряжения, механической прочности, защите от перегрузки. Контактные соединения в цепях заземляющих и защитных проводников из стали.	2

3. Контактные соединения цепей с электротехническими устройствами, работа которых связана с выделением большого количества тепла (нагревательные элементы, резисторы и т.п.).	3
---	---

1.2. В зависимости от климатического исполнения и категории размещения электротехнических устройств по ГОСТ 15150-69 контактные соединения подразделяются на группы в соответствии с табл.6.

Таблица 6.

Группы контактных соединений по климатическому исполнению и категории размещения

Климатическое исполнение и категория размещения электротехнического устройства	Группа контактного соединения
1. Все климатические исполнения для категории размещения 4.1 при атмосфере типов II и I. Климатические исполнения У, УХЛ, ТС для категории размещения 3 и климатические исполнения УХЛ, ТС для категории размещения 4 при атмосфере типов II и I.	А
2. Любые сочетания климатического исполнения и категории размещения, кроме указанных выше, при атмосфере типов II и I. Любые сочетания климатического исполнения и категории размещения при атмосфере типов III и IV.	Б

1.3. По конструктивному исполнению контактные соединения подразделяются на неразборные и разборные.

1.4. В зависимости от материала соединяемых проводников и группы контактных соединений по п.1.2 разборные контактные соединения подразделяются на:

- не требующие применения средств стабилизации электрического сопротивления - см. пп.2.1.6 и 2.1.8;
- требующие применения средств стабилизации электрического сопротивления - см. пп.2.1.7 и 2.1.8.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

2.1. Требования к конструкции

2.1.1. Контактные соединения должны выполняться в соответствии с требованиями настоящего стандарта, стандартов и технических условий на конкретные виды электротехнических устройств по рабочим чертежам, утвержденным в установленном порядке.

2.1.2. Выводы электротехнических устройств должны соответствовать требованиям ГОСТ 24753-81.

2.1.3. Контактные винтовые зажимы должны соответствовать

требованиям ГОСТ 25034-85, наборные зажимы должны соответствовать требованиям ГОСТ 19132-86.

2.1.4. Линейная арматура должна соответствовать требованиям ГОСТ 13276-79.

2.1.5. Неразборные контактные соединения должны выполняться сваркой, пайкой или опрессовкой. Допускается применение других методов, указанных в стандартах или технических условиях на конкретные виды электротехнических устройств.

2.1.6. Разборные контактные соединения, не требующие применения средств стабилизации электрического сопротивления, должны выполняться при помощи стальных крепежных изделий, защищенных от коррозии в соответствии с требованиями ГОСТ 9.303-84, ГОСТ 9.005-72.

(Измененная редакция, Изм. N 2).

2.1.7. Разборные контактные соединения, требующие применения средств стабилизации электрического сопротивления, должны выполняться с использованием как по отдельности, так и в сочетании следующих средств:

1) крепежных изделий из цветных металлов с коэффициентом линейного расширения от $18 \cdot 10^{-6}$ до $21 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$;

2) тарельчатых пружин по ГОСТ 3057-90 или техническим условиям на конкретные виды пружин;

3) защитных металлических покрытий рабочих поверхностей, выбранных по ГОСТ 9.303-84 с учетом требований ГОСТ 9.005-72.

Допускается применение других видов защитных покрытий, указанных в стандартах или технических условиях на конкретные виды электротехнических устройств;

4) переходных деталей в виде медно-алюминиевых пластин по ГОСТ 19357-81, медно-алюминиевых наконечников по ГОСТ 9581-80 и аппаратных зажимов из плакированного алюминия по ТУ 34-13-11438-89;

5) переходных деталей в виде пластин и наконечников из алюминиевого сплава с временным сопротивлением разрыву не менее 130 МПа (далее - твердый алюминиевый сплав);

6) штифтовых наконечников по ГОСТ 23598-79 из твердого алюминиевого сплава;

7) штифтовых наконечников по ГОСТ 23598-79, медно-алюминиевых;

8) электропроводящих смазок или других электропроводящих материалов, если возможность их применения подтверждена результатами испытаний по ГОСТ 17441-84 и указана в стандартах или технических условиях на конкретные виды электротехнических устройств.

При применении средств 2)-8) контактные соединения, как правило, должны выполняться при помощи стальных крепежных деталей, защищенных от коррозии в соответствии с требованиями ГОСТ 9.303-84, ГОСТ 9.005-72.

(Измененная редакция, Изм. N 1, 2, 3).

2.1.8. Разборные контактные соединения в зависимости от группы по п.1.2 и материала соединяемых проводников и выводов электротехнических устройств должны выполняться в соответствии с требованиями стандарта, указанными: для контактных соединений проводников с плоскими выводами, а также контактных соединений проводников между собой - в табл.7;

Таблица 7.

Требования к выполнению разборных контактных соединений

Группа Контактного соединения	Материал проводника	Номер пункта стандарта в зависимости от материала вывода или второго проводника			
		Медь и ее сплавы	Твердый алюминиевый сплав	Алюминий	Сталь
А	Медь, алюмомедь	2.1.6		2.1.7 1) или 2), или 3), или 4), или 5), или 8)	2.1.6
	Твердый алюминиевый сплав				
	Алюминий	2.1.7 1) или 2), или 3), или 4), или 5), или 8)			
Б	Медь, алюмомедь	2.1.6	2.1.7* 3) или 4), или 5) и 3)	2.1.7 4) или 5) и 3), или 1) и 3), или 2) и 3)	2.1.6
	Твердый алюминиевый сплав	2.1.7* 3) или 4), или 5) и 3)	2.1.6	2.1.7 1) или 2), или 3), или 4), или 5)	2.1.7 4) или 5) и 3)
	Алюминий	2.1.7 4) или 5) и 3), или 1) и 3), или 2) и 3)	2.1.7 1) или 2), или 3), или 4), или 5)		

* Контактные соединения электротехнических устройств климатических исполнений У, УХЛ категорий размещения 1 и 2 допускается изготавливать по п.2.1.6.

Контактные соединения в соответствии с климатическим исполнением и категорией размещения электротехнических устройств, определяемыми по ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70, должны выдерживать воздействие климатических факторов внешней среды, указанных в ГОСТ 15150-69, ГОСТ 15543-70, ГОСТ 15963-79, ГОСТ 16350-80, ГОСТ 17412-72 или в стандартах и технических условиях на конкретные виды электротехнических устройств.

Допускается по согласованию с потребителем применять контактные соединения, отличающиеся от указанных в табл.7.

(Измененная редакция, Изм. N 1, 3).

2.1.9. Контактные соединения пластин из твердого алюминиевого сплава и алюминиевой части медно-алюминиевых пластин с алюминиевыми проводниками (выводами) должны выполняться сваркой или пайкой, а соединения наконечников из твердого алюминиевого сплава и алюминиевой части медно-алюминиевых наконечников с алюминиевыми жилами проводов и кабелей должны выполняться сваркой или опрессовкой.

2.1.10. Разборные контактные соединения однопроволочных жил проводов и кабелей с плоскими или штыревыми выводами должны выполняться:

- жил сечением до 16 мм^2 - после оконцевания наконечниками по ГОСТ 7386-80 или непосредственно: путем формирования в кольцо или без него с предохранением в обоих случаях от выдавливания фасонными шайбами или другими способами;

- жил сечением 25 мм^2 и более - после оконцевания наконечниками по ГОСТ 7386-80, ГОСТ 7387-82, ГОСТ 9581-80 или путем формирования конца жилы в плоскую зажимную часть с отверстием под болт.

2.1.11 Разборные контактные соединения многопроволочных жил проводов и кабелей с плоскими или штыревыми выводами должны выполняться: жилами сечением до 10 мм^2 - после оконцевания наконечниками по ГОСТ 7386-80, ГОСТ 9688-82, ГОСТ 22002.1-82, ГОСТ 22002.2-76-ГОСТ 22002.4-76, ГОСТ 22002.6-82, ГОСТ 22002.7-76, ГОСТ 22002.11-76, ГОСТ 22002.14-76 или непосредственно: путем формирования в кольцо или без него с предохранением в обоих случаях от выдавливания фасонными шайбами или другими способами: жилами сечением 16 мм^2 и более - после оконцевания наконечниками по ГОСТ 7386-80, ГОСТ 7387-82, ГОСТ 9581-80, ГОСТ 22002.1-82, ГОСТ 22002.2-76, ГОСТ 22002.6-82, ГОСТ 22002.7-76.

(Измененная редакция, Изм. N 1, 2).

2.1.12. К каждому болту (винту) плоского вывода или к штыревому выводу рекомендуется присоединять не более двух проводников, если иное не указано в стандартах или технических условиях на конкретные виды электротехнических устройств.

2.1.13. В разборных контактных соединениях должны использоваться крепежные детали классов прочности по ГОСТ 1759.4-87 и ГОСТ 1759.5-87, указанных в табл.8.

Винты в контактных соединениях рекомендуется применять с цилиндрической или шестигранной головкой.

Таблица 8.

Классы прочности крепежных деталей в разборных контактных соединениях

Наименование детали и ее материал	Класс или группа прочности, не ниже
Болты, винты, шпильки из углеродистых или легированных сталей	5.8
Гайки из углеродистых или легированных сталей	5
Болты, винты, шпильки и гайки из цветных металлов	32

2.2. Требования к электрическим параметрам

2.2.1. Отношение начального электрического сопротивления контактных соединений (кроме контактных соединений со штыревыми выводами) к электрическому сопротивлению участка соединяемых проводников, длина которого равна длине контактного соединения, не должно превышать: для класса 1-1, если иное не указано в стандартах или технических условиях на конкретные виды электротехнических устройств; для класса 2-2; для класса 3-6.

В контактных соединениях проводников с различным электрическим сопротивлением сравнение производится с контакт-деталью с большим электрическим сопротивлением.

2.2.2. Начальное электрическое сопротивление контактных соединений класса 1 проводников со штыревыми выводами не должно превышать значений, указанных в табл.9.

Требования к контактным соединениям классов 2 и 3, при необходимости, указываются в стандартах или технических условиях на конкретные виды электротехнических устройств.

2.2.3. Электрическое сопротивление контактных соединений (кроме сварных и паяных), прошедших испытание на соответствие требованиям стандартов и другой технической документации по методике, указанной в ГОСТ 17441-84, не должно превышать начальное значение более чем в 1,5 раза. Электрическое сопротивление сварных и паяных контактных соединений должно оставаться неизменным.

Необходимость обязательного применения моментных индикаторных ключей должна быть указана в стандартах или технических условиях на конкретные виды электротехнических устройств.

(Измененная редакция, Изм. N 3).

2.2.4. При протекании номинального (длительно допустимого) тока наибольшая допустимая температура контактных соединений классов 1 и 2 не должна превышать значений, указанных в табл.10. Токовые нагрузки

Таблица 9.

Начальное электрическое сопротивление контактных соединений класса 1 проводников со штыревыми выводами

Диаметр штыря, мм	3	4	5	6	8	10	12	16	20	24	30	33	36	42	48	56
Начальное электрическое сопротивление контактных соединений с медными и латунными выводами по ГОСТ 21242-75, мкОм	80	50	30	26	16	14	12	10	8	8	6	6	5	5	5	4

проводников при этом принимают по "Правилам устройства электроустановок", утвержденным Госэнергонадзором 12.04.69, по стандартам или техническим условиям на конкретные виды электротехнических устройств.

Температура контактных соединений класса 3 устанавливается в стандартах или технических условиях на конкретные виды электротехнических устройств в зависимости от применяемых материалов, покрытий, класса изоляции присоединяемых проводников и условий эксплуатации.

(Измененная редакция, Изм. N 1, 2, 3).

2.2.5. (Исключен, Изм. N 1).

2.2.6. После режима сквозного тока контактные соединения не должны иметь механических повреждений, препятствующих их дальнейшей эксплуатации.

Температура контактных соединений в режиме сквозного тока не должна быть более 200 °С у соединений проводников из алюмомеди, алюминия и его сплавов, а также у соединений этих проводников с медными, 300 °С - у соединений медных проводников и 400 °С - у соединений стальных проводников.

2.2.7. Значение допустимого сквозного тока контактных соединений должно быть не менее допустимых сквозных токов конкретных видов электротехнических устройств, указанных в стандартах или технических

Таблица 10.

Токовые нагрузки проводников

Характеристика соединяемых проводников	Наибольшая допустимая температура нагрева, °С, в установках	
	до 1000 В	св. 1000 В
1. Проводники из меди, алюмомеди, алюминия и его сплавов без защитных покрытий рабочих поверхностей	95	По ГОСТ 8024-90
2. Проводники из меди, алюмомеди, алюминия и его сплавов с защитными покрытиями рабочих поверхностей неблагородными металлами	110*	
3. Проводники из меди и ее сплавов без изоляции или с изоляцией классов В, F и Н по ГОСТ 8865-87 с защитным покрытием рабочих поверхностей серебром	135	

* Допускается для проводников из меди без изоляции или с изоляцией классов В, F и Н по ГОСТ 8865-87 повышать температуру до 135 °С, если возможность этого подтверждена результатами испытаний по ГОСТ 17441-84 и указана в стандартах или технических условиях на конкретные виды электротехнических устройств. При отсутствии этих данных значение плотности односекундного тока должно соответствовать 165 А/мм² - для медных проводников, 105 А/мм² - для алюминиевых и алюмомедных, 90 А/мм² - для проводников из алюминиевого сплава и 20 А/мм² - для стальных проводников.

(Измененная редакция, Изм. N 1).

2.3. Требования по устойчивости к механическим факторам

2.3.1. Контактные соединения должны выдерживать воздействие механических факторов внешней среды по группе условий эксплуатации согласно ГОСТ 17516-72, которая должна указываться в стандартах или технических условиях на конкретные виды электротехнических устройств.

При отсутствии таких указаний контактные соединения, подверженные вибрации, должны выдерживать вибрацию в течение 1 ч с постоянной частотой от 40 до 50 Гц и амплитудой 1 мм.

2.3.2. Контактные соединения должны выдерживать воздействия статических осевых нагрузок на растяжение, вызывающие напряжения, не менее: 90% временного сопротивления разрыву целого проводника - для контактных соединений проводов линии электропередачи, работающих на растяжение; 30% временного сопротивления разрыву целого проводника - для неразборных контактных соединений, не работающих на растяжение, а также для соединений проводников с гнездовыми выводами, соединений

неоконцованных проводов и кабелей с плоскими выводами, укомплектованными фасонными шайбами.

2.3.3. Затяжку болтов рекомендуется производить моментными индикаторными ключами, например ДК-25, винтов - тарированными отвертками.

Для проводников сечением до 1,5 мм² не допускается применять винтовой зажим, конец винта которого проворачивается по жиле.

2.3.1-2.3.3. (Измененная редакция, Изм. N 1).

2.3.4. Разборные контактные соединения проводников с выводами, одноболтовые контактные соединения, которые могут подвергаться воздействию сквозных токов короткого замыкания, а также разборные контактные соединения, подверженные вибрации или находящиеся во взрывоопасных помещениях, должны быть предохранены от самоотвинчивания контргайками, пружинными шайбами, тарельчатыми пружинами или другими способами.

(Измененная редакция, Изм. N 2).

2.4. Требования к надежности

2.4.1. Для оценки надежности контактных соединений устанавливается гамма- процентный ресурс, если иное не установлено в стандартах или технических условиях на электротехнические устройства конкретных видов. Нижнее значение гамма-процентного ресурса должно обеспечивать работу электротехнических устройств в соответствии с требованиями к надежности, установленными в стандартах или технических условиях на эти электротехнические устройства.

(Измененная редакция, Изм. N 1).

2.5. Требования безопасности

2.5.1. Контактные соединения в части требований безопасности должны соответствовать ГОСТ 12.2.007.0-75 и обеспечивать условия эксплуатации, установленные "Правилами технической эксплуатации установок потребителей" и "Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей", утвержденными Госэнергонадзором 12 апреля 1969 г.

2.5.2. Контактные соединения в части требований пожарной безопасности должны соответствовать ГОСТ 12.1.004-91, что обеспечивается выполнением требований ГОСТ 10434-82.

8.2. Требования ГОСТ 51686.1-2000

ГОСТ Р 51686.1-2000 (МЭК 60999-1-99) «Соединительные устройства. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ К КОНТАКТНЫМ ЗАЖИМАМ» Требования к винтовым и безвинтовым контактным зажимам для соединения медных проводников с номинальным сечением от 0,2 до 35 мм². Дата введения 01.01.2002. Настоящий стандарт

распространяется на винтовые и безвинтовые зажимные элементы соединительных устройств, выполненных как заодно с прибором, так и встроены в прибор (далее - зажимы), предназначенные для присоединения медных проводников без специальной подготовки (в соответствии с МЭК 228) жестких (одно- и многожильных) и/или гибких номинальным сечением от 0,2 до 35 мм² включительно и эквивалентных проводников AWG на номинальное переменное напряжение до 1000 В частоты до 1000 Гц и постоянное напряжение до 1500 В.

1. Стандарт не распространяется на зажимы для присоединения:

- методом обжатия или пайки;
- цифровых или сигнальных цепей;
- зажимов с плоскими штыревыми соединителями (оконцевателями) по ГОСТ Р МЭК 61210;
- зажимов, обеспечивающих прямой контакт с жилой проводника путем прокалывания изоляции, по ГОСТ Р 50043.4;
- зажимов, требующих скручивания жил соединяемых проводников, например со скрученными стыками по ГОСТ Р МЭК 998-2-4.

Требования настоящего стандарта являются обязательными.

2. Нормативные ссылки.

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 8724—81 Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Диаметры и шаги;

ГОСТ Р МЭК 998-2-4—96 Соединительные устройства для низковольтных цепей бытового и аналогичного назначения. Частные требования к устройствам для соединения проводников скручиванием;

ГОСТ Р 50043.1—92 (МЭК 998-1—90) Соединительные устройства для низковольтных цепей бытового и аналогичного назначения. Часть 1. Общие требования;

ГОСТ Р 50043.2—92 (МЭК 998-2-1—90) Соединительные устройства для низковольтных цепей бытового и аналогичного назначения. Часть 2-1. Частные требования для соединительных устройств с винтовыми зажимами;

ГОСТ Р 50043.3—2000 (МЭК 60998-2-2—91) Соединительные устройства для низковольтных цепей бытового и аналогичного назначения. Часть 2-2. Дополнительные требования к безвинтовым контактным зажимам для присоединения медных проводников;

ГОСТ Р 50043.4-2000 (МЭК 60998-2-3—91) Соединительные устройства для низковольтных цепей бытового и аналогичного назначения. Часть 2-3. Дополнительные требования к контактным зажимам, прокалывающим изоляцию медных проводников для их соединения ГОСТ Р 51322.1—99 (МЭК 60884-1—94) Соединители электрические штепсельные бытового и аналогичного назначения. Технические

требования и методы испытаний;

ГОСТ Р МЭК 61210—99 Соединительные устройства. Плоские быстросоединяемые зажимы для медных проводников. Требования безопасности.

3. Определения.

В настоящем стандарте используют следующие термины.

- 3.1. контактный зажим: по ГОСТ Р 50043.1;
- 3.2. зажимной элемент: по ГОСТ Р 50043.1;
- 3.3. соединительное устройство: по ГОСТ Р 50043.1;
- 3.4. винтовой контактный зажим: по ГОСТ Р 50043.2;
- 3.5. торцевой контактный зажим: по ГОСТ Р 50043.2;
- 3.6. зажим с крепежной головкой: по ГОСТ Р 50043.2;
- 3.7. зажим с крепежной гайкой: по ГОСТ Р 50043.2;
- 3.8. зажим с прижимной пластиной: по ГОСТ Р 50043.2;
- 3.9. колпачковый зажим: по ГОСТ Р 51322.1;
- 3.10. безвинтовой контактный зажим: по ГОСТ Р 50043.4;
- 3.11. номинальная соединительная способность: по ГОСТ Р 50043.1;
- 3.12. температура окружающей среды: по ГОСТ Р 50043.1;
- 3.13. превышение температуры: по ГОСТ Р 50043.1;
- 3.14. проводник без специальной подготовки: по ГОСТ Р 50043.2;
- 3.15. проводник со специальной подготовкой: проводник, конец жилы которого имеет фигурную форму (например, в виде петельки) или снабжен кабельным наконечником.

4. Общие требования.

Зажимы должны так проектироваться и иметь такую конструкцию, чтобы при нормальной работе их эксплуатационные характеристики оставались надежными и не представляли собой опасности для потребителя и окружающей среды.

Соответствие проверяют проведением всех предписанных испытаний.

5. Общие требования к испытаниям.

5.1. Испытания в соответствии с настоящим стандартом являются типовыми.

5.2. Образцы испытывают в состоянии поставки в рабочем положении при температуре окружающей среды (20 ± 5) °С, если иное не указано в технических условиях на зажимы конкретных серий и типов.

5.3. Испытания по разделу 9 проводят в порядке следования пунктов.

5.4. Если нет других указаний, три зажима подвергают всем предписанным испытаниям, и они соответствуют требованиям настоящего стандарта, если результаты испытаний положительные.

Если один из образцов не выдерживает какое-либо испытание, то данное испытание, а также все предшествующие испытания, которые могут повлиять на его результаты, должны быть повторены на новой серии образцов. При этом все образцы новой серии должны выдержать

повторные испытания. При отрицательных результатах повторных испытаний образцы бракуют.

6. Основные характеристики.

Номинальные соединительные способности зажимов выбирают из ряда: 0,20; 0,34; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50; 2,50; 4,00; 6,00; 10,00; 16,00; 25,00 и 35,00 мм².

7. Соединение проводников.

7.1. Зажимы должны допускать присоединение двух или более проводников без специальной подготовки, одинакового или различного номинального сечения или их сочетания.

Примечание — Винтовые зажимы не применяют для присоединения гибкого провода с пропаянным наконечником.

7.2. Каждый зажим в дополнение к его номинальной соединительной способности должен обеспечивать соответствующее соединение по меньшей мере двух последовательно расположенных проводников меньшего сечения, например зажим с номинальной соединительной способностью 1,00 мм² должен допускать надежное соединение проводников сечением 0,5; 0,75 или 1,00 мм².

7.3. Если изготовителем не указано иное, винтовые зажимы в соответствии с их номинальной соединительной способностью должны допускать присоединение жестких и гибких проводников. В этом случае отпадает необходимость в какой-нибудь маркировке.

Если к винтовому зажиму допускается присоединение проводника только одного типа (например, жесткого или гибкого), то на зажиме маркируют буквы «ж» или «г», либо маркировка должна быть проставлена на наименьшей упаковке или в инструкции и каталоге.

7.4. Если изготовителем не указано иное, безвинтовые зажимы в соответствии с их номинальной соединительной способностью должны допускать присоединение жестких и гибких проводников.

Если к безвинтовому зажиму допускается присоединение проводника только одного типа (например, жесткого), то на зажиме маркируют буквы «д» или «е», либо маркировка должна быть проставлена на наименьшей упаковке или в инструкции и каталоге.

Если безвинтовой зажим в соответствии с требованиями изготовителя обеспечивает присоединение только жестких, гибких (одно- и многожильных) проводников, то на зажиме или конечном изделии маркируют букву «г», либо маркировка должна быть проставлена на наименьшей упаковке или в инструкции и каталоге.

Соответствие проверяют внешним осмотром и испытаниями по 9.1.

7.5. Соединение и разъединение проводников в безвинтовых зажимах проводят:

- при использовании универсальных контактных зажимов — с помощью инструмента общего назначения или удобного устройства,

составляющего единое целое с контактным зажимом и позволяющего открыть его с целью введения или разъединения проводников, или - простым введением.

Разъединение, в случае необходимости, проводника при нормальной эксплуатации осуществляют операцией, отличающейся от прямого выдергивания, и производят вручную с применением инструмента или без него.

Соответствие проверяют внешним осмотром и испытанием по 9.3.

8. Требования к конструкции.

8.1. Требования к конструкции — по ГОСТ Р 50043.2.

8.1.1. Токоведущие части должны изготавливаться из металла, обладающего механической прочностью, электропроводностью и стойкостью к коррозии в соответствии с их применением.

Соответствие проверяют внешним осмотром и, при необходимости, химическим анализом. Примерами таких металлов, работающих в пределах допустимых температур при нормальных химических загрязнениях, являются:

- медь;
- сплав, содержащий не менее 58 % меди, для частей, изготавливаемых из холоднокатаных листов, или не менее 50 % меди — для других частей;
- нержавеющая сталь, содержащая не менее 13 % хрома и не более 0,09 % углерода;
- сталь, имеющая гальваническое цинковое покрытие в соответствии с ИСО 2081 [9].

Покрытие должно иметь толщину не менее:

- 5 мкм — рабочие условия № 1 для обычных изделий;
- 8 мкм — рабочие условия № 2 для брызгозащищенных изделий;
- 12 мкм — рабочие условия № 3 для струезащищенных изделий;
- сталь, имеющая гальваническое никелевое покрытие в соответствии с ИСО 1456 [10].

Покрытие должно иметь толщину не менее:

- 10 мкм — рабочие условия № 1 для обычных изделий;
- 20 мкм — рабочие условия № 2 для брызгозащищенных изделий;
- 30 мкм — рабочие условия № 3 для струезащищенных изделий;
- сталь, имеющая гальваническое оловянное покрытие в соответствии с ИСО 2093 [11].

Покрытие должно иметь толщину не менее:

- 12 мкм — рабочие условия № 2 для обычных изделий;
 - 20 мкм — рабочие условия № 3 для брызгозащищенных изделий;
 - 30 мкм — рабочие условия № 4 для струезащищенных изделий.
- 8.1.2. Токоведущие части, которые в процессе эксплуатации могут подвергаться механическому износу, недопустимо изготавливать из стали с

гальваническим покрытием.

Проверку проводят внешним осмотром.

8.1.3. Во влажных условиях металлы, обладающие значительными различиями электрохимического потенциала по отношению друг к другу, не следует использовать в контакте друг с другом.

Испытание разрабатывается.

Примечания.

1. Требование пункта не распространяется на винты, гайки и шайбы, прижимные пластины и аналогичные части контактных зажимов.

2. Другие материалы и покрытия могут использоваться при условии, что в соответствующих стандартах на изделия предусмотрено испытание на коррозиестойчивость.

3. Использование алюминиевых сплавов в качестве токоведущих частей требует проведения дополнительных испытаний по МЭК 61545 [12].

8.2. Зажим должен иметь такую конструкцию, чтобы контактное давление не передавалось через изоляционный материал, кроме керамики или чистой слюды. Если в металлических деталях упругость не достаточна, чтобы компенсировать любую возможную усадку изоляционного материала, то одна из поверхностей может иметь изоляционный материал, отличный от керамики или чистой слюды.

Соответствие проверяют внешним осмотром.

8.3. Заземляющие винтовые зажимы не должны подвергаться коррозии при контактировании частей зажима с медным заземляющим проводом или любым другим металлом, контактирующим с этими частями. Основание заземляющего зажима должно быть изготовлено из латуни или другого не менее коррозиестойчивого металла, если он не является частью металлического корпуса или крышки. Винты или гайки также должны быть выполнены из латуни или другого коррозиестойчивого металла. Если заземляющий контактный медный зажим является частью крышки или корпуса из сплава алюминия, то следует принять меры по защите его от коррозии при контактировании с алюминием или его сплавами.

Винты или гайки, изготовленные из плакированной стали и выдержавшие испытание на коррозиестойчивость, считают металлом не менее устойчивым к коррозии, чем латунь.

Проверку проводят внешним осмотром.

8.4. Детали для крепления проводников в зажимах не должны использоваться для крепления каких-либо других частей, хотя они могут удерживать зажим на месте и препятствовать проворачиванию.

Винты не должны изготавливаться из мягкого или легко поддающегося деформации материала, как, например, цинка или алюминия.

Примечание — Использование винтов из алюминиевых сплавов — по МЭК 61545 [12].

8.5. Зажимные винты или гайки заземляющих винтовых зажимов должны быть защищены от случайного ослабления. Следует исключить возможность самопроизвольного ослабления их без помощи инструмента.

Проверку проводят вручную.

8.6. Разъединение проводника при нормальной эксплуатации в безвинтовых зажимах, в случае необходимости, осуществляют в соответствии с инструкцией изготовителя, путем проведения операции, отличающейся от прямого выдергивания, вручную с применением инструмента или без него.

Отверстие для инструмента, применяемого для присоединения и отсоединения жил проводников, должно четко отличаться от отверстия, предназначенного для самого проводника.

Соответствие проверяют внешним осмотром.

8.7. Безвинтовые зажимы должны иметь такую конструкцию, чтобы обеспечить:

- при введении жилы проводника независимость действия зажимного элемента для одного из них от зажимных элементов для других проводников, т. е. проводники закрепляются индивидуально;

- одновременное или раздельное отсоединение проводников.

В зажиме должна быть обеспечена возможность безопасного присоединения любого числа проводников, которое указано в инструкции изготовителя.

Проверку проводят внешним осмотром и испытанием по 9.4.

8.8. Зажимы должны иметь такую конструкцию, чтобы исключить неправильное введение проводника.

Согласно данному требованию на изделии или упаковке минимального размера, или в технической документации наносят соответствующую маркировку с указанием длины изоляции, которую необходимо удалить перед введением жилы проводника в зажим.

Соответствие проверяют внешним осмотром.

8.9. Зажимы должны выдерживать механические нагрузки, которые могут возникать при нормальной эксплуатации.

Соответствие проверяют для винтовых зажимов испытаниями по 9.5, 9.6 и для безвинтовых зажимов — по 9.3, 9.5.

8.10. Контактные зажимы должны иметь такую конструкцию, чтобы зажимать жилу проводника без чрезмерного ее повреждения.

Соответствие проверяют испытанием по 9.4.

8.11. Конструкция контактных зажимов должна обеспечивать закрепление жилы проводника между металлическими поверхностями приложением достаточного контактного усилия.

Соответствие проверяют испытанием по 9.5.

8.12. Конструкция контактных зажимов винтового типа или их расположение должны обеспечивать невозможность выхода жилы одно- и многожильного проводника за пределы зажимов или гаек в затянутом положении.

Соответствие проверяют испытаниями по 9.2.

8.13. Контактные зажимы должны иметь такую конструкцию, чтобы температура токоведущих частей при нормальной эксплуатации не превышала температуру контактного зажима и соприкасающихся частей.

Соответствие проверяют испытаниями по 9.7.

8.14. Безвинтовые зажимы должны иметь такую конструкцию, чтобы при нормальной эксплуатации их электрические характеристики были стабильны и не оказывали влияния на их дальнейшее использование.

Соответствие проверяют испытаниями по 9.8— 9.10.

8.15. Контактные зажимы должны иметь такую конструкцию, чтобы обеспечить присоединение проводников по 7.2, 7.4 (винтовые зажимы) и 7.2, 7.5 (безвинтовые зажимы).

Соответствие проверяют испытанием по 9.1.

8.16. Необходимо соблюдать меры предосторожности при нормальной эксплуатации контактных зажимов и не допускать воздействия усилия натяжения проводников как частей кабелей или шнуров на зажимы, к которым эти проводники присоединены.

Стандарты на изделия должны предусматривать соответствующие требования к присоединению проводников кабелей к зажимам изделия.

9. Испытания.

9.1. Присоединение проводника наибольшего сечения проверяют испытанием в соответствии с табл. 16 или путем присоединения проводника наибольшего сечения с предварительно удаленной изоляцией и придания новой формы концам жестких многожильных и гибких проводников.

Примечание — Изготовитель может установить метод испытания.

Конец проводника с удаленной изоляцией должен полностью входить в отверстие зажима без чрезмерного усилия.

9.2. К трем новым зажимам присоединяют новые проводники, определенного типа и номинальной соединительной способности, а конструкция жил — табл. 15.

Перед вводом в зажимное устройство контактного зажима жилы жестких одно- и многопроволочных проводников выпрямляют.

Допускается использовать инструмент.

Конструкция зажима должна обеспечивать введение жилы проводника без чрезмерного усилия.

Проводник вставляют в зажимное устройство зажима на минимальную из рекомендуемых глубину или, если таких рекомендаций нет, до тех пор, пока жила проводника не упрется в стенку зажима, причем

его положение должно быть наиболее благоприятным для выпадания.

Затем зажимные винты (при их наличии) затягивают, прикладывая крутящий момент, приведенный в 9.6.

После испытания ни одна проволочка проводника не должна выходить из зажима и снижать пути утечки тока и воздушные зазоры, предусмотренные стандартом на соответствующее изделие.

9.3. Безвинтовые зажимы в соответствии с 7.5 и 7.6 испытывают с использованием проводников наибольшего сечения:

- только одножильных;
- только жестких (одно- и многожильных);
- жестких (одно- и многожильных) и гибких.

Проводят пять циклов введения и извлечения проводников, используя каждый раз новый проводник, за исключением последнего цикла, когда проводник после четвертого цикла оставляют на месте.

Для каждого цикла жилы проводников или вводят, по возможности, до упора в зажим или так, чтобы обеспечить надежный контакт.

После каждого введения жилы проводник поворачивают на 90° поперек его продольной оси, а затем отсоединяют.

Осуществляют пять циклов введения и отсоединения зажима каждого типа. После испытаний зажим не должен иметь повреждений, препятствующих его дальнейшему использованию.

9.4. С целью проверки требования 8.10 (зажатие проводника без чрезмерного повреждения) три новых зажима устанавливают в специальное устройство, при этом к зажимам присоединяют новые проводники, число, сечение и тип (гибкие и/или жесткие многожильные) которых определяет изготовитель.

Указанные ниже испытания проводят с использованием:

- a) проводника наименьшего сечения;
- b) проводника наибольшего сечения и, если это применимо:
- c) максимального числа проводников наименьшего сечения;
- d) максимального числа проводников наибольшего сечения;
- e) максимального числа проводников наименьшего и наибольшего сечений, присоединенных одновременно к зажиму.

Длина испытуемого проводника должна быть на 75 мм больше высоты Н, указанной в табл. 11.

Затем проводник присоединяют к зажиму, при этом зажимные винты и гайки (при их наличии) затягивают в соответствии с 9.6.

Каждый из проводников подвергают следующему испытанию.

Примечание — Если втулка с отверстием наименьшего диаметра не позволяет легко присоединить проводник, можно использовать втулку следующего большего диаметра.

Таблица 11.

Параметры при испытании проводника на зажим без чрезмерного его повреждения

Сечение проводника		Диаметр отверстия во втулке (см. примечание), мм	Высота Н, мм±15	Масса, кг	Усилие натяжения, Н
мм ²	AWG				
35	2	14,5	320	6,8	190
-	1		340	8,6	
50	0			9,5	
70	00	20,0	370	10,4	285
95	000			14,0	350
-	0000				425
120	250				15,0
150	300				
185	350	25,0	430	16,8	505
-	400				
240	500	29,0	460	20,0	580
300	600			22,7	

Конец одного проводника пропускают через втулку соответствующего размера в плите, установленной под устройством на высоте Н. Втулка должна быть установлена в горизонтальной плоскости таким образом, чтобы ее средняя линия описывала круг диаметром 75 мм, concentричный центру зажима. Затем пластину поворачивают с частотой (10 ± 2) мин⁻¹.

Расстояние между зажимом и верхней поверхностью втулки Н должно быть в пределах, указанных в табл. 11. Для предотвращения заедания, скручивания или вращения проводника втулку смазывают.

К концу проводника подвешивают груз, масса которого указана в табл. 11.

Длительность испытания — 15 мин.

В процессе испытания проводник не должен выскальзывать из зажима или повреждаться до такой степени, чтобы его нельзя было в дальнейшем использовать.

Затем каждый проводник должен быть подвергнут испытанию на натяжение в соответствии с 9.5.

9.5. После испытания по 9.4. к каждому проводнику следует приложить усилие натяжения, указанное в табл. 12. При испытании не затягивают зажимные винты или гайки (при их наличии). Усилие прикладывают без рывков в течение 1 мин в направлении оси проводника.

Таблица 12.

Испытание проводника на усилие натяжения

Сечение проводника, мм ²	0,20	0,34	0,50	0,75	1,00	1,50	2,50	4,00	6,00	10,00	16,00
Усилие натяжения, Н	10	15	20	30	35	40	50	60	80	90	100

При испытании проводник не должен выходить из зажима.

9.6. Испытание проводят на винтовых контактных зажимах с медными проводниками номинального сечения согласно 7.4.

Винты или гайки следует затянуть и ослабить пять раз с помощью отвертки или гаечного ключа, при этом прилагаемый момент должен быть равен приведенному в соответствующей графе табл. 13 или указанному изготовителем.

Каждый раз при ослаблении винта или гайки используют новый отрезок проводника.

Допускается использовать крутящий момент большей величины.

Значения графы I относятся к винтам без головок, которые в затянутом положении не выступают за пределы отверстия, или к другим винтам, которые не могут быть затянуты с помощью отвертки, лезвие которой шире диаметра винта,

Значения графы II относятся к гайкам колпачковых зажимов, которые затягивают с помощью отвертки.

Значения графы III относятся к другим винтам, которые могут быть затянуты без отвертки.

Значения графы IV относятся к винтам и гайкам, отличающимся от гаек колпачковых зажимов, которые затягивают не отверткой.

Значения графы V относятся к гайкам колпачковых зажимов, которые затягивают не отверткой.

Если винт имеет шестигранную головку со шлицем и значения в графах III и IV отличаются друг от друга, данное испытание проводят дважды: первый раз на комплекте из трех образцов, прикладывая к шестигранной головке винта момент, приведенный в графе IV, а затем — на другом комплекте из трех образцов, прикладывая момент, приведенный в графах I, III, с помощью отвертки. Если в графах III и IV приведены одинаковые значения, то проводят испытание с помощью отвертки.

Винты и гайки, зажимающие проводники, должны иметь метрическую резьбу по ГОСТ 8724 или резьбу с эквивалентным шагом и обладать соответствующей механической прочностью.

Таблица 13.

Крутящие моменты, прикладываемые к винтовым зажимам с целью проверки их механической прочности

Номинальный диаметр резьбы, мм	Крутящий момент, Н·м				
	I	II	III	IV	V
До 2,8 включ.	0,05	-	0,1	0,1	-
Св. 1,6 до 2,0 включ.	0,10	-	0,2	0,2	-
» 2,0 » 2,8 »	0,20	-	0,4	0,4	-
» 2,8 » 3,0 »	0,25	-	0,5	0,5	-
» 3,0 » 3,2 »	0,30	-	0,6	0,6	-
» 3,2 » 3,6 »	0,40	-	0,8	0,8	-
» 3,6 » 4,1 »	0,70	1,2	1,2	1,2	1,2
» 4,1 » 4,7 »	0,80	1,2	1,8	1,8	1,8
» 4,7 » 5,3 »	0,80	1,4	2,0	2,0	2,0
» 5,3 » 6,0 »	1,20	1,8	2,5	3,0	3,0
» 6,0 » 8,0 »	2,50	2,5	3,5	6,0	4,0
» 8,0 » 10,0 »	-	3,5	4,0	10,0	6,0
» 10,0 » 12,0 »	-	4,0	-	-	8,0
» 12,0 » 15,0 »	-	5,0	-	-	10,0

При испытании контактный зажим не должен иметь каких-либо повреждений, например излома винта или повреждения шлица винта, резьбы, шайбы или скобы, что исключит дальнейшее использование зажима.

9.7. При испытании конечного изделия на превышение температуры к зажиму присоединяют проводник, имеющий соответствующую номинальную соединительную способность и тип, находящийся в условиях, указанных в стандарте на соответствующее изделие. Винты и гайки (при их наличии) затягивают крутящим моментом по 9.6.

9.8. Электрические характеристики безвинтовых зажимов проверяют приведенным ниже испытанием, которое проводят на 10 новых образцах зажимов каждой конструкции, которые ранее не использовались при испытаниях. Если контактные зажимы являются частью оборудования, они могут поставляться отдельно.

Испытание проводят с использованием следующих новых медных проводников:

- жестких многожильных для зажимов, которые могут обеспечить присоединение только этих проводников;

- жестких многожильных и гибких проводников для зажимов, которые могут обеспечить присоединение проводников обоих типов.

На контактные зажимы в течение 1 ч подают переменный ток (может

использоваться постоянный ток), равный испытательному току, приведенному в стандарте на соответствующее изделие, и измеряют падение напряжения на каждом зажиме в месте контакта или как можно ближе к нему (подробные данные приводятся в стандарте на изделие).

Падение напряжения не должно превышать 15 мВ.

9.9. Безвинтовые зажимы не должны изменять функциональных характеристик, если соответствующий проводник после его введения в зажимное устройство был согнут.

9.10. Безвинтовые зажимы, после определения падения напряжения по 9.8, помещают в термокамеру температурой (20 ± 2) °С. Через образцы пропускают испытательный ток в зависимости от номинальной соединительной способности.

Все испытательное оборудование, включая проводники, не должно перемещаться в процессе измерения падения напряжения.

Зажимы должны быть подвергнуты 192 температурным циклам. Каждый цикл длительностью около 1 ч проводят следующим образом.

Температуру воздуха в термокамере повышают в течение примерно 20 мин до 40 °С. Испытательную температуру поддерживают в пределах (40 ± 5) °С приблизительно 10 мин. Затем образцы принудительно охлаждают 20 мин до температуры приблизительно 30 °С. Образцы выдерживают при этой температуре приблизительно 10 мин и за это время проводят измерение падения напряжения. Затем температуру образцов доводят до (20 ± 2) °С.

Максимально допустимое падение напряжения, измеренное на каждом зажимном элементе в конце 24 и 192-го циклов при испытательном токе по 9.8, не должно превышать наименьшее из двух значений: 22,5 мВ или полуторакратного значения, полученного после 24-го цикла. Температуру в термокамере необходимо измерять на расстоянии приблизительно 500 мм от испытываемых образцов.

После этого испытания зажим подвергают внешнему осмотру невооруженным глазом, при котором не должны быть выявлены изменения, препятствующие его последующим испытаниям, например трещины, деформации и т.п.

Дополнительные требования к зажимам, устанавливаемые в стандартах и технических условиях на зажимы конкретных серий и типов и учитывающие потребности экономики страны

1. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам.

1.1. Номинальные и предельные значения климатических факторов, отличающиеся от приведенных в настоящем стандарте, должны соответствовать ГОСТ 15543.1 и ГОСТ 15150.

1.2. Конкретные требования по воздействию механических факторов, отличающиеся от приведенных в настоящем стандарте, должны соответ-

Таблица 14.

Примерное соотношение между сечениями и размерами в соответствии с Американским сортаментом проводов (AWG)

Номинальное сечение, мм ²	Размер калибров в соответствии с AWG	Сечение эквивалентных проводников AWG, мм ²
0,20	24	0,204
0,34	22	0,324
0,50	20	0,520
0,75	18	0,820
1,00	-	-
1,50	16	1,300
2,50	14	2,100
4,00	12	3,300
6,00	10	5,300
10,00	8	8,400
16,00	6	13,300
25,00	4	21,200
35,00	2	33,600

ствовать группам условий эксплуатации по ГОСТ 17516.1.

2. Требования к консервации, упаковке, транспортированию и хранению.

2.1. Требования к консервации и упаковке — по ГОСТ 23216.

2.2. Условия транспортирования устанавливаются в зависимости от назначения зажимов по ГОСТ 23216 и ГОСТ 15150.

3. Требования к защитным покрытиям.

Металлические детали зажимов должны иметь защитные покрытия в соответствии со стандартами Единой системы защиты от коррозии и старения материалов и изделий.

Контактные участки выводов зажимов должны иметь защитные покрытия по ГОСТ 9.005.

4. Виды испытаний и правила приемки.

4.1. В настоящем стандарте программа типовых испытаний является основой для установления программ контрольных испытаний любых видов по ГОСТ 16504.

4.2. Зажимы подвергаются квалификационным, периодическим, приемосдаточным и типовым испытаниям; порядок их проведения должен соответствовать ГОСТ 15.001; периодичность испытаний, программы испытаний и условия их проведения должны устанавливаться в стандартах и технических условиях на зажимы конкретных типов.

Таблица 15.

Конструкция многожильных проводников

Сечение, мм ²	Минимальное число проволочек в круглом неуплотненном проводнике	Максимальный диаметр проволочек в проводнике, мм
0,20	7	0,21
0,34		0,25
0,50		0,21
0,75		
1,00		
1,50		0,26
2,50		0,31
4,00		
6,00		0,411
10,00		
16,00		
25,00		
35,00		

Приемочные и квалификационные испытания зажимов должны включать в себя полную программу типовых испытаний по настоящему стандарту, а также испытания на стойкость к внешним воздействующим факторам, проверку защитных покрытий, испытания на надежность по ГОСТ 27.003 и ГОСТ 27.410.

4.3. Правила приемки зажимов должны устанавливаться в стандартах и технических условиях на зажимы конкретных типов.

5. Нормативные ссылки.

В настоящем приложении использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 9.005—72 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами.

ГОСТ 15.001—88 Система разработки и постановки продукции на производство.

Продукция производственно-технического назначения.

ГОСТ 27.003—90 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

ГОСТ 27.410—87 Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.

ГОСТ 15150—69 Машины, приборы и другие технические изделия.

Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

ГОСТ 15543.1—89 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам.

ГОСТ 16504—81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

ГОСТ 17516.1—90 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам.

ГОСТ 23216—78 Изделия электротехнические. Хранение, транспортирование, временная противокоррозионная защита, упаковка. Общие требования и методы испытаний.

Таблица 16.

Номинальная соединительная способность и соответствующие калибры (размеры в миллиметрах)

Номинальная соединительная способность, мм ²	Теоретический диаметр наибольшего проводника (в метрической системе)			Калибры			Допустимое отклонение для a, b, d
	Жесткий		Гибкий	Размеры		Диаметр	
	Одножильный	Многожильный		a	b		
0,20	0,51	0,53	0,61	-	-	0,7	-0,05
0,34	0,63	0,66	0,80	-	-	0,9	
0,50	0,90	-	-	2,0	1,2	1,0	
	-	1,10	-			1,2	
	-	-	1,10			-	
0,75	1,00	-	-	2,0	1,2	1,1	
	-	1,20	-			1,3	
	-	-	1,30			1,4	
1,00	1,20	-	-	2,0	1,2	1,3	
	-	1,40	-			1,5	
	-	-	1,50			1,6	
1,50	1,50	-	-	2,4	1,5	1,6	
	-	1,70	-			1,8	
	-	-	1,80			1,9	
2,50	1,90	-	-	2,8	2,0	2,0	
	-	2,20	-			2,3	
	-	-	2,30			2,4	

Продолжение таблицы 16.

4,00	2,40	-	-	2,8	2,4	2,5	-0,05
6,0	-	2,70	-	3,6	3,1	2,8	
	-	-	2,90			3,0	
	2,90	-	-	3,6	3,1	3,0	
10,0	-	3,30	-	4,3	4,0	3,4	-0,06
	-	-	3,90			4,0	
	3,70	-	-	4,3	4,0	3,8	
16,0	-	4,20	-	-	-	4,3	
	-	-	5,10			5,2	
	4,60	-	-	-	-	4,7	
25,0	-	5,30	-	-	-	5,4	
	-	-	6,30			6,4	
	-	-	-	-	-	-	
35,0	-	6,60	-	-	-	6,7	
	-	-	7,80			7,9	
	-	-	-	-			
	-	7,90	-			8,0	
	-	-	9,20			9,3	

Испытание проводят с использованием указанных выше калибров.

Вопросы

1. Какие средства могут использоваться для стабилизации электрического сопротивления в разъемных контактах?
2. Как предотвратить самоотвинчивание разборных контактных соединений?
3. Какие требования предъявляются к материалам токоведущих частей? Приведите примеры таких материалов.
4. Как производится испытание образцов зажимных контактов в соответствии с ГОСТ 51686.1-2000?
5. Какой зажим после внешнего осмотра считается пригодным для дальнейших испытаний?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аппаратура, построенная с использованием ЭРЭ, БИС, УФЭ, требует применения различных соединителей и коммутационных устройств. В связи с этим их развитие и совершенствование является одной из важнейших задач. При переходе на ИС (включая БИС) и УФЭ относительное количество соединителей и коммутационных устройств уменьшается. Но в связи с общей тенденцией усложнения аппаратуры их выпуск быстро увеличивается: примерно, в 1,5—2 раза за каждые 5 лет. При этом к ним предъявляется ряд дополнительных требований и, в первую очередь, уменьшение габаритов, массы и повышение надежности. Поэтому, следует ожидать значительного прогресса в конструкциях и характеристиках коммутационных устройств и соединителей.

С точки зрения применения в ЭА коммутационные устройства и соединители можно разделить на три группы.

Устройства, которые не могут быть исключены из ЭА на интегральных микросхемах. Это, в первую очередь, приборные и приборно-кабельные соединители. Именно в них следует ожидать наибольшего прогресса и совершенствования конструкций. Хотя в ближайшее время будут преобладать, вероятно, контактные устройства, можно предположить, что начнется применение оптронных соединителей. Определяется это в основном тем, что увеличивается удельный вес цифровых устройств в ЭА. При этом цепи, по которым проходят цифровые сигналы, несущие информацию, нечувствительны к нелинейным искажениям. Исходя из этого, могут использоваться оптронные соединители, основное ограничение которых связано с нелинейностью. Потери мощности сигнала в таком соединителе могут быть легко скомпенсированы включением усилителей [1]. Соединители, в которых протекают непрерывные токи, отображающие информацию, а также токи электропитания, в настоящее время и в будущем должны быть основаны на принципах электрического контакта. В связи с возрастающими требованиями по количественному выпуску соединителей важно интенсивно продолжать работы по их совершенствованию и по автоматизации их производства.

Устройства коммутации, управление которыми осуществляет оператор (кнопки, тумблеры, переключатели и т. д.). Такие устройства также сохраняют свою функцию в ЭА, так как аппаратура является человеко-машинной системой и обязательно ее взаимодействие с оператором. К коммутационным устройствам ручного управления предъявляются все более жесткие требования по надежности, удобству управления, массе, габаритам, стоимости. Большие возможности по усовершенствованию таких коммутационных устройств дает применение бесконтактных исполнительных элементов, например кнопок,

использующих оптопары или магниторезисторы. Следует ожидать широкого применения сенсорных устройств управления аппаратурой и связанных с ними контактных устройств.

Устройства коммутации цепей внутри аппаратуры (реле). Как уже отмечалось, значительные габариты, масса, стоимость реле, в том числе и герконовых, низкая надежность, особенно при использовании обычных реле, позволяет считать, что в перспективе они будут в значительной мере заменены полупроводниковыми коммутационными устройствами и оптронами. Обуславливается это тем, что цепи, подвергающиеся коммутации внутри аппаратуры, часто являются цепями для передачи цифровых сигналов, для которых, как это было показано выше, нелинейности характеристик оптопар и полупроводниковых коммутационных устройств не приводят к искажениям информации. Кроме того, и в цепях с аналоговыми сигналами можно применять такие оптопары, которые не вносят существенных нелинейных искажений, а также МДП-коммутаторы. Используя транзисторные и тиристорные оптопары, можно осуществлять коммутацию цепей, которые находятся под большим напряжением и по которым протекают большие токи. Для цепей, требующих очень малого контактного сопротивления в открытом состоянии (0,01...0,001 Ом) будут широко использоваться контактные коммутационные устройства.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Классификация соединителей и коммутационных устройств

Классификация соединителей

Классификация *по виду соединяемых частей*:

1 группа – низковольтные, НЧ предназначены для работы на $U_h < 1500$ В и $f < 3$ МГц, длительность фронта $< 0,1$ мс.

2 группа – соединители с напряжением более 1,5 кВ.

3 группа – ВЧ–соединители, для соединения различных частей.

4 группа – комбинированные соединители, контакты НЧ и ВЧ типа.

По конструкционной особенности и форме изолятора, соединители различают:

1 – цилиндрические (форма сечения близка к кругу);

2 – прямоугольные.

Цилиндрические соединители делятся по способу сочленения и фиксации сочлененного соединения:

1 – резьбовые;

2 – врубные;

3 – самозапирающиеся;

4 – байонетные.

Прямоугольные соединители делятся по способу монтажа:

1 – приборные;

2 – для печатного монтажа.

Приборные соединители:

1 – межблочные;

2 – блочные;

3 – кабельные;

4 – проходные.

Соединители для печатного монтажа:

1 – торцевые;

2 – навесные.

Все соединители делятся *по габаритам*:

1 – Соединители нормальных габаритов (шаг Н между контактами больше 5 мм).

2 – Соединители малогабаритные. ($3,5 < Н < 5$ мм).

3 – Соединители субминиатюрные. ($1,75 < Н < 3,5$ мм).

4 – Соединители миниатюрные. ($1,25 < Н < 1,75$ мм).

5 – Соединители микроминиатюрные. ($Н=1,112$).

6 – Соединители супермикроминиатюрные. ($Н=0,625$).

Все соединители, *по принципу контактирования*, делятся на:

1 – соединители с обычным контактом;

2 – униполярные соединители;

- 3 – соединители с опаяемыми контактами;
- 4 – соединители с принудительным обжатием контактов.

Обозначение НЧ–соединителей

Первый блок состоит из трех букв.

Первая буква в обозначении означает:

О – общего применения.

Вторая буква обозначает:

Н – низкочастотный, низковольтный;

К – комбинированный.

Третья буква обозначает:

Ц – цилиндрический;

П – прямоугольный.

Если последние буквы строчные «ц» или «п», то этот соединитель предназначен для печатного монтажа.

Второй блок состоит из двух букв.

Первая буква определяет тип соединителя:

Б – байонетного типа;

Р – резьбового;

В – врубного;

С – самозапирающийся;

П – с принудительным обжатием контактов;

Вторая буква определяет габарит соединителя:

Н – соединители нормальных габаритов;

Г – соединители малогабаритные;

С – соединители субминиатюрные;

М – соединители миниатюрные;

К – соединители микроминиатюрные;

На третьем месте - число – порядковый номер разработки.

На четвертом месте - число - количество контактов у соединителя.

На пятом месте - размер соединителя:

– для прямоугольного соединителя размер обозначается так: А*В (например, 45*20).

– для цилиндрического: А – это диаметр (например, 25).

Шестой блок – буква:

В – вилка;

Р – розетка;

Г – гибрид;

У – униполярный.

Далее идет номер типа конструкции.

Пример обозначения соединителя:

ОНп – ВГ – 7 – 48/94*15 – В – 53

или

ОНц – БГ – 2 – 45/39 – Р – 11

Обозначение ВЧ–соединителей

1. Буквы СР или СРГ- соединитель радиочастотный.
2. Далее идет цифра, которая обозначает волновое сопротивление соединителя. Например, 50 или 75.
3. Третьим стоит номер разработки.
От 1 до 100 – байонетного типа;
от 101 до 500 – резьбового;
от 501 до 700 – врубного;
Вид изоляционного материала:
П – полиэтилен;
С – полистирол;
К – керамика;
Ф – фторопласт.

Пример обозначения ВЧ- соединителя:

СР – 75 – 110Ф

Классификация коммутационных устройств

По *типу управляющего сигнала*:

- 1 – электрическое управление;
- 2 – механическое (ручное) управление.

По *принципу коммутации*:

- 1 – контактные;
- 2 – бесконтактные.

По *принципу действия*:

- 1 – контактного типа;
- 2 – механические;
- 3 – электромагнитные;
- 4 – магнитоуправляемые;
- 5 – магнитогидродинамические;
- 6 – электростатические;
- 7 – электротепловые;
- 8 – электромагнострикционные;
- 9 – бесконтактного типа;
- 10 – электронные;
- 11 – магнитные;
- 12 – гальваномагнитные;
- 13 – оптоэлектронные;

- 14 – электретные;
- 15 – пьезоэлектрические;
- 16 – криотронные;
- 17 – халькогенидные;
- 18 – оптические.

По способу управления приводом все механические переключатели делятся на:

- 1 – нажимные (кнопочные);
- 2 – перекидные (тумблер);
- 3 – поворотные (галетные);
- 4 – движковые;
- 5 – сенсорные.

1 – Нажимные (кнопочные) – приводятся в действие нажатием кнопки. Такие переключатели обеспечивают наибольшую скорость переключения. В качестве коммутирующего устройства используются микропереключатели (их особенность мгновенное действие).

2 – Перекидные (тумблер) – привод выполнен в виде рычага, который перекидывается (иногда на рычаг наносится слой люминофора). Такие переключатели имеют один, два, три, не более четырех полюсов. При переключении имеют два или три положения.

3 – Поворотные (галетные) – это многопозиционные переключатели. Специальное условное обозначение таких переключателей:

- 24П – 24 положения;
- 15Н – 15 направлений.

5 – Движковые – имеют орган управления в виде движка.

6 – Сенсорные – такие переключатели не имеют подвижного контакта. Включаются при прикосновении пальца к некоторой поверхности. Существуют также квазисенсорные переключатели, которые имеют подвижный контакт, который замыкается или размыкается – он связан со схемой управления.

Коммутационные устройства с электрическим управлением (реле):

- 1 – электромагнитные;
- 2 – магнитоуправляемые (герконовые);
- 3 – магнитодинамические;
- 4 – электростатические;
- 5 – электромагнитострикционные;
- 6 – электротепловые;
- 7 – электронные;
- 8 – гальваномагнитные;
- 9 – электретные;
- 10 – магнитные;
- 11 – пьезоэлектрические;
- 12 – криотронные;

13 – халькогенидные;

14 – оптические.

По *типу исполнительной системы* оптические реле (оптроны) делятся на:

1 – резисторные;

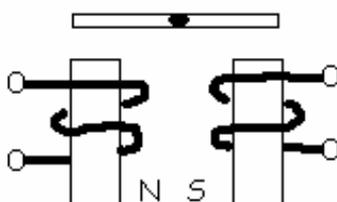
2 – диодные;

3 – транзисторные;

4 – однопереходные транзисторы;

5 – тиристорные.

1 – Электромагнитное реле – принцип действия у данного реле следующий: электрический сигнал подается на катушку и вследствие чего к нему притягивается якорь, который связан с контактной группой.

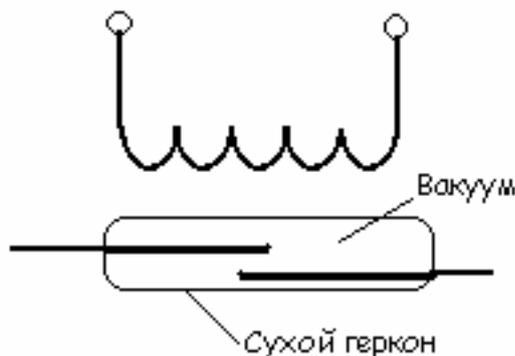


Различают реле переменного и постоянного тока. Реле постоянного тока могут быть одностабильными (одно устойчивое состояние) и двустабильными (два устойчивых состояния при отсутствии напряжения на обмотке). Одностабильные реле могут быть:

нейтральные (срабатывают при любой полярности напряжения);

поляризованные (срабатывают при определенной полярности).

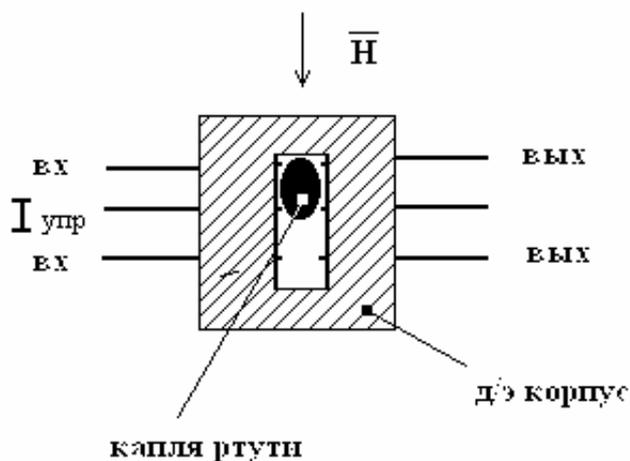
2 – Магнитоуправляемое (герконовое) реле – магнитоуправляемое реле представляет собой катушку с герконом.



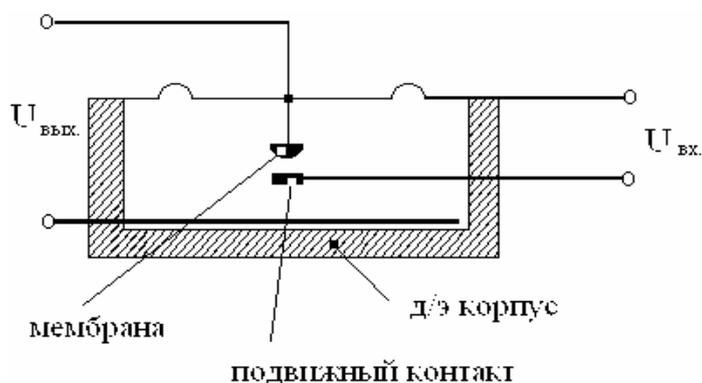
Геркон – баллон с вакуумом (или может быть наполнен специальным газом) с контактами, изготовленными из пермалля. Поверхности контактов покрывают золотом или серебром. Различают герконы замыкающие, размыкающие и переключающие. По габаритам герконы делятся на: стандартные (длина баллона 50мм), промежуточные (36мм), миниатюрные (20мм), сверхминиатюрные (10мм). Герсикон –

герметичный силовой контакт. В баллон герсикона вмонтирована магнитная система, связанная с внешним электромагнитом.

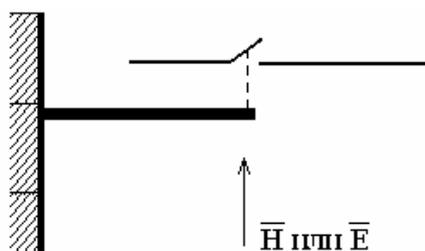
3 – Магнитодинамические реле – для переключения реле необходимо воздействовать магнитным полем на каплю ртути, подавая ток на средний управляющий вывод. Направление перемещения капли зависит от направления тока или магнитного поля. Объем ртути должен быть небольшим.



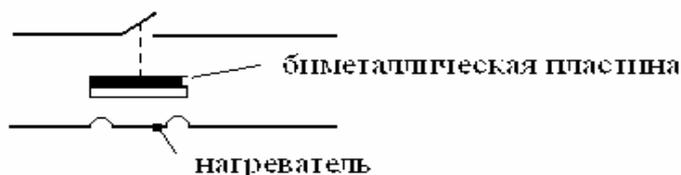
4 – Электростатические реле – принцип действия основан на использовании кулоновских сил, которые обеспечивают притяжение подвижного электрода с мембраной к неподвижному.



5 – Электромагнито- или электрострикционные реле – принцип действия основан на явлениях магнито- или электрострикций, то есть способности материалов изменять свои размеры под воздействием магнитных или электрических полей.

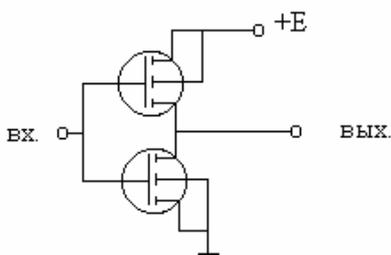


6 – Электротепловые реле – принцип действия основан на различных коэффициентах термического линейного расширения (ТКЛР) металлов в системе биметаллической пластины. Используются в качестве: датчика температуры, реле времени (из-за высокой инерционности), обычного реле, устройства защиты от перегрузок.

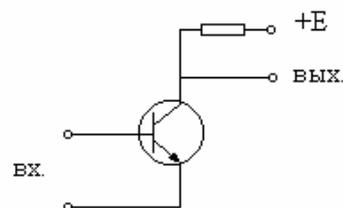


7 – Электронные реле – это обычный электронный ключ, например на транзисторах (различают: биполярные, полевые, КМОП и МОП структуры).

На КМОП-структуре:



На биполярном транзисторе:

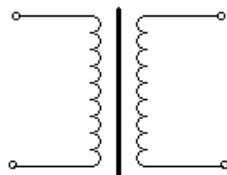


8 – Гальваномангнитные реле – используют для коммутации либо эффект Холла, либо эффект Гаусса.

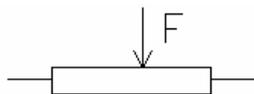
9 – Электретные реле – здесь в качестве диэлектрика в конденсаторе используется тонкая пленка электрета (пленка из фторопласта). Величина тока в цепи будет зависеть от скорости перемещения подвижной обкладки. Это бесконтактное реле, не потребляет тока, отсутствует дребезг контактов. Эти устройства имеют механическое или дистанционное управление.



10 – Магнитные реле – в простейшем случае это двух обмоточный трансформатор (сердечник может быть выполнен из ферромагнитного материала). При подаче напряжения на вход появляется напряжение на выходе. Обычно работает на переменном токе.



11 – Пьезоэлектрические реле – работа основана на том, что при деформации некоторых материалов возникает ЭДС, она и будет выходным сигналом.



12 – Криотронные реле – используют свойство некоторых материалов при низкой температуре переходить в состояние сверх проводимости и выходить из этого состояния под действием магнитного поля, при этом, не изменяя температуры.

13 – Халькогенидные реле – в таких реле используются халькогенидные стекла. Эти материалы резко изменяют свои свойства под действием электрического и магнитного поля.

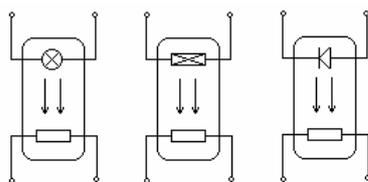
14 – Оптоэлектронные реле – оптоэлектронным реле называют оптрон или оптоэлектронную пару. Они включают в себя три системы:

- преобразователь электрического тока в световое излучение - светоизлучатель;
- передающую систему – для передачи света;
- преобразователь светового потока в электрический сигнал – фотоприемник.

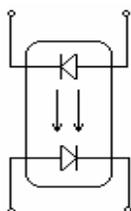
В качестве светоизлучателей используют:

- электролюминесцентные конденсаторы;
- светодиоды;
- сверхминиатюрные лампы накаливания.

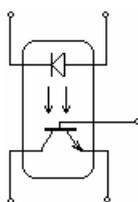
14.1. – Резисторная оптопара – используется полупроводниковый фоторезистор – это селенид кадмия, сернистый кадмий. Их сопротивление падает при излучении на них света. Для диапазона ИК-лучей используют PbS или PbSe. Для излучателей используют сверхминиатюрные лампы накаливания (оптопара ОЭП-1, твкл. ≈ 200 мс), электролюминесцентные конденсаторы (оптопара ОЭП-8, твкл. ≈ 600 мс) и светодиоды (оптопара ОЭП-7, ОЭП-6, твкл. ≈ 120 мс).



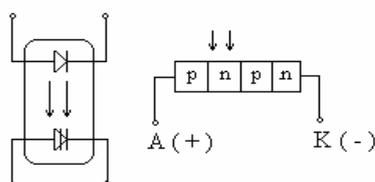
14.2. – Диодная оптопара – используются полупроводниковые диоды в фотодиодном режиме, либо фотогенераторном режиме. Наибольшим быстродействием обладают р-і-п диоды (очень малое время включения). АОД-101, твкл. = 1 мкс.



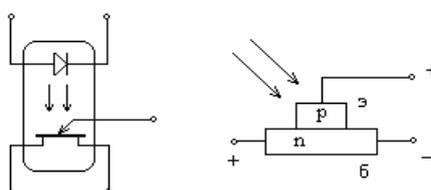
14.3 – Транзисторные оптопары – в качестве излучателей используется ИК-диоды, но можно использовать и обычный свет. АОТ-123, твкл. ≈ 2 мкс.



14.4 – Тиристорные оптопары – для выключения прибора приходится коммутировать выходную цепь, из-за лавинного образования электронов. АОУ-103, твкл. ≈ 10 мкс.



14.5 – На основе однопереходных транзисторов (двухбазовый диод) – облучается эмиттер и его можно использовать в различных режимах работы: фотодиодный, однопереходный транзистор и пр. АОТ-102, твкл. ≈ 5 мкс.



Обозначение коммутационных устройств с механическим управлением

1. В, П – выключатель или переключатель.
2. К_н, Т, Г, П, Д – кнопочный, тумблер, галетный, программируемые переключатели, движковые.
3. Б – бесконтактный, если нет обозначения – контактный.
4. N (цифра) – порядковый номер разработки.
5. N (цифра) – номер типоминимала.
6. N (цифра) – число полюсов.

Пример обозначения коммутационного устройства с механическим управлением:

ПГ39-3-4.

Обозначение коммутационных устройств с электрическим управлением

1. Буква Р – реле.
2. Принцип действия.
Э – электромагнитное;
П – поляризованное;
Г – герконовое.

3. Буква
К – низкочастотное;
А – высокочастотное.

4. Порядковый номер разработки.

Пример обозначения коммутационного устройства с электрическим управлением:

РЭК-20.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рычина Т. А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электрони- ки и электрорадиоэлементы. — М.: Радио и связь, 1989.
2. Рычина Т. А. Электрорадиоэлементы.—М.: Сов. радио, 1976.
3. Носов Ю. Р., Сидоров А. С. Оптроны и их применение. — М.: Радио и связь, 1981.
4. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник. — М.: Энергоиздат, 1984.
5. Рыбин Г. Я., Ивакин Б. Ф., Вьюков И. В. и др.; Под ред. Рыбина Г. Я. Коммутационные устройства радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1985.
6. Савиных В. Л. Физические основы электроники.—Учебное пособие, 2003.
7. ГОСТ 10434-82 «Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования».
8. МЭК 61545 (1996) Соединительные устройства. Устройства для присоединения проводников из алюминиевых сплавов к контактным зажимам из любого материала и медных проводников к зажимам из алюминиевых сплавов.
9. ИСО 2081 (1986) Металлическое покрытие — цинк на чугун или сталь электролитическим осаждением.
10. ИСО 1456 (1988) Металлическое покрытие — никелево-хромовое и медно-никелевое покрытие электролитическим осаждением.
11. ИСО 2093 (1986) Металлическое покрытие — залуживание электролитическим осаждением. Спецификация и методы испытаний.
12. МЭК 61545 (1996) Соединительные устройства. Устройства для присоединения проводников из алюминиевых сплавов к контактным зажимам из любого материала и медных проводников к зажимам из алюминиевых сплавов.

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

ИСТОРИЯ КАФЕДРЫ

1945-1966 РЛПУ (кафедра радиолокационных приборов и устройств). Решением Советского правительства в августе 1945 г. в ЛИТМО был открыт факультет электроприборостроения. Приказом по институту от 17 сентября 1945 г. на этом факультете была организована кафедра радиолокационных приборов и устройств, которая стала готовить инженеров, специализирующихся в новых направлениях радиоэлектронной техники, таких как радиолокация, радиоуправление, теленаведение и др. Организатором и первым заведующим кафедрой был д.т.н., профессор С. И. Зилитинкевич (до 1951 г.). Выпускникам кафедры присваивалась квалификация инженер-радиомеханик, а с 1956 г. – радиоинженер (специальность 0705).

В разные годы кафедрой заведовали доцент Б.С. Мишин, доцент И.П. Захаров, доцент А.Н. Иванов.

1966–1970 КиПРЭА (кафедра конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры). Каждый учебный план специальности 0705 коренным образом отличался от предыдущих планов радиотехнической специальности своей четко выраженной конструкторско-технологической направленностью. Оканчивающим институт по этой специальности присваивалась квалификация инженер-конструктор-технолог РЭА.

Заведовал кафедрой доцент А.Н. Иванов.

1970–1988 КиПЭВА (кафедра конструирования и производства электронной вычислительной аппаратуры). Бурное развитие электронной вычислительной техники и внедрение ее во все отрасли народного хозяйства потребовали от отечественной радиоэлектронной промышленности

решения новых ответственных задач. Кафедра стала готовить инженеров по специальности 0648. Подготовка проводилась по двум направлениям – автоматизация конструирования ЭВА и технология микрорелектронных устройств ЭВА.

Заведовали кафедрой: д.т.н., проф. В.В. Новиков (до 1976 г.), затем проф. Г.А. Петухов.

1988–1997 МАП (кафедра микрорелектроники и автоматизации проектирования). Кафедра выпускала инженеров-конструкторов-технологов по микрорелектронике и автоматизации проектирования вычислительных средств (специальность 2205). Выпускники этой кафедры имеют хорошую технологическую подготовку и успешно работают как в производстве полупроводниковых интегральных микросхем, так и при их проектировании, используя современные методы автоматизации проектирования. Инженеры специальности 2205 требуются микрорелектронной промышленности и предприятиям-разработчикам вычислительных систем.

Кафедрой с 1988 г. по 1992 г. руководил проф. С.А. Арустамов, затем снова проф. Г.А. Петухов.

С **1997 ПКС** (кафедра проектирования компьютерных систем). Кафедра выпускает инженеров по специальности 210202 «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств». Область профессиональной деятельности выпускников включает в себя проектирование, конструирование и технологию электронных средств, отвечающих целям их функционирования, требованиям надежности, дизайна и условиям эксплуатации. Кроме того, кафедра готовит специалистов по защите информации, специальность 090104 «Комплексная защита объектов информатизации». Объектами профессиональной деятельности специалиста по защите информации являются методы, средства и системы обеспечения защиты информации на объектах информатизации.

С 1996 г. кафедрой заведует д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин.

За время своего существования кафедра выпустила 4264 инженеров. На кафедре защищено 62 кандидатских и 7 докторских диссертаций.