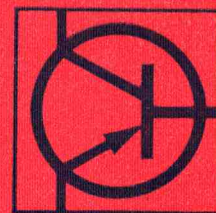
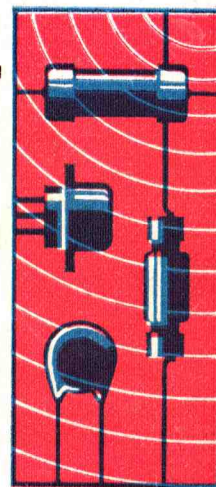


25 к.



Ю. Н. РОНЖИН

ПОЛУПРОВОД- НИКОВАЯ РАДИО- ЭЛЕКТРОНИКА



Ю. Н. РОНЖИН

ПОЛУПРОВОД- НИКОВАЯ РАДИО- ЭЛЕКТРОНИКА



**ЮНОМУ
ТЕХНИКУ**

КИЕВ „РАДЯНСЬКА ШКОЛА” 1982

ББК 32.852
6ФQ.32
P71

ВВЕДЕНИЕ

Ронжин Ю. Н.

P71 Полупроводниковая радиоэлектроника. К.: Рад. школа, 1982.—144 с., ил.— (Юному технику).— Библиогр.: с. 139.

В обл.: 25 к. 150 000 экз.

Книга знакомит читателя с полупроводниковыми радиоэлектронными схемами, принципом работы основных элементов схем и их условными обозначениями, рекомендациями при их выборе. В основу содержания книги положена программа кружка радиоэлектроники, составленная Центральной станцией юных техников Министерства просвещения УССР. Рассчитана на учащихся среднего и старшего школьного возраста, техникумов, руководителей технических кружков, а также на широкий круг читателей, интересующихся вопросами радиоэлектроники.

P 78000—286 350—82 4802020000
M210(04)—82

ББК 32.852
6ФQ.32

Рукопись рецензировали: кандидат пед. наук Г. М. Гайдушок, научный сотрудник Киевского политехнического института С. П. Надкерничный.

Юрий Николаевич Ронжин

Полупроводниковая радиоэлектроника
Серия «Юному технику»

Зав. редакцией физики В. П. Яора. Редактор А. Н. Карнаух. Литредактор Л. Ф. Фалинская. Художеств. редактор Г. И. Грибова. Обложка художника С. А. Шибалова. Технич. редактор А. Г. Фридман. Корректоры А. Н. Кривошея, А. В. Лопата

Информ. бланк № 2861

Сдано в набор 02.06.81. Подписано к печати 26.02.82. БФ 04152. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага газетная. Гарнитура лит. Способ печати высок. Условн. лист. 7,56. Уч. изд. лист. 7,64. Тираж 150 000. Изд. № 26958. Зак. № 1-203. Цена 25 к.

Издательство «Радянська школа», 252053, Киев, Ю. Коцюбинского, 15.

Книжная фабрика им. М. В. Фрунзе, 310057, Харьков-57,
Донец-Захаржевская, 6/8.

P 78000—286 350—82 4802020000
M210(04)—82

© Издательство
«Радянська школа», 1982.

В решениях XXVI съезда КПСС предусматривается обеспечить дальнейшее ускорение научно-технического прогресса*.

Научно-технический прогресс обусловил широкое использование во всех областях народного хозяйства радиоэлектронной аппаратуры. В настоящее время без такой аппаратуры не может обойтись практически ни одна отрасль науки и техники, ни одна сфера производства и управления. Все шире внедряется радиоэлектроника в транспорт, экономику, медицину и быт.

Радиоэлектроника еще очень молода, но ее роль и значение в наши дни огромны. Часто ее называют *катализатором научно-технического прогресса*. И справедливо: не будь радиоэлектроники, в космос не устремлялись бы могучие ракеты, человек не побывал бы на Луне, не было бы атомных электростанций и атомных ледоколов, электронных вычислительных машин. С уверенностью можно сказать, что передний край современного прогресса, научных и технических знаний определяется достижениями радиоэлектроники.

Так что же скрывается за словом *радиоэлектроника*, что это за могучий волшебник?

Слово радиоэлектроника состоит из двух частей: *радио* и *электроника*. Под словом *радио* понимается беспроводная передача на расстояние каких-либо сообщений (речь, музыка, изображение и т. д.) с помощью электромагнитных волн (радиоволн). Отсюда радиотехника — это, во-первых, наука, занимающаяся вопросами передачи и приема таких сообщений с помощью радиоволн, а во-вторых, —

* Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года. М., Политиздат, 1981, с. 18.

это техника приборов, обслуживающая передачу и прием сообщений.

Появление слова *электроника* связано с развитием радиотехнической аппаратуры, когда появились электронные лампы, микрофоны, громкоговорители и т. д. Принцип работы этих и подобных радиотехнических приборов основан на особенностях элементарных частиц, главным образом электронов. Это и послужило основанием объединить сведения об этих приборах под общим названием *электроника*.

На первых этапах электронные приборы и устройства использовались только в радиотехнике и считались ее принадлежностью. Но затем их начали использовать и в других областях науки и техники. И здесь они проявляют себя с лучшей стороны, способствуя быстрому прогрессу. А это, в свою очередь, ускорило темпы развития электронных приборов. Радио породило электронику, электроника создала радиотехнику. Такая взаимная связь и привела к образованию в 50-х годах нашего столетия понятия радиоэлектроника. И уже все прежние достижения радиотехники стали причислять к достижениям радиоэлектроники.

В настоящее время радиоэлектроника объединяет не только радиотехнику и электронику. Она охватывает и новые области знаний: квантовую электронику, оптоэлектронику, полупроводниковую электронику, микроэлектронику, электронные вычислительные машины и др.

В книге рассматривается *полупроводниковая радиоэлектроника*, основанная на использовании свойств полупроводниковых материалов. Применение полупроводниковых приборов вместо электронных ламп позволяет сократить расход энергии, уменьшить вес и габариты радиоэлектронных изделий, повысить их надежность.

На данном этапе развития техники полупроводниковые элементы заняли доминирующее положение в радиоэлектронных схемах. Но для этого потребовалось провести большие экспериментальные работы, глубокие теоретические исследования полупроводников, нужно было освоить технологию получения сверхчистых материалов и т. д.

Поэтому полезно, хотя бы вкратце, ознакомиться с этапами разработок и применения полупроводниковых приборов, с этапами развития полупроводниковой радиоэлектроники.

Первые опыты применения полупроводников относятся к началу XX века. Великий русский ученый, изобретатель радио А. С. Попов впервые в мире применил полупроводниковый кристалл для детектирования высокочастотных колебаний.

В начале нашего столетия, примерно до 1905 г., было проведено много экспериментов по исследованию детекторных свойств кристаллов различных полупроводников. И было определено, что для практических целей наиболее подходят кремниевые детекторы и детекторы на искусственных кристаллах свинцового блеска в паре со стальной пружиной.

Появление в этот период вакуумной радиолампы, которая была пригодна не только для детектирования, но и для усиления и генерирования колебаний, оттеснило использование полупроводниковых кристаллов.

И все же работы по изучению свойств полупроводниковых материалов продолжались. Было сделано много попыток заставить кристаллический детектор усиливать колебания. Впервые это осуществил в 1922 г. О. А. Лосев — сотрудник Нижегородской радиотехнической лаборатории имени В. И. Ленина. Кристаллические детекторы, которые он использовал, были пригодны для усиления и генерации колебаний.

В нашей стране еще в 30-х годах группа советских ученых начала исследование свойств полупроводников. Руководство этими исследованиями возглавил крупнейший советский специалист в области физики полупроводников академик А. Ф. Иоффе.

В период второй мировой войны бурно развивалась радиоэлектроника и особенно радиолокация. В радиолокационной технике широко использовались кристаллические детекторы, у которых было немало преимуществ по сравнению с вакуумным диодом.

Но если вакуумный диод можно заменить полупроводниковым (кристаллическим детектором), то, вероятно, и полупроводниковый триод может заменить вакуумный триод. Появление электронных счетных машин, развитие авиационной радиоэлектроники поставило перед учеными задачу разработать прибор, который смог бы заменить радиолампу. И этот прибор должен быть надежным, малогабаритным и потреблять мало электрической энергии.

В 1948 г. в печати появилось сообщение о создании *транзистора*. Этот полупроводниковый прибор, подобно

вакуумной лампе, обладал усилительными свойствами. Изобретателями транзистора были три физика: У. Шокли, У. Браттейн и Дж. Бардин.

Первые образцы транзисторов уступали радиолампам в рабочем диапазоне частот, выходной мощности. Но в то же время у них были и преимущества: небольшие размеры, отсутствие раскаленного катода, малое потребление энергии, небольшие напряжения. Эти преимущества заставили ученых и специалистов во многих странах мира обратить на них серьезное внимание. Полупроводниковая техника начала быстро развиваться. Появились транзисторные приемники, телевизоры. В вычислительной технике радиолампы полностью вытеснили полупроводниковые приборы.

Первые транзисторы, которые использовались в технике, — это *точечные транзисторы*. Затем их заменили *плоскостные*, обладающие лучшими электрическими и эксплуатационными параметрами.

В настоящее время производятся транзисторы различных типов. Некоторые из них способны развивать выходную мощность, исчисляемую сотнями ватт, другие — работать на частотах, измеряемых тысячами мегагерц.

В 1958 г. японский физик Есаки предложил *туннельный диод*, который в настоящее время применяют для усиления и генерации колебаний (его предшественником можно считать кристаллический детектор О. А. Лосева). Широкое применение в радиоэлектронных схемах находят *полевые транзисторы*. Их принцип работы напоминает работу лампового триода, и за ними большое будущее.

Но наибольший расцвет радиоэлектронная техника получила не в ходе разработки и применения отдельных *дискретных приборов*, а после создания *интегральных микросхем*. Первую полупроводниковую интегральную микросхему на основе монокристаллического куска чистого кремния создал в 1958 г. Дж. Кибли (США). В настоящее время микросхемы не только вытесняют из радиоэлектронных схем дискретные элементы, но и позволяют осуществлять новые технические решения.

Следует отметить также, что работа экипажей советских космических кораблей частично связана с исследованием полупроводников: в условиях космоса космонавты выращивают особо чистые полупроводниковые кристаллы. Сегодня закладывается фундамент для радиоэлектроники завтрашнего дня.

Глава I.

ЭЛЕМЕНТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Рассмотрение элементов радиоэлектронных схем можно было бы начать с рассмотрения принципа работы и назначения отдельных полупроводниковых приборов. Но понимание и усвоение работы полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и т. д.) обычно у начинающих вызывает определенные трудности. Поэтому материал первых трех параграфов посвящен резисторам, конденсаторам, катушкам индуктивности, дросселям и трансформаторам. Эти схемные элементы хотя и не относятся к полупроводниковым (за исключением некоторых видов резисторов и конденсаторов), но в той или иной мере практически применяются во всех радиоэлектронных схемах. Кроме того, содержание материала по этим элементам простое и доступное для начинающего и будет являться подготовкой для последующих параграфов.

1. Резисторы

Резисторы находят очень широкое применение в радиоэлектронных схемах. Основным назначением резисторов является создание сопротивления электрическому току.

Раньше эти элементы (резисторы) называли сопротивлениями. В соответствии с Государственными стандартами СССР электрическим сопротивлениям как схемным элементам присвоено название *резисторы*. Это сделано для того, чтобы различать «сопротивление» как изделие (деталь) и «сопротивление» как его физическое свойство, электрическую величину.

Различают следующие виды резисторов: постоянные, переменные и подстроечные (рис. 1). Резисторы, сопротивление которых нельзя изменять в процессе эксплуатации, называют *постоянными*. Резисторы, с помощью которых осуществляют различные регулировки в аппаратуре изме-

нением их сопротивления, называют *переменными резисторами*, или *потенциометрами*. Резисторы, сопротивление которых изменяют только в процессе налаживания (настройки) аппаратуры, называют *подстроечными*.

По роду материала, из которого изготовлены токопроводящие части резисторов, резисторы бывают проволочными и непроволочными. В *непроволочных* резисторах тоководом являются полупроводниковые материалы или специальные металлические сплавы высокого удельного сопротивления. В радиоэлектронных устройствах в основном применяют непроволочные резисторы.

Единицей сопротивления является 1 Ом — названа в честь немецкого физика Ома. Сопротивление резисторов измеряют в омах (Ом), килоомах (кОм), мегаомах (МОм), гигаомах (ГОм) и тераомах (ТОм); $1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$;

$$1 \text{ МОм} = 10^3 \text{ кОм} = 10^6 \text{ Ом};$$

$$1 \text{ ГОм} = 10^3 \text{ МОм} = 10^6 \text{ кОм} = 10^9 \text{ Ом};$$

$$1 \text{ ТОм} = 10^3 \text{ ГОм} = 10^6 \text{ МОм} = 10^9 \text{ кОм} = 10^{12} \text{ Ом}.$$

К основным параметрам резисторов относятся: номинальное значение сопротивления, допустимое отклонение от номинального значения и номинальная (допустимая) мощность рассеяния.

Номинальное значение сопротивления указано на корпусе резистора. Значения сопротивлений до 999 Ом выражаются в омах, от 1000 до 99000 Ом — в килоомах, от 100 000 Ом и больше — в мегаомах, от $1 \cdot 10^9$ до $1 \cdot 10^{12}$ Ом — в гигаомах, от $1 \cdot 10^{12}$ и выше — в тераомах (табл. 1 приложения).

Допустимое отклонение от номинального значения зависит от класса точности. Различают три основных класса точности резисторов:

I класс с отклонением от номинала $\pm 5\%$ (E24);

II класс — — — — — $\pm 10\%$ (E12);

III класс — — — — — $\pm 20\%$ (E6).

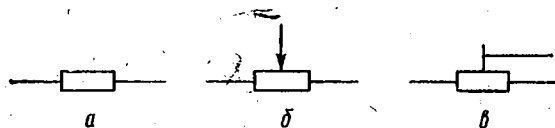


Рис. 1. Условные графические обозначения резисторов на принципиальных схемах:

а — общее обозначение постоянного резистора; б — резистор переменный; в — резистор подстроечный.

С резисторами этих трех классов точности и приходится иметь дело при разработке и выполнении радиоэлектронных схем. Постоянные резисторы, предназначенные для использования в измерительной аппаратуре, а также тогда, когда требуется высокая точность сопротивлений применяемых резисторов, изготавливаются с меньшими отклонениями от номинальных значений сопротивлений: $\pm 0,01\%$, $\pm 0,02\%$, $\pm 0,05\%$, $\pm 0,1\%$, $\pm 0,2\%$, $\pm 0,5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 2\%$. Следует заметить, что при работе в кружках эти резисторы не используют, так как они дорогие.

Номинальные значения сопротивлений резисторов с допускаемыми отклонениями $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ должны соответствовать числам, приведенным в табл. 3 приложения, и числам, полученным умножением этих чисел на 10^n , где n — целое положительное или отрицательное число.

Номинальная мощность рассеяния. При прохождении по резистору электрического тока выделяемая в нем энергия превращается в тепловую. Чем больше сопротивление резистора R и больше ток I через него, тем большая мощность P выделяется на резисторе: $P = I^2 R$, где P — в ваттах; I — в амперах; R — в омах.

Номинальной (допустимой) мощностью рассеяния называют мощность, которая может рассеиваться на резисторе при температуре 20°C . При этом резистор может длительное время работать надежно (не перегреваясь).

Резисторы с различными номинальными мощностями рассеяния обозначают на схемах, как показано на рис. 2.

Если, например, при расчете оказалось, что на резисторе выделяется мощность $P = 0,1$ Вт, то нельзя применять резистор с номинальной мощностью рассеяния $0,05$ Вт (будет перегреваться и даже сгорит). Следует применить резистор на $0,125$ Вт или $0,25$ Вт.

В современной радиоэлектронной аппаратуре наибольшее применение находят следующие типы постоянных резисторов: ВС — влагостойкие; МЛТ — металлизированные

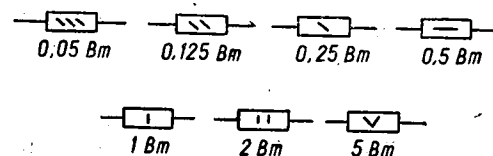


Рис. 2. Условные обозначения номинальных мощностей рассеяния резисторов.

лакированные термостойкие; УЛМ — углеродистые лакированные малогабаритные; МОН — металлоокисные низкомные; ПЭВ — проволочные эмалированные влагостойкие. Предпочтение отдается резисторам типа МЛТ.

Среди переменных резисторов наиболее распространены следующие: СП — резисторы переменные; СПО — резисторы переменные объемные; ВК и ТК — резисторы переменные (ТК имеет выключатель); ПП — проволочные переменные; СПЗ — резисторы переменные композиционные; СП5 — резисторы проволочные малогабаритные.

Маркировка резисторов. На корпусе резистора указывается номинальное значение сопротивления и допустимое отклонение от него. В зависимости от размеров резисторов применяются полные или сокращенные (кодированные) обозначения.

Полное обозначение резистора состоит из: а) цифр, обозначающих номинальное значение сопротивления; б) буквы, обозначающей единицу сопротивления; в) цифр, обозначающих допускаемое отклонение от номинального значения в процентах.

При этом на резисторах вместо сокращенного обозначения единицы кОм ставят букву «к», вместо МОм — букву «М», а обозначение Ом вообще не ставят. Отклонение $\pm 5\%$ или $\pm 10\%$ указывается на резисторе. Иногда вместо $\pm 5\%$ стоит римская цифра I (первый класс точности, а вместо $\pm 10\%$ — цифра II (второй класс точности). Сопротивление резистора, на котором отклонение не указано, может иметь отклонение от номинального значения $\pm 20\%$.

Кодированное обозначение, предназначенное для маркировки малогабаритных резисторов состоит из: а) цифр, обозначающих номинальное значение сопротивления; б) буквы, обозначающей единицу сопротивления и одновременно указывающей положение запятой в десятичной дроби; в) буквы, обозначающей допускаемое отклонение сопротивления от номинального значения.

Пример кодированного обозначения номинального сопротивления 4,7 кОм с допускаемым отклонением $\pm 10\%$: 4К7С.

Обозначения номинальных значений и единиц сопротивления приведены в табл. 1, а кодированные обозначения допускаемых отклонений — в табл. 4.

Обозначение резисторов. На принципиальных схемах (или просто схемах) рядом с условным графическим обозначением резистора указывается его условное буквенно-цифровое

позиционное обозначение, состоящее из буквы R (первая буква английского слова Resistance — сопротивление) и числа, обозначающего порядковый номер резистора по схеме, и здесь же проставляется значение сопротивления. Кроме того, внутри символа резистора условными знаками указывается номинальная мощность рассеяния (R1, рис. 3).

Иногда к условному позиционному обозначению резистора добавляют знак «*» (звездочка). Этот знак показывает, что значение сопротивления указано ориентировочно, и при налаживании устройства его следует определенным образом подобрать (R2*, рис. 3).

На схемах рядом с обозначением величины сопротивления иногда можно увидеть надпись «*пров.*», что означает «*проволочный*» (например, в выходных каскадах мощных усилителей низкой частоты). Эта надпись означает, что резистор изготовлен из провода с большим удельным сопротивлением — константана или нихрома (R3, рис. 3). На графическом обозначении такого резистора номинальная мощность рассеяния обычно не указывается.

Соединение резисторов. В практических схемах иногда используется последовательное, параллельное или смешанное соединение резисторов (рис. 4).

При *последовательном соединении* резисторов общее сопротивление $R_{\text{общ}}$ равно сумме сопротивлений всех резисторов: $R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$.

При *параллельном соединении* резисторов общее сопротивление обычно рассчитывают через проводимость:

$$G_{\text{общ}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n, \text{ или } \frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$



Рис. 3. Обозначение резисторов в схемах.

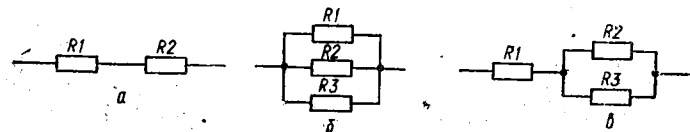


Рис. 4. Соединение резисторов:

а — последовательное; б — параллельное; в — смешанное.

Электрической проводимостью называется физическая величина, обратная сопротивлению: $G = 1/R$. Проводимость и сопротивление — величины взаимно обратные. Чем больше сопротивление проводника, тем меньше его проводимость, и наоборот. Единицей проводимости является *сименс* (См): $1 \text{ См} = 1/\text{Ом}$, $1 \text{ Ом} = 1/\text{См}$, или $1 \text{ См} = 1 \text{ Ом}^{-1}$.

Смешанное соединение резисторов представляет комбинацию параллельного и последовательного соединений резисторов.

Расчет общего сопротивления при смешанном соединении производят в такой последовательности. Сначала определяют общее сопротивление параллельно соединенных резисторов, а затем находят общее сопротивление смешанного соединения как сумму сопротивлений последовательно соединенных резисторов.

2. Конденсаторы

Простейший конденсатор состоит из двух металлических пластин (обкладок), разделенных изолятором (диэлектриком). Если одну обкладку конденсатора зарядить положительно, а другую отрицательно, то разноименные заряды, притягиваясь друг к другу, будут удерживаться на обкладках. Поэтому конденсатор может быть накопителем электрической энергии.

Обкладки конденсатора обычно изготовляют из алюминия, меди, серебра, тантала. В качестве диэлектрика применяют специальную (конденсаторную) бумагу, слюду, синтетические пленки, воздух, специальную керамику и т. п. (рис. 5).

Важнейшим параметром конденсатора является его *емкость* C (от английского слова Capacitance — емкость). Емкость конденсатора зависит от площади его пластин, расстояния между ними и от примененного диэлектрика.

Основная единица емкости — *фарад* (Ф) — в честь английского физика Фарадея. Это очень крупная единица емкости, поэтому на практике используют дольные единицы емкости — микрофарад (мкФ), нанофарад (нФ), и пикофарад (пФ):

$$1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}; 1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}; 1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$1 \text{ мкФ} = 10^3 \text{ нФ} = 10^6 \text{ пФ}; 1 \text{ нФ} = 10^3 \text{ пФ}.$$

Пикофарад — самая мелкая единица емкости.

Параметры конденсаторов. К основным электрическим параметрам, характеризующим конденсатор, относятся:

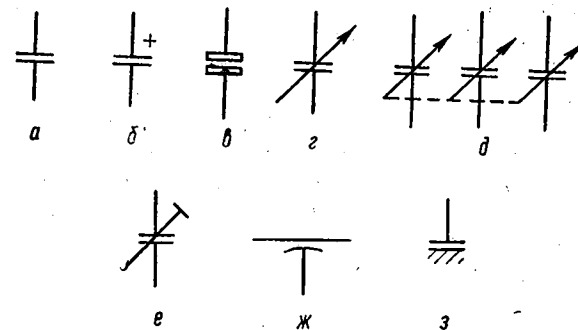


Рис. 5. Условные графические обозначения конденсаторов:

а — конденсатор постоянной емкости; б — конденсатор электролитический полярный; в — конденсатор электролитический неполярный; г — конденсатор переменной емкости; д — конденсатор переменной емкости многосекционный (например, трехсекционный); е — конденсатор подстроечный; ж — конденсатор проходной; з — конденсатор опорный.

номинальное значение емкости; допускаемое отклонение от номинального значения; номинальное (рабочее) напряжение; сопротивление изоляции или ток утечки.

Важными параметрами являются также величины, характеризующие потери в диэлектрике конденсатора (тангенс угла потерь $\tan \delta$), а также стабильность значения емкости при изменениях температуры (температурный коэффициент емкости — ТКЕ).

Номинальное значение емкости указано на корпусе конденсатора, причем значения емкостей до 9999 пФ выражаются в пикофарадах, а свыше 9999 пФ — в микрофарадах.

Допустимое отклонение емкости от номинального значения зависит от класса точности конденсатора. Различают три основных класса точности конденсаторов:

- I класс — с отклонением от номинала $\pm 5\%$ (E24);
- II класс — » » $\pm 10\%$ (E12);
- III класс — » » $\pm 20\%$ (E6).

Существуют и более высокие классы точности (с меньшими отклонениями): $\pm 0,1\%$, $\pm 0,2\%$, $\pm 0,5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 2\%$. Конденсаторы высоких классов точности используются для измерительной аппаратуры.

Номинальные значения емкостей конденсаторов с допускаемыми отклонениями $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ и $\pm 20\%$ должны

соответствовать числам, приведенным в табл. 3 приложения, и числам, полученным умножением этих чисел на 10^n , где n — целое положительное или отрицательное число.

Рабочее напряжение — наибольшее напряжение между обкладками конденсатора, при котором он нормально работает длительное время. Для большинства типов конденсаторов оговаривается обычно напряжение постоянного тока, значение которого указано на корпусе конденсатора.

Сопротивление изоляции конденсатора характеризует качество его диэлектрика, значение тока утечки через него и, следовательно, надежность работы конденсатора в электрической схеме. Оно измеряется между выводами его обкладок при приложении заданного значения подводимого напряжения. Сопротивление изоляции выражается в мегомах или в МОм/мкФ. Конденсаторы с низким сопротивлением изоляции и с большими токами утечки не следует устанавливать в радиоэлектронных устройствах.

Потери в конденсаторах. В любом конденсаторе, включенном в электрическую цепь, часть энергии безвозвратно теряется. Она расходуется на нагрев конденсатора и рассеивается в окружающей среде. Потери энергии в основном определяются потерями в диэлектрике и характеризуются тангенсом угла потерь $\operatorname{tg} \delta$. Чем больше потери в конденсаторе, тем больше и $\operatorname{tg} \delta$. Наименьшие потери имеют конденсаторы с диэлектриком из высокочастотной керамики. Величина, обратная $\operatorname{tg} \delta$, называется *добротностью конденсатора*: $Q_c = 1/\operatorname{tg} \delta$. У качественных конденсаторов $Q_c = 1000$ и выше.

Температурный коэффициент емкости (ТКЕ). При изменении температуры окружающей среды емкость конденсатора изменяется. Параметр, характеризующий изменение емкости конденсатора при изменении температуры на 1°C , называется температурным коэффициентом емкости (ТКЕ). ТКЕ выражают в миллионных долях от емкости конденсатора при комнатной температуре (20°C) на 1°C (10^{-6} на 1°C): $\text{ТКЕ} = \Delta C/C$, где ΔC — отклонение емкости от номинального значения при изменении температуры на 1°C : $\Delta C = \text{ТКЕ} \cdot C$.

В зависимости от значения ТКЕ и его зависимости от температуры (линейная или нелинейная) конденсаторы постоянной емкости делятся на группы, каждая из которых характеризуется своим ТКЕ (табл. 6). Для конденсаторов других типов температурный коэффициент емкости отдельно

не оговаривается, а указываются изменения емкости при крайних значениях рабочего диапазона температур по сравнению с емкостью в нормальных условиях (табл. 7).

Различают конденсаторы постоянной и переменной емкости, а также подстроечные. Конденсаторы, емкость которых нельзя изменять в процессе эксплуатации, называют конденсаторами *постоянной емкости*. Конденсаторы, емкость которых можно плавно изменять в процессе эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (главным образом для настройки резонансных контуров), называют конденсаторами *переменной емкости*. Конденсаторы, емкость которых изменяют только в процессе настройки, называют *подстроечными*.

Конденсаторы постоянной емкости. В зависимости от материала примененного диэлектрика конденсаторы называют слюдяными, бумажными, керамическими, стеклянными и т. д.

Слюдяные конденсаторы. В качестве диэлектрика используется слюда. Обкладки изготавливаются из фольги или серебра, нанесенных непосредственно на поверхность слюды. Большинство слюдяных конденсаторов обладают положительным ТКЕ. Применяют следующие типы слюдяных конденсаторов: КСО — конденсатор слюдяной опрессованный; КСОТ — конденсатор слюдяной опрессованный термостойкий; СГМ — слюдяной герметизированный малогабаритный.

Бумажные и пленочные конденсаторы. Обкладками бумажных и пленочных конденсаторов являются ленты из металлической фольги. Диэлектриком у бумажных конденсаторов служит специальная (конденсаторная) бумага, пропитанная изолирующими веществами (вазелином или конденсаторным маслом). Иногда для пропитки используют также специальные жидкие синтетические вещества. В пленочных конденсаторах в качестве диэлектрика применяются пленки из полистирола (стирофлекса), лавсана или фторопласта.

Среди бумажных и пленочных конденсаторов по их использованию в схемах следует отметить: БМ — бумажный малогабаритный; БМТ — бумажный малогабаритный термостойкий; К40П-1 — такой же опрессованный; К40П-2 — такой же, герметизированный; ПМ — полистирольный малогабаритный; ПСО — пленочный открытый стирофлексный; ФТ, К72П-2 — фторопластовый термостойкий.

Металлобумажные и металлопленочные конденсаторы. Эти типы конденсаторов широко применяются в радиоэлектронной аппаратуре. В качестве диэлектрика применяют конденсаторную бумагу или пленки (как в бумажных и пленочных конденсаторах). Но здесь конденсаторную бумагу с одной или с обеих сторон покрывают специальным изоляционным лаком, чтобы закрыть имеющиеся в бумаге отверстия и электропроводящие частицы. В качестве обкладок — слой металла толщиной в несколько микрометров ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$), который наносят на поверхность лака (для бумаги) или на пленку.

Следует отметить важную особенность металлобумажных и металлопленочных конденсаторов — их способность к самовосстановлению в случае пробоя диэлектрика.

Рассмотрим это явление подробнее. Пробой конденсатора обычно происходит в том месте, где толщина диэлектрика наименьшая или имеются включения электропроводящих частиц. При пробое происходит короткое замыкание, в результате которого образуется мощный тепловой импульс. Выделившееся тепло расплавляет металлический слой вокруг места пробоя, диэлектрик также оплавляється и тем самым ликвидирует место пробоя. Это явление происходит настолько быстро, что конденсатор не успевает полностью разрядиться.

Есть еще одна особенность этих конденсаторов (она вытекает из предыдущей): их нельзя применять в цепях, напряжение которых намного меньше номинального (несколько вольт и ниже), так как тепло, выделившееся при пробое, может оказаться недостаточным для самовосстановления конденсатора.

Широко используются такие разновидности конденсаторов: МБГО — металлобумажный герметизированный однослойный; МБМ — металлобумажный малогабаритный; МБГН — металлобумажный герметизированный низковольтный; МПО — металлопленочный с однослойной изоляцией; К73-5 — металлопленочный.

Керамические конденсаторы широко применяются в радиоэлектронной аппаратуре, поэтому с ними следует ознакомиться подробнее. Основными преимуществами этих конденсаторов перед другими типами являются: значительная емкость при малых размерах и работоспособность в широком диапазоне температур.

Керамический конденсатор представляет собой керамическую пластинку или трубку с обкладками из тонкого слоя металла (обычно это серебро), нанесенного на поверхность керамического диэлектрика методом «вжигания». Керамика, применяемая в этих конденсаторах, называется конденсаторной (уже встречались понятия: «конденсаторная бумага», «конденсаторное масло», значит и керамика может быть «конденсаторной»).

Конденсаторная керамика бывает высоко- и низкочастотной. Высокочастотная конденсаторная керамика характеризуется малыми диэлектрическими потерями, а емкость конденсаторов с такой керамикой при изменении температуры изменяется почти по линейному закону. Конденсаторы с диэлектриком из высокочастотной керамики разделяются на группы по ТКЕ. Каждая группа имеет буквенно-цифровое обозначение (табл. 6). Буква в обозначении указывает на знак ТКЕ: П — положительный, М — отрицательный. Число (цифры) указывают на среднее значение ТКЕ в миллионных долях на 1° С .

Если конденсатор имеет группу по ТКЕ с буквой П, это означает, что при повышении температуры (выше $+20^\circ \text{ С}$) его емкость увеличивается, а при уменьшении температуры (ниже $+20^\circ \text{ С}$) — уменьшается в соответствии с числовым значением ТКЕ и изменением температуры. Если конденсатор имеет группу по ТКЕ с буквой М, это значит, что при повышении температуры его емкость уменьшается, а при уменьшении температуры — увеличивается в соответствии с числовым значением ТКЕ и изменением температуры.

Низкочастотная керамика (сегнетокерамика) обладает большей диэлектрической проницаемостью, чем высокочастотная. Поэтому при тех же габаритах конденсаторы с диэлектриком из низкочастотной керамики обладают большей емкостью, чем конденсаторы с диэлектриком из высокочастотной керамики. Их размеры гораздо меньше, чем у бумажных, слюдяных, металлопленочных и металлобумажных конденсаторов при той же емкости и номинальном рабочем напряжении.

Емкость конденсаторов с диэлектриком из низкочастотной керамики нелинейно зависит от температуры, а кроме того, характер такой зависимости весьма разнообразен. Поэтому конденсаторы с диэлектриком из низкочастотной керамики разделяют на группы по допускаемому изменению

емкости в рабочем диапазоне температур (обычно от минус 40—60 до плюс 70—80° С). Условное обозначение этих конденсаторов состоит из буквы Н и числа, соответствующего допускаемому уменьшению емкости (в %) в рабочем диапазоне температур (табл. 7). Буква Н означает «ненормированный ТКЕ». Допускаемое увеличение емкости для групп Н70 и Н90 может быть различным и оно указывается в справочниках.

Керамические конденсаторы, кроме буквенно-цифрового обозначения групп по ТКЕ, имеют и цветовую маркировку, которая является своеобразным шифром этих обозначений. Конденсаторы с малым значением ТКЕ — синие, серые и голубые (группы П120 — М75) называются *термостабильными*, ибо их емкость мало изменяется при колебаниях температуры. Конденсаторы, окрашенные в красный и зеленый цвета, имеют большие отрицательные ТКЕ: при повышении температуры они уменьшают свою емкость. Эти конденсаторы называются *термокомпенсирующими*. Их часто используют в колебательных контурах для компенсации температурных изменений катушек индуктивности, у которых температурный коэффициент индуктивности положительный. В результате этого изменение частоты контура при изменении температуры будет незначительным.

Конденсаторы из низкочастотной керамики окрашиваются в оранжевый цвет, а некоторые их виды дополнительно маркируются цветной точкой. Существует и другой метод маркировки керамических конденсаторов по группам ТКЕ, когда цвет покрытия конденсатора может быть любой, а маркировка группы ТКЕ делается буквами и цифрами, либо двумя рядом расположенными знаками (точки или полосы), соответствующих группе цветов (табл. 6).

Конденсаторы широкого применения из высокочастотной керамики выпускаются с допускаемыми отклонениями от номинальной величины ± 5 , ± 10 и $\pm 20\%$, из низкочастотной — имеют допускаемые отклонения $^{+50}_{-20}$ и $^{+80}_{-20}\%$.

При определении номинального значения емкости керамических конденсаторов, а также допускаемых отклонений от номинала обычно у начинающих радиолюбителей возникают затруднения. Рассмотрим случаи маркировок этих параметров и методы их расшифровки.

а) На корпусе конденсатора выполнено полное обозначение номинального значения емкости и допустимого от-

клонения от номинала. Это случай наипростейший и не требует разъяснений.

б) На корпусе конденсатора выполнено кодированное обозначение параметров конденсатора. В этом случае нужно воспользоваться данными таблиц 6, 7.

в) На корпусе нанесено только кодированное обозначение номинальной емкости конденсатора. Тогда, зная группу ТКЕ (расшифровав цветную кодировку), номинальную емкость и разновидность конденсатора (по внешнему виду), пользуясь справочной литературой, можно определить допускаемое отклонение.

г) На корпусе нанесена только цветовая маркировка ТКЕ конденсатора. Это наиболее сложный случай. И здесь сначала расшифровывается группа ТКЕ, а затем определяется разновидность конденсатора.

Конденсаторы с диэлектриком из высокочастотной керамики часто называют просто *керамическими конденсаторами*, а конденсаторы с диэлектриком из низкочастотной керамики — *сегнетокерамическими*.

Наибольшее применение в радиоэлектронной аппаратуре получили следующие разновидности керамических конденсаторов:

Дисковый (КД-1, КД-2). Обкладки у таких конденсаторов наносятся на поверхность круглой керамической пластинки (похожей на диск).

Трубчатый (КТ-1 — КТ-3). Конденсатор образован керамической трубкой, на внешнюю и внутреннюю поверхность которой нанесены обкладки.

Литой секционный (КЛС-1 — КЛС-3). Основа конденсатора — керамический параллелепипед со щелями. Обкладки образуются нанесением серебра на стенки этих щелей. Затем четные обкладки соединяются вместе на одном конце корпуса конденсатора, а все нечетные — на другом.

В последние годы, в связи с развитием полупроводниковой техники, широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре получили низковольтные конденсаторы.

К группе наиболее современных керамических конденсаторов относятся следующие их виды:

К10-7В	(номинальное напряжение 50 В);
К10-17	(—»— 25 В);
К10-23	(—»— 16 В);
К10У-5	(—»— 3—50 В).

Стекланные и стеклокерамические конденсаторы также относятся к группам наиболее современных, вытесняя собой более дорогостоящие — слюдяные. Диэлектриком у стекланных конденсаторов служат тонкие стекланные пленки, обкладки их из алюминиевой фольги. Стекланные конденсаторы представляют собой секции чередующейся стеклнной пленки и алюминиевой фольги, спеченные в монолитный блок.

Стеклокерамические конденсаторы отличаются от стекланных тем, что у них в стеклнную массу добавляют керамику с высокой диэлектрической проницаемостью. Основными видами этих конденсаторов являются: К21-5, К21-7 — стеклнные конденсаторы; К22У-1, К22-5 — стеклокерамические конденсаторы.

Стекланные и стеклокерамические конденсаторы, как и керамические, делятся на группы по ТКЕ.

Электролитические и оксиднополупроводниковые конденсаторы при значительной емкости имеют малые размеры. В радиоэлектронных схемах находят самое широкое применение. Диэлектриком в таких конденсаторах является оксидный слой (слой окиси) на металле. Одной обкладкой является металл, на котором образован оксидный слой, другой — электролит (в электролитических конденсаторах) либо слой полупроводника (в оксиднополупроводниковых). Оксидная пленка обладает односторонней проводимостью, поэтому при монтаже необходимо соблюдать полярность включения электролитических и оксиднополупроводниковых конденсаторов. Если это условие не соблюдать, оксидный слой теряет свои диэлектрические свойства, и конденсатор выходит из строя.

В настоящее время выпускаются и неполярные конденсаторы, которые могут работать и в цепях переменного тока.

Среди электролитических конденсаторов наибольшее распространение получили «сухие» электролитические конденсаторы. Плюсовой обкладкой у них является лента из алюминиевой фольги, на одну из сторон которой наносится оксидный слой. Другой обкладкой (минусовой) служит специальная пористая бумага, пропитанная вязким («сухим») электролитом. Электрический контакт с пропитанной бумагой лентой осуществляется с помощью второй алюминиевой неоксидированной ленты.

У другого вида электролитических конденсаторов плюсовая обкладка выполнена в виде цилиндра, спрессованного

из мелких зерен тантала, которые спекаются при высокой температуре в вакууме. Полученная таким образом поверхность этой обкладки из-за пористой структуры оказывается в 50—100 раз больше, чем геометрическая поверхность цилиндра, что позволяет при небольших размерах этих конденсаторов получать большие емкости. Корпус конденсатора заполняется жидким кислотным электролитом, который и является минусовой обкладкой конденсатора, а выводом обкладки является сам корпус. Диэлектриком в конденсаторе является оксидная пленка на поверхности зерен, из которых образован цилиндр. К зернам сквозь поры проникает электролит.

Из большого количества различных видов электролитических и оксиднополупроводниковых конденсаторов чаще применяются следующие: К50-3, К50-3А, К50-3Б — электролитические алюминиевые; К50-6 — электролитический алюминиевый; ЭТО, К52 — электролитические танталовые объемнопористые; К53-1А, К53-6А — оксиднополупроводниковые; К53-4 — оксиднополупроводниковый ниобиевый; КОПП — оксиднополупроводниковый для печатного монтажа.

Конденсаторы переменной емкости. В зависимости от применяемого диэлектрика различают конденсаторы с воздушным и твердым диэлектриками. Конденсатор представляет собой две системы параллельных пластин, одна из которых может перемещаться относительно другой. Неподвижная система пластин называется статором, а подвижная — ротором. При изменении взаимного положения ротора и статора меняется емкость конденсаторов. В радиовещательных приемниках для плавной настройки резонансных контуров в заданном диапазоне частот используются конденсаторы переменной емкости с воздушным диэлектриком. При этом часто используются целые блоки, которые объединяют общей конструкцией два или более конденсаторов. Все роторы собираются на одной оси, и поворот этой оси одновременно изменяет емкости всех конденсаторов блока.

Подстроечные конденсаторы являются разновидностью конденсаторов переменной емкости, но с меньшим диапазоном изменения емкости. Наибольшее распространение получили подстроечные конденсаторы типа КПК (конденсаторы подстроечные керамические). Конструктивно такой конденсатор состоит из двух керамических частей: непо-

движного статора и подвижного диска — ротора. Обкладками служат металлизированные участки ротора и статора. Диэлектриком между обкладками являются керамический материал ротора. Обкладки имеют выводы в виде контактных лепестков.

Основные виды КПК, которые находят широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре, следующие: КПК-1, КПК-2, КПК-3, КПК-М.

Маркировка конденсаторов. На корпусе конденсатора указаны номинальное значение емкости и допустимое отклонение от номинального значения. В зависимости от размеров конденсаторов применяются полные или сокращенные (кодированные) обозначения.

Полное обозначение конденсатора состоит из: а) цифр, обозначающих номинальное значение емкости; б) букв, обозначающих единицу емкости; емкости конденсаторов от 1 до 9999 пФ указывают числом без обозначения единицы емкости, а емкости от 10 000 пФ и более выражают в микрофарадах; в) цифр, обозначающих допустимое отклонение от номинального значения в процентах.

Если конденсаторы какого-либо типа выпускаются с одним допускаемым отклонением или их емкость измеряется только в микрофарадах, то соответствующие буквы и цифры в обозначение могут и не включаться (в основном это касается обозначения электролитических конденсаторов).

Кодированное обозначение, предназначенное для маркировки малогабаритных конденсаторов, состоит из: а) цифр, обозначающих номинальное значение емкости; б) буквы, обозначающей единицу емкости и указывающей положение запятой десятичной дроби; в) буквы, обозначающей допустимое отклонение емкости от номинального значения.

Пример кодированного обозначения номинальной емкости 1,2 мкФ с допускаемым отклонением $\pm 10\%$: 1М2С. Обозначения номинальных значений и единиц емкостей приведена в табл. 3, а кодировка допускаемых отклонений — в табл. 5.

Обозначение конденсаторов в схемах и технической документации. В схемах рядом с условным графическим обозначением конденсатора указывается его условное буквенно-цифровое позиционное обозначение, состоящее из буквы С и числа, обозначающего порядковый номер конденсатора по схеме, и здесь же проставляется значение емкости.

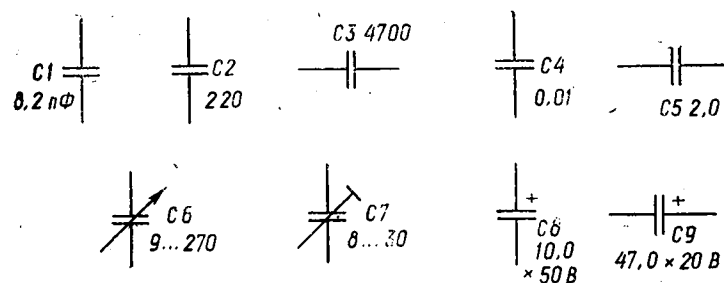


Рис. 6. Обозначение конденсаторов в схемах.

Согласно ГОСТу емкость конденсаторов от 1 до 9999 пФ дана целым числом пикофарад без обозначения единицы емкости (C2, C3, C6, C7 — рис. 6). Исключение составляет обозначение конденсаторов, если их емкость выражена дробным десятичным числом (C1 — рис. 6). Это встречается, когда используются конденсаторы с малыми емкостями (менее 10 пФ), чтобы не перепутать пикофарады с микрофарадами.

Емкость конденсаторов от 0,01 мкФ (10 000 пФ) и более указывают в микрофарадах также без обозначения единиц емкости. При этом емкость записывают либо в виде десятичной дроби, либо в виде целого числа с нулем через запятую (C4, C5 — рис. 6). При обозначении конденсаторов переменной емкости и подстроечных указываются оба предела изменения емкости (C6, C7 — рис. 6).

Электролитические конденсаторы (полярные) включаются в электрическую цепь с обязательным соблюдением полярности. Для этого на схеме возле черточки, которая обозначает положительную обкладку электролитического конденсатора, ставят знак «+» (C8, C9 — рис. 6). Кроме того, на схемах рядом с номинальным значением емкости электролитического конденсатора через знак «X» указывается также и его номинальное напряжение.

Соединение конденсаторов. При параллельном соединении конденсаторов (рис. 7, б) общая емкость равна сумме емкостей: $C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$. При

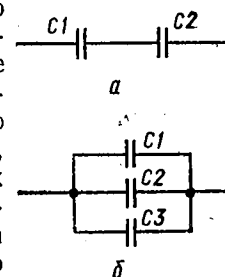


Рис. 7. Соединение конденсаторов: а — последовательное; б — параллельное.

последовательном соединении конденсаторов (рис. 7, а) общая емкость вычисляется по более сложной формуле:

$$C_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}.$$

3. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы

Основным параметром, характеризующим свойства катушек индуктивности и дросселей, является индуктивность, как у резисторов — сопротивление, а у конденсаторов — емкость.

Индуктивность катушки зависит от ее размеров и формы, количества витков и магнитной проницаемости среды и измеряется в генри (Гн), миллигенри (мГн), микрогенри (мкГн):

$$1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}; 1 \text{ мкГн} = 10^{-3} \text{ мГн} = 10^{-6} \text{ Гн}.$$

Катушки индуктивности. В зависимости от назначения катушки индуктивности делятся на контурные (совместно с конденсаторами они образуют колебательные контуры) и катушки связи (здесь они способствуют передаче высокочастотных колебаний из одной цепи в другую).

К основным параметрам катушки, кроме индуктивности, относятся также добротность, температурный коэффициент индуктивности (ТКИ) и собственная емкость катушки.

Добротность Q_L характеризует потери энергии в катушке и определяется отношением ее индуктивного сопротивления к активному сопротивлению: $Q_L = \omega L/R$. Чем больше значение добротности, тем качественней считается катушка.

Температурный коэффициент индуктивности (ТКИ) характеризует относительное изменение индуктивности катушки при изменении температуры окружающей среды на 1°C . ТКИ имеет положительное значение и для его компенсации в контурах применяют конденсаторы с отрицательным ТКЕ.

Собственная емкость катушки возникает из-за близкого расположения витков обмотки. Действие собственной емкости аналогично подключению конденсатора параллельно к катушке, что в большинстве случаев нежелательно.

Обмотки катушек наматываются в один или несколько слоев. Однослойные катушки (индуктивностью до 100 мкГн) используются обычно на частотах свыше 1,5—2 МГц. Индуктивность однослойной цилиндрической катушки (если не требуется высокая точность) можно определить по формуле: $L = 6D \cdot \omega^2 \cdot 10^{-4}$ мкГн, где D — диаметр намотки, мм; ω — количество витков.

Катушки, применяемые на более низких частотах (индуктивностью более 100 мкГн), в основном имеют многослойную обмотку. Многослойные катушки наматывают специальными методами (например, универсальная намотка). Радиолюбители наматывают катушку произвольно (намотка внавал). Индуктивность многослойной цилиндрической катушки определяется по формуле: $L = D_{\text{мин}} \cdot \omega^2 \times 10^{-4}$ мкГн, где $D_{\text{мин}}$ — минимальный диаметр намотки, мм; ω — количество витков.

Каркасы катушек изготавливают из радиофарфора, полистирола или гетинакса, а иногда пользуются и бескаркасными катушками.

Для намотки катушек индуктивности используют медные провода таких марок: ПЭВ-1 — провод, покрытый высокопрочной эмалью в один слой; ПЭВ-2 — то же, в два слоя; ПЭЛ — провод, покрытый лаковой эмалью; ПЭЛШО — то же и слоем шелковой изоляции; ЛЭШО (литцендрат) — провод, покрытый лаковой эмалью и одним слоем шелковой изоляции.

Литцендраты — это высокочастотные обмоточные провода, состоящие из пучка эмалированных проволок диаметром 0,05; 0,07; 0,1 или 0,2 мм. Например, марка ЛЭШО $7 \times 0,07$ означает, что этот провод состоит из семи проволок диаметром 0,07 мм.

При последовательном соединении катушек, общая индуктивность равна сумме всех индуктивностей: $L_{\text{общ}} = L_1 + L_2 + \dots + L_n$.

При параллельном:

$$L_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}}.$$

При введении в катушку сердечника из ферромагнитного материала ее индуктивность увеличивается. Это обстоятельство позволяет изготавливать катушки большой индуктивности, но небольших размеров. Кроме того, увеличивается добротность катушек, а также появляется воз-

возможность плавно изменять индуктивность катушки введением и выводением сердечника.

Рассмотрим вкратце основные величины, характеризующие магнитное поле, и особенности ферромагнитных материалов.

В природе существует единое *электромагнитное поле*. Но с точки зрения технического применения электромагнитных явлений удобно отдельно рассматривать проявление электрического и магнитного полей. Поэтому, говоря о магнитном поле, мы не рассматриваем существующее электрическое поле, которое всегда есть, хотя может быть очень слабым.

Магнитное поле создается постоянными магнитами и проводниками, по которым проходит электрический ток. В пространстве оно обнаруживается своим воздействием на движущиеся заряженные частицы, магниты, проводники с током и другими явлениями. Графически магнитное поле принято изображать с помощью силовых линий (линии действия магнитных сил).

Магнитное поле характеризуется напряженностью, магнитным потоком и магнитной индукцией.

Напряженностью магнитного поля H называют интенсивность магнитного поля в данной точке пространства. *Магнитным потоком Φ* через данную поверхность S называют общее количество магнитных силовых линий, пронизывающих эту поверхность. *Магнитной индукцией B* называют интенсивность результирующего магнитного поля в данном веществе.

Магнитные свойства различных материалов характеризуются магнитной проницаемостью. *Магнитная проницаемость μ* — величина, показывающая, во сколько раз магнитная индукция в данном веществе больше (или меньше) напряженности внешнего поля. Магнитная проницаемость вакуума равна единице; для воздуха $\mu \approx 1$.

Вещества, у которых магнитная проницаемость несколько больше единицы ($\mu > 1$), называют *парамагнитными*. К ним относятся алюминий, платина и др. Вещества, у которых магнитная проницаемость меньше единицы ($\mu < 1$), называют *диамагнитными*. Это медь, висмут и др. Вещества, магнитная проницаемость которых во много раз больше единицы ($\mu \gg 1$), называют *ферромагнитными*.

Ферромагнитные материалы делятся на магнитно-твердые и магнитно-мягкие материалы. Если на магнитно-твер-

дый материал воздействовать внешним магнитным полем, то он намагничивается. Если даже устранить внешнее магнитное поле, материал все равно остается намагниченным. К магнитно-твердым материалам относятся некоторые углеродистые стали, вольфрамовая, хромистая и кобальтовая стали, а также сплавы альни (алюминий, никель), альниси (алюминий, никель, кремний), альнико (алюминий, никель, кобальт) и др. Из них изготавливают постоянные магниты.

Для магнитно-мягких материалов характерна высокая магнитная проницаемость. Если на них воздействовать внешним магнитным полем, они тоже намагничиваются, но как только внешнее поле исчезает, магнитно-мягкие материалы тут же размагничиваются. К магнитно-мягким материалам относятся: техническое железо, железоникелевые сплавы (пермаллой), электротехнические стали, магнитодиэлектрики, ферриты. Для сердечников катушек используют магнитоэлектрики (карбонильное железо, сплав альсифер), ферриты.

Магнитодиэлектрики — это материалы, обладающие малой электрической проводимостью и большой магнитной проницаемостью, например, спрессованная под большим давлением смесь мелких частиц какого-либо ферромагнитного материала с веществом (лаком или пластмассой), которое электрически изолирует частицы друг от друга, а механически связывает их. Из-за малой электропроводимости потери на вихревые токи (токи, образующиеся в массивных проводниках) невелики даже при высоких частотах.

Особое внимание в последние годы уделяется разработке и созданию оксидных ферромагнетиков (оксиферов) или, как их теперь называют, — ферритов. *Ферриты* изготавливают на основе окиси-закиси железа ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), в которой двухвалентные атомы железа замещаются атомами других металлов, при этом значительно возрастает магнитная проницаемость и сопротивление нового магнитного материала. Свойства ферритов зависят от вида металла, замещающего двухвалентное железо. Наиболее интересны для такой замены атомы таких металлов: марганца, цинка, никеля, кобальта, бария. В соответствии с названием металла, замещающего двухвалентное железо, феррит называется никелевым, цинковым и т. д.

В обозначении ферритов, предназначенных для работы на низких частотах, принято кодирование, которое расшифровывается следующим образом: 1) цифры перед буквами

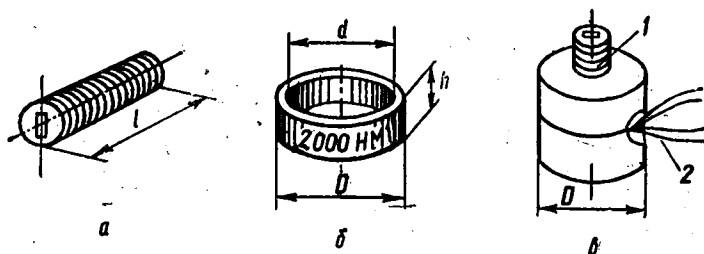


Рис. 8. Сердечники катушек индуктивности:
а — цилиндрический сердечник с резьбой; б — кольцевой сердечник; в — броневой сердечник; 1 — подстроечник; 2 — выводы катушки.

характеризуют начальную магнитную проницаемость феррита; 2) первая буква означает, что материал низкочастотный; 3) вторая буква указывает на материал феррита; 4) цифра после букв (если она есть) указывает на особые свойства материала.

Примеры: а) феррит марки 600НН означает: 600 — начальная магнитная проницаемость, Н — низкочастотный, Н — никель-цинковый материал; б) феррит марки 1500 НМ: 1500 — начальная магнитная проницаемость; Н — низкочастотный, М — марганец-цинковый материал.

Кодирование ферритов, предназначенных для работы на высоких частотах, несколько иное. Пример: феррит марки 150 ВЧ: 150 — начальная магнитная проницаемость, ВЧ — высокочастотный, никель-цинковый материал (в обозначении высокочастотных ферритов материал не обозначается, а определяется по справочным данным).

Из магнитоэлектриков и ферритов промышленность выпускает *сердечники* различной конфигурации и размеров. Наиболее широкое применение для катушек индуктивности нашли цилиндрические, кольцевые и броневые сердечники (рис. 8).

Цилиндрические сердечники изготавливаются из карбонильного железа и ферритов. Чаще всего применяются сердечники типа СЦР (сердечник цилиндрический с резьбой) и СЦГ (сердечник цилиндрический гладкий). Перемещение цилиндрического сердечника внутри катушки позволяет изменять ее индуктивность примерно на 50%.

В радиолюбительской практике применяются *броневые сердечники*. Броневой сердечник состоит из двух чашек (нижней и верхней), внутри которых помещается каркас

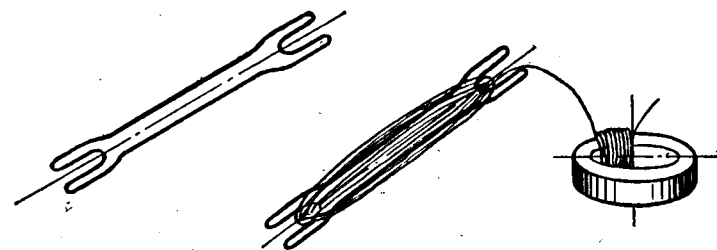


Рис. 9. Вариант выполнения обмотки на кольцевом сердечнике с помощью челнока.

с обмоткой. Обмотка обычно наматывается внавал. Для изменения индуктивности катушки в верхней чашке находится подстроечный сердечник. Броневой сердечник представляет собой магнитный экран, который препятствует рассеянию магнитного потока катушки, и тем самым устраняется влияние на соседние катушки. Катушки индуктивности с броневыми сердечниками обычно используют в тех случаях, когда в радиоэлектронном устройстве имеется несколько катушек индуктивности. Броневые сердечники как раз и используют, чтобы устранить паразитные связи, то есть влияние каждой катушки на соседние.

Броневые сердечники изготавливаются из карбонильного железа и ферритов. Наибольшей популярностью у радиолюбителей пользуются сердечники из карбонильного железа.

Кольцевые (тороидальные) сердечники применяются для катушек в тех случаях, когда нужно при небольших размерах катушки получить большую индуктивность. Эти сердечники изготавливаются из альсиферов и ферритов. Затруднения вызывает намотка провода на тороидальный сердечник. Часто для этой цели используют челнок (рис. 9), который делается из листового дюралюминия, тонкой фанеры или же просто из толстого медного провода. На челнок наматывается провод, длина которого должна быть достаточной для выполнения обмотки катушки. Затем, пропуская челнок с проводом через середину кольца, наматывают обмотку катушки.

Обозначение катушек индуктивности в схемах. В схемах буквенно-цифровое обозначение катушек индуктивности состоит из буквы L и порядкового номера в пределах схемы (рис. 10, а).

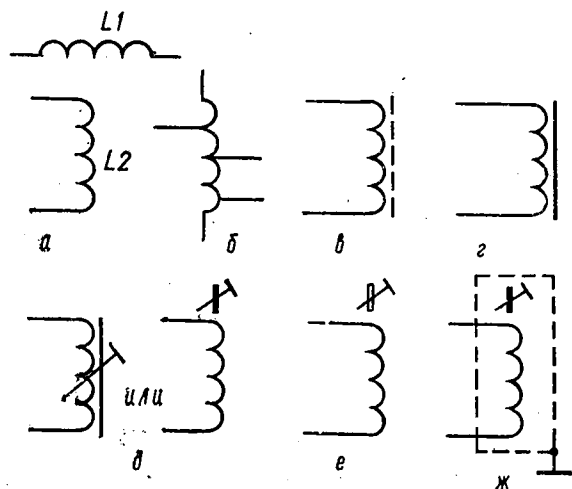


Рис. 10. Условные графические обозначения катушек индуктивности:

a — катушка индуктивности без сердечника; *б* — катушка индуктивности с отводами; *в* — катушка индуктивности с магнитодиэлектрическим сердечником; *г* — катушка индуктивности с ферритовым сердечником; *д* — катушка индуктивности с ферромагнитным подстроечным сердечником; *е* — катушка индуктивности с подстроечным сердечником из немагнитного материала; *ж* — катушка индуктивности в экране, соединенном с общим приводом (корпусом) устройства.

Дроссели — это катушки индуктивности, включаемые в цепь для увеличения сопротивления переменному току. Условное графическое и буквенно-цифровое обозначение дросселей такое же, как и катушек индуктивности (рис. 10).

В зависимости от назначения, дроссели делятся на высокочастотные и низкочастотные. Дроссель оказывает сопротивление переменному току за счет своего индуктивного сопротивления $X_L = 2\pi fL$, где f — частота переменного тока; L — индуктивность дросселя.

Из формулы видно: чтобы получить одно и то же значение индуктивного сопротивления, индуктивность дросселя на высоких частотах должна быть значительно меньше, чем на низких. В свою очередь, индуктивность зависит от магнитной проницаемости сердечника и количества витков обмотки. Все это и вносит различия в конструктивное выполнение высокочастотных и низкочастотных дросселей.

Трансформаторы (рис. 11) так же, как дроссели и катушки индуктивности, относятся к намоточным изделиям, но имеют другое назначение. Они предназначены для преобразования электрической энергии переменного тока с одними параметрами в электрическую энергию переменного тока, имеющую иные параметры. В первую очередь, к параметрам относятся напряжение и ток.

Буквенно-цифровое позиционное обозначение трансформатора состоит из буквы *T* и порядкового номера в пределах схемы.

Минимальное количество обмоток у трансформатора — две, причем одна из них *первичная*, другая — *вторичная*. К первой подводится сигнал (напряжение), который надо трансформировать, а со второй снимается уже преобразованный сигнал (напряжение). В зависимости от назначения трансформатора, вторичных обмоток может быть одна, две, три и т. д. Если нужно на схеме показать начало обмотки, возле её соответствующего вывода ставится точка.

В зависимости от частотного диапазона, в котором должны работать трансформаторы, их делят на *высокочастотные* и *низкочастотные*. Сердечники высокочастотных трансформаторов выполняются из магнитодиэлектриков или

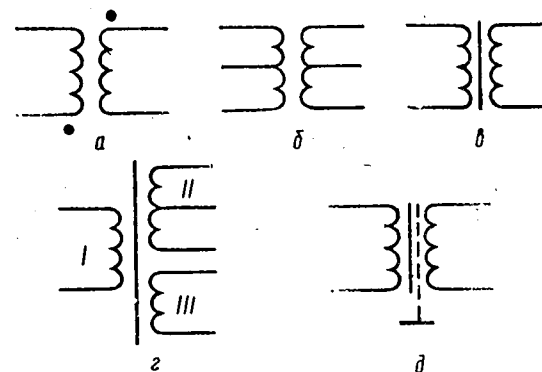


Рис. 11. Условные графические обозначения трансформаторов:

a — без сердечника, связь между обмотками постоянная (точка указывает начало обмотки); *б* — без сердечника с отводами от обмоток; *в* — двухобмоточный с ферромагнитным сердечником, в том числе с ферритовым; *г* — трехобмоточный с отводом в обмотке II; *д* — с ферромагнитным сердечником и с экраном между обмотками, соединенным с корпусом

ферритов, иногда — без сердечников. Магнитопроводы трансформаторов низкой частоты изготавливаются из электротехнических сталей или из железоникелевых сплавов. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы навивают из полос или набирают из штампованных пластин. Последние изготовляют обычно Ш- или Г-образной формы (рис. 12).

Обмотки трансформаторов изготовляют из медного провода с эмалевой, хлопчатобумажной или шелковой изоляцией. Чаше применяют провода марок ПЭВ-1, ПЭВ-2 и ПЭЛШО. Обмотки обычно наматывают на каркасы, которые изготавливаются из гетинакса, текстолита, прессшпана или электрокартона.

В последнее время очень распространены тороидальные магнитопроводы, изготавливаемые из тонких полос электротехнической стали или пермаллоя. Часто используются тороидальные магнитопроводы из ферритов. Тороидальные магнитопроводы обладают следующими преимуществами: меньшими габаритами, меньшими помехами на соседние схемные элементы.

Рассмотрим основные типы магнитопроводов и их кодировку.

Магнитопровод типа Ш12 × 20: буква Ш обозначает, что магнитопровод Ш-образный и выполнен из штампованных пластин или феррита. Первое число указывает на ширину (a) среднего стержня магнитопровода, второе — на толщину (c) набора пластин (или на толщину феррита).

Магнитопровод ШЛ8 × 10: это также Ш-образный магнитопровод, но выполненный из металлической ленты. Числа соответствуют размерам, названным в предыдущем примере.

Магнитопровод ОЛ 20/32 10: обозначение относится к тороидальным магнитопроводам. Первое число указывает

на внутренний диаметр (d), второе — на внешний диаметр (D) кольца и третье — на высоту кольца (h).

Магнитопровод К28 × 16 × 6. Это обозначение относится к тороидальным ферритовым магнитопроводам. Буква К означает, что магнитопровод кольцевой формы. Первое число указывает на внешний диаметр (D) кольца, второе — на внутренний (d) и третье — на высоту кольца (h).

Все размеры по магнитопроводам дают в миллиметрах.

По своему назначению трансформаторы делятся на входные, междукаскадные, выходные и трансформаторы источников питания.

4. Полупроводники, образование $p-n$ перехода, полупроводниковые диоды

По способности проводить электрический ток твердые тела первоначально разделяют на проводники и изоляторы (диэлектрики). Это довольно приблизительное разделение. Позже было замечено, что некоторые вещества проводят ток хуже, чем проводники, но и к диэлектрикам их тоже нельзя было отнести. Поэтому эти вещества были выделены в специальную группу полупроводников. Это название подчеркивало то, что данные вещества являются плохими проводниками, хотя дальнейшие исследования показали, что по своей структуре и свойствам полупроводники гораздо ближе к диэлектрикам, чем к проводникам, но было решено сохранить их прежнее название.

Какие же характерные особенности отличают полупроводники от проводников? Это: значительная зависимость проводимости полупроводников от температуры; сильное влияние на проводимость полупроводников даже незначительного количества примесей; влияние на их проводимость различных излучений (световых, радиационных и др.). По этим особенностям полупроводники ближе к диэлектрикам, чем к проводникам.

Полупроводниковых веществ очень много, но для производства полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и т. д.) используются в основном германий, кремний и арсенид галлия.

Германий является редким элементом, рассеянным в природе. Кремний же, наоборот, очень распространен в природе. Однако, встречается не в чистом виде, а только в виде соединений с другими элементами, в основ-

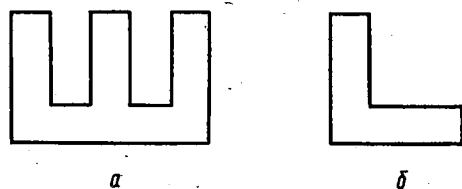


Рис. 12. Типы трансформаторных пластин:
а — Ш-образная пластина; б — Г-образная пластина.

ном с кислородом. Получить кремний в чистом виде очень трудно, поэтому многие полупроводниковые приборы вначале изготавливали из германия, и лишь в последние годы кремний стали применять в новых разработках.

Арсенид галлия — это соединение мышьяка с галлием. Его начали применять сравнительно недавно. По сравнению с германием и кремнием, арсенид галлия меньше подвержен воздействию температуры и радиации, поэтому для изготовления некоторых приборов он просто незаменим. Из арсенида галлия изготавливают в настоящее время туннельные диоды, некоторые типы транзисторов и т. д.

Для того чтобы понять механизм работы полупроводниковых приборов, нужно сначала ознакомиться с проводимостью в полупроводниках и с механизмом образования $p-n$ переходов.

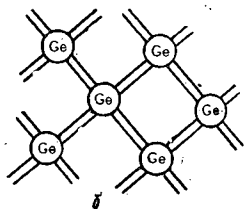
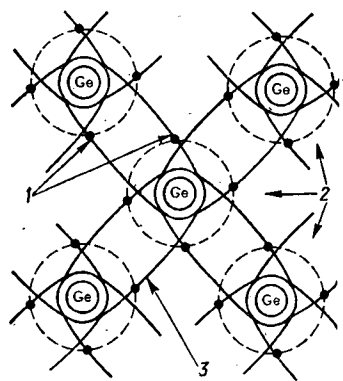


Рис. 13. Образование парноэлектронных связей в кристалле (два способа изображения):

1 — парные электроны; 2 — нейтральные атомы кристалла; 3 — общая орбита парных валентных электронов.

Как известно, атом любого вещества состоит из положительно заряженного атомного ядра и электронов, вращающихся вокруг него по определенным орбитам (электроны являются носителями отрицательного заряда). Орбиты электронов удалены от атомного ядра на различные расстояния и группируются в оболочки. Электроны, находящиеся на внешней оболочке, слабее связаны с атомным ядром, чем электроны, которые находятся на внутренних оболочках. Они наиболее активны и их называют валентными электронами. Именно взаимодействие валентных электронов обеспечивает соединение атомов в молекулы или в кристаллическую решетку.

Наиболее широко используемые полупроводники — германий и кремний — относятся к

IV группе периодической системы элементов Менделеева. На внешней оболочке атома германия (или кремния) находится четыре валентных электрона. Каждый из них образует с соседними четырьмя атомами парноэлектронные (ковалентные или атомные) связи. Последние образуются двумя электронами, каждый из которых при-

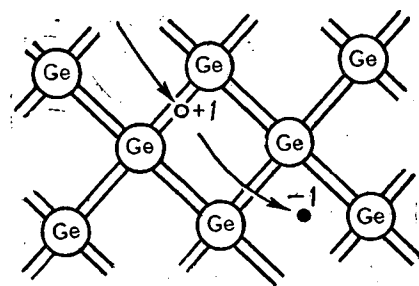


Рис. 14. Разрыв парноэлектронной связи, образование свободного электрона (-1) и дырки ($+1$).

надлежит одному из соседних атомов (рис. 13). Парноэлектронные связи — очень устойчивы, поэтому каждая электронная пара прочно связана со своей атомной парой и не может свободно перемещаться в объеме полупроводника. Поскольку все валентные электроны образуют такие связи, то в полупроводнике не должно быть свободных носителей заряда. И действительно, в химически чистом полупроводнике, находящемся при температуре, близкой к 0°K (абсолютный ноль), все валентные электроны связаны парноэлектронно и свободных электронов нет. При выполнении таких условий полупроводник ведет себя как диэлектрик.

Когда температура повышается, атомы полупроводника начинают совершать тепловое колебательное движение (при 0°K они были неподвижны). При этом энергия этого движения передается электронам, и для некоторых из них она становится достаточной для того, чтобы оторваться от своих атомов. Эти атомы превращаются в положительные ионы, а оторвавшиеся электроны могут свободно перемещаться, то есть становятся носителями тока.

Если говорить точнее, уход электрона приводит к частичной ионизации двух соседних атомов. Появляющийся при этом единичный положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона, следует относить не к тому или иному атому, а к нарушенной парноэлектронной связи, оставленной электроном. Отсутствие электрона в связи называется дыркой (рис. 14). Следовательно, дырка имеет положительный заряд, равный по абсолютной вели-

чине заряду электрона. Дырка может быть занята одним из электронов соседней связи, который при этом нейтрализует положительный заряд атома. Но тогда она образуется в соседней связи. Переход электронов из одной связи в другую соответствует перемещению дырки в обратном направлении, то есть движение дырки — это поочередная ионизация неподвижных атомов, а истинными носителями тока являются электроны. Однако практически гораздо удобнее рассматривать непрерывное движение положительного заряда, чем поочередные перемещения электронов из связи в связь.

Таким образом, нарушение парноэлектронной связи за счет тепловой энергии приводит к появлению в кристалле двух свободных носителей заряда: отрицательного — электрона и противоположного ему по знаку положительного — дырки. Проводимость, которая возникает в объеме полупроводника за счет нарушения связей, называется *собственной проводимостью*. В полупроводниках различают два типа проводимости: *n*-типа и *p*-типа. Проводимость *n*-типа (по знаку зарядов, от латинского negative — отрицательный) называется *электронной*, а *p*-типа (от латинского positive — положительный) — *дырочной*.

Отметим также, что нарушение валентных связей может происходить не только за счет тепловой энергии, но и за счет световой или энергии электрического поля.

То, что мы рассмотрели, относится к так называемым чистым полупроводникам без примесей. Введение же примесей может изменить его электрические свойства. Атомы примесей в кристаллической решетке занимают места атомов основного вещества и образуют парноэлектронные связи с соседними атомами.

Если в структуру чистого полупроводника (например, германия) ввести атом вещества, относящегося к V группе периодической системы элементов (например, атом мышьяка), этот атом также будет образовывать связи с соседними атомами германия. Но атомы V группы имеют на внешней оболочке пять валентных электронов. Четыре из них образуют устойчивые парноэлектронные связи, а пятый — оказывается лишним, так как все валентные электроны соседних атомов уже образовали связи. Этот избыточный электрон оказывается связанным со своим атомом намного слабее и, чтобы оторвать его от атома (превратив в свободный электрон), требуется меньше энергии, чем для освобождения

электрона из парноэлектронной связи. Кроме того, превращение такого примесного электрона в свободный носитель заряда не связано с одновременным образованием дырки. Уход электрона с внешней оболочки атома мышьяка превращает этот атом в положительный ион. Тогда уже можно говорить об ионизации данного атома. Этот положительный заряд не будет перемещаться, то есть, он не является дыркой. При увеличении содержания мышьяка в кристалле германия увеличивается количество свободных электронов без увеличения количества дырок, как это имело место при собственной проводимости. Если концентрация электронов значительно превосходит концентрацию дырок, ток в основном будет образован электронами, то есть основными носителями будут электроны. В этом случае полупроводник называют полупроводником *n*-типа.

Теперь введем в кристалл германия атом III группы периодической системы элементов, например атом индия. На внешней оболочке этого атома находятся три валентных электрона. В кристаллической решетке германия внесенный атом образует устойчивые парноэлектронные связи лишь с тремя соседними атомами германия. Четвертая связь оказывается незаполненной, но не несет в себе заряда. Поэтому атом индия и смежный с ним атом германия остаются электрически нейтральными. Но уже при небольшом тепловом возбуждении электрон одной из соседних парноэлектронных связей может перейти в эту четвертую связь. Что при этом произойдет? Во-первых, во внешней оболочке индия появится лишний электрон и атом индия, потеряв электрическую нейтральность, превращается в отрицательный ион. Во-вторых, нарушится электрическая нейтральность в той парноэлектронной связи, откуда пришел электрон. В этой нарушенной связи появится положительный заряд — дырка (этот случай мы уже рассматривали выше).

При увеличении содержания индия в кристалле германия будет увеличиваться количество дырок без увеличения количества свободных электронов. Если концентрация дырок превосходит концентрацию свободных электронов, ток в основном будет определяться дырками. Последние станут основными носителями зарядов, а электроны — неосновными. Полупроводник в этом случае называется полупроводником *p*-типа.

Рассмотрев процессы, которые происходят в кристалле полупроводника (германия или кремния) при введении в не-

го трех- или пентавалентных примесей, мы подошли к вопросу образования $p-n$ перехода в полупроводнике.

Электронно-дырочным переходом (сокращенно $p-n$ переходом) называют область, находящуюся на границе раздела между дырочной и электронной областями одного кристалла. Переход создается не простым соприкосновением полупроводниковых пластин p - и n -типа. Он создается в едином кристалле полупроводника введением двух различных примесей, создающих в нем электронную и дырочную области.

Рассмотрим полупроводник, в котором имеются две области — электронная и дырочная. Свободные носители зарядов в полупроводнике все время в состоянии теплового хаотического движения — электроны и дырки движутся в самых различных направлениях. Но это характерно для однородных полупроводников. Здесь речь идет о неоднородном полупроводнике, состоящем из n - и p -областей (рис. 15, а). В первой — высокая концентрация электронов, а во второй — высокая концентрация дырок. Согласно закону выравнивания концентрации электроны стремятся перейти (диффундировать) из n -области, где их концентрация выше,

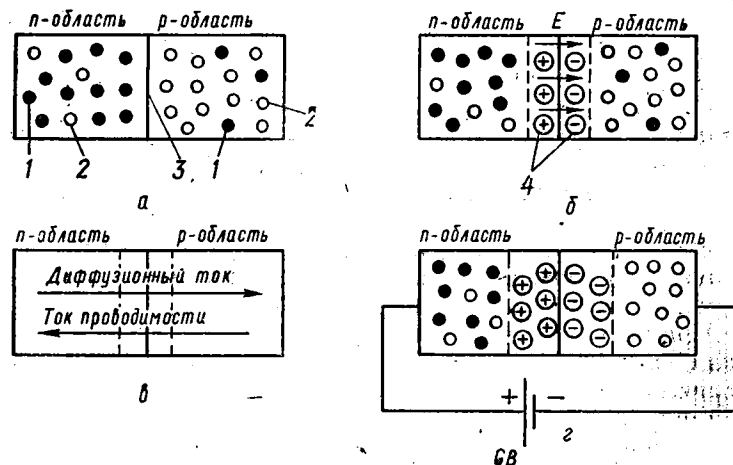


Рис. 15. Механизм образования и действия $p-n$ перехода:

а — основные и неосновные носители в областях полупроводника; б — образование $p-n$ перехода; в — направление протекания диффузионного тока и тока проводимости; г — $p-n$ переход под действием внешнего обратного напряжения; 1 — электроны; 2 — дырки; 3 — граница раздела; 4 — неподвижные ионы.

в p -область; дырки же, наоборот, будут перемещаться из p -области в n -область, где их концентрация меньше.

Такое перемещение зарядов называется *диффузией*, а ток, который при этом возникает, *диффузионным*. Выравнивание концентрации дырок и электронов происходило бы до тех пор, пока в объеме полупроводника они не распределились равномерно. И это так бы и случилось, если бы не появилась сила, препятствующая такому выравниванию. Причиной, ограничивающей диффузионное распространение зарядов, являются силы возникающего внутреннего электрического поля.

Свободные заряды (электроны и дырки), переходя через границу раздела областей, оставляют после себя неподвижные ионизированные атомы, жестко связанные с кристаллической решеткой. Дырки, уходящие из p -области, оставляют в ней отрицательно ионизированные атомы, а электроны, уходящие из n -области, оставляют после себя положительно ионизированные атомы. В результате дырочная область становится заряженной отрицательно, а электронная — положительно. Между областями возникает электрическое поле, созданное двумя слоями зарядов (рис. 15, б). Таким образом, вблизи границы раздела электронной и дырочной областей полупроводника возникает область, состоящая из двух слоев противоположных по знаку неподвижных зарядов, которые образуют так называемый $p-n$ переход. Считают, что между p - и n -областями устанавливается *потенциальный барьер*.

Прежде чем рассматривать поведение носителей зарядов в полупроводнике, состоящем из p - и n -областей, следует остановиться на вопросе о воздействии электрического поля на подвижные носители заряда, которые при своем движении попадают в него.

Электрическое поле изображается силовыми линиями, направленными от положительных зарядов к отрицательным. Как электрическое поле воздействует на попавшие в него подвижные электроны и дырки? Если направление движения электронов, попавших в электрическое поле, совпадает с направлением силовых линий, электроны будут тормозиться полем. Если же направление движения электронов, попавших в поле, противоположно их направлению, электроны будут ускоряться.

Действие электрического поля на дырки будет обратным: оно тормозит дырки, попавшие в него, если направле-

ние их движения противоположно направлению поля. Если же направление движения дырок и направление поля совпадают, то они будут им ускоряться.

В рассматриваемом случае внутри образованного $p-n$ перехода действует электрическое поле E , созданное двумя слоями противоположных зарядов. Это поле и является той силой, которая препятствует дальнейшей диффузии электронов и дырок. И теперь любой электрон, проходящий из электронной области в дырочную, встречает на своем пути электрическое поле, которое препятствует его движению и стремится вернуть электрон обратно в электронную область. Только отдельные электроны, обладающие достаточно высокой энергией, способны преодолеть действие сил электрического поля $p-n$ перехода и проникнуть в дырочную область. По той же причине дырки, обладающие высокой энергией, способны преодолеть действие сил электрического поля $p-n$ перехода и проникнуть в электронную область. Уход этих носителей электрического заряда приведет к образованию дополнительных неподвижных ионов, то есть к повышению потенциального барьера и тогда еще меньшее количество основных носителей будут способны преодолеть действие сил внутреннего электрического поля $p-n$ перехода.

Из рис. 15, а видно, что в p -области и в n -области находятся как основные носители заряда (они образуются за счет введения примесей), так и неосновные: в n -области это дырки, а в p -области — электроны. Неосновные носители образуются за счет собственной проводимости, механизм образования которой рассматривался выше.

Электроны p -области, совершая тепловое хаотическое движение, попадают в электрическое поле $p-n$ перехода, увлекаются и переносятся им через переход в n -область. То же самое происходит с дырками n -области, которые, совершая тепловое хаотическое движение, попадают в электрическое поле $p-n$ перехода, увлекаются и переносятся им через переход в p -область.

Ток, образованный основными носителями, называется *диффузионным током*, а ток, образованный неосновными носителями, — *током проводимости*. Эти токи направлены навстречу друг другу, и так как в изолированном полупроводнике общий ток равен нулю, то составляющие токи равны (рис. 15, в).

Все сказанное справедливо для так называемого равновесного состояния $p-n$ перехода, то есть состояния, при котором на него не действуют никакие внешние напряжения. Внешнее напряжение, приложенное к $p-n$ переходу, усиливает или ослабляет действие электрического поля самого $p-n$ перехода. Это зависит от полярности прикладываемого напряжения.

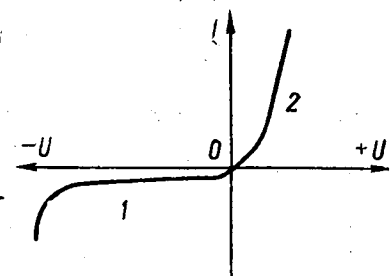


Рис. 16. Вольтамперная характеристика $p-n$ перехода:
1 — обратная ветвь; 2 — прямая ветвь.

Если внешнее напряжение $E_{\text{внеш}}$ приложено «плюсом» к n -области, а «минусом» к p -области (такое напряжение называют *обратным*), то поле, создаваемое источником, усилит действие внутреннего поля $p-n$ перехода. Поэтому еще меньшее количество основных носителей сможет преодолеть такое (уже суммарное) поле и перейти в соседнюю область. Электроны из n -области и дырки из p -области увлекаются от $p-n$ перехода к внешним контактам, в результате чего он расширяется (рис. 15, г). Диффузионный ток уменьшается до нуля, и через переход проходит только ток проводимости, который в технической литературе часто называют *обратным*; он состоит из электронного и дырочного токов проводимости.

Обратный ток имеет малое значение, ибо количество неосновных носителей на несколько порядков меньше количества основных носителей. Увеличение обратного напряжения может привести к «пробою» перехода приложенным напряжением.

Зависимость силы тока, протекающего через $p-n$ переход, от величины приложенного *обратного* напряжения показана на рис. 16 (кривая 1). Из этого графика видно, что при небольших *обратных* напряжениях ток через переход практически не зависит от значения приложенного напряжения, так как он определяется неосновными носителями, возникновение которых связано с тепловым возбуждением парных носителей (появление свободных электронов и дырок). При напряжениях, близких к пробивному, обратный ток сначала увеличивается медленно, но затем этот процесс

может принять лавинообразный характер, если ток через переход не ограничить сопротивлением внешней нагрузки.

Если же внешнее напряжение приложено «плюсом» к p -области, а «минусом» к n -области (такое напряжение называют *прямым*), то электрическое поле источника будет направлено навстречу внутреннему полю $p-n$ перехода и ослабит его действие. При этом резко увеличивается диффузионный (прямой) ток. Зависимость тока через $p-n$ переход при приложении прямого напряжения отражает кривая 2 (рис. 16). Она напоминает одну из ветвей параболы.

В основу работы *полупроводникового диода*, который состоит из одного $p-n$ перехода, положено его своеобразное свойство: способность хорошо пропускать ток в одном направлении (при этом переход имеет малое сопротивление и плохо — в другом (переход обладает при этом значительным сопротивлением) или короче — *односторонняя проводимость* (от p -области к n -области). Это главное свойство $p-n$ перехода положено в основу работы полупроводниковых диодов, предназначенных для выпрямления переменного напряжения, детектирования модулированных колебаний и т. п.

На схемах диоды обозначают в виде треугольника и короткой черточки (рис. 17). Треугольник символизирует анод, а черточка — катод. Вершина треугольника обращена к черточке и указывает направление наибольшей проводимости. Условное буквенно-цифровое обозначение полупроводниковых диодов состоит из латинской буквы V и цифры, обозначающей порядковый номер этого схемного элемента среди других, также обозначенных этой буквой (транзисторы, триносторы и др.). Символ диода употребляют

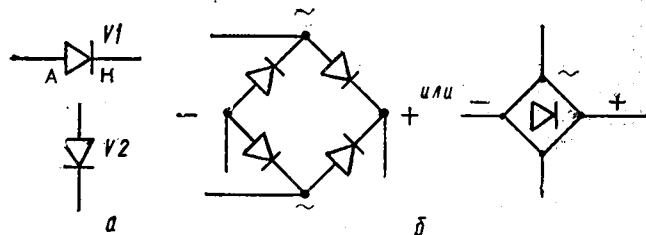


Рис. 17. Условное графическое обозначение диодов:
а — диод обычный; б — мостовой выпрямитель; А — анод;
К — катод.

и для обозначения целой группы диодов: диодных столбов, диодных блоков и т. д.

Своеобразное обозначение лишь у мостового выпрямителя; который на схемах изображают в виде квадрата с четырьмя выводами. Полярность выпрямленного напряжения показывается в этом случае символом диода без вывода: катод расположен ближе к положительному, а анод — к отрицательному полюсу.

Основными материалами для изготовления полупроводниковых диодов являются кремний и германий, причем предпочтение обычно отдают кремнию, так как германиевое сырье является дефицитным.

В зависимости от формы и размеров $p-n$ перехода различают *плоскостные* и *точечные диоды*.

Точечные диоды получили свое название от формы $p-n$ перехода — в виде точки. У первых точечных диодов $p-n$ переход образовывался в том месте, где металлическая игла соприкасается с полупроводниковым материалом. Такие диоды были неустойчивы в работе и один экземпляр отличался от другого по своим свойствам.

В настоящее время при изготовлении $p-n$ перехода точечных диодов (рис. 18) применяют метод электрической формовки — мощные кратковременные импульсы тока пропускают через точечный контакт. При этом контакт разогревается, а кончик иглы сплавляется с полупроводником. Все это обеспечивает механическую прочность. Под контактом образуется маленький полусферический $p-n$ переход. Полученные таким способом точечные диоды — взаимозаменяемы и имеют устойчивые электрические параметры.

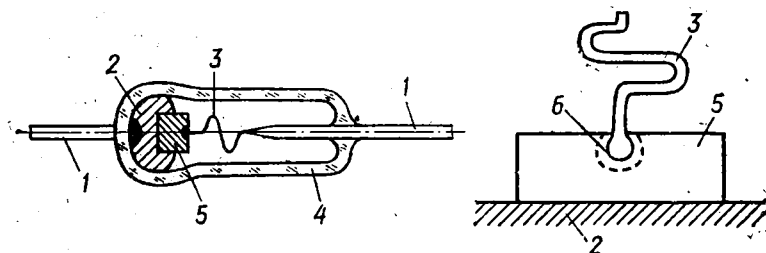


Рис. 18. Конструкция точечного диода и изображение точечного контакта:

1 — вывод; 2 — кристаллодержатель; 3 — контактная пружина; 4 — корпус; 5 — кристалл; 6 — переход.

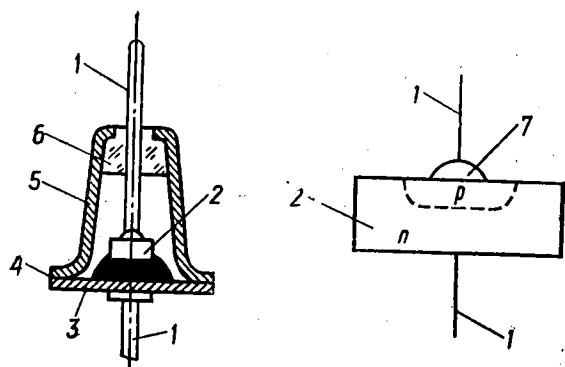


Рис. 19. Конструкция плоскостного диода малой мощности и его схематическое изображение:

1 — вывод; 2 — кристалл с проводимостью n -типа; 3 — кристаллодержатель; 4 — место сварки; 5 — корпус; 6 — изолятор; 7 — трехвалентная примесь.

Малая площадь $p-n$ перехода не дает возможности рассеивать этим диодам большую мощность. К ним также нельзя прикладывать высокие напряжения.

Устройство плоскостного диода показано на рис. 19. Основной частью диода является полупроводниковая пластинка, в которую вплавляется примесь. На границе слоев с различными типами проводимости образуется $p-n$ переход. Он является плоскостью (хотя и не совсем правильной формы), и его площадь довольно значительна. Поэтому такие диоды могут пропускать значительные токи, рассеивать значительные мощности; к ним можно прикладывать высокие напряжения. Однако частотный диапазон этих диодов незначителен (их используют на низких частотах).

Полупроводниковые диоды в зависимости от их свойств и назначения бывают нескольких типов. Мы рассмотрим выпрямительные, универсальные, импульсные и опорные диоды.

Выпрямительные диоды предназначены в основном для выпрямления переменных токов. По рассеиваемой мощности они делятся на маломощные, средней мощности и большой мощности. Параметром, характеризующим это различие, является выпрямленный ток. Диоды малой мощности пропускают ток до 0,3 А, средней — от 0,3 до 10 А, большой — свыше 10 А. Диоды средней и большой мощности устанавливают обычно на радиаторах.

Универсальные диоды применяются в основном для детектирования (выпрямления) модулированных колебаний. Но иногда их можно использовать как выпрямительные: при малых прямых токах и небольших обратных напряжениях. Применяются они и в импульсных схемах.

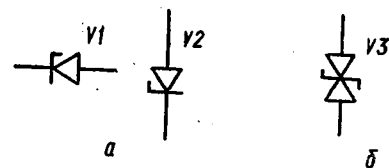


Рис. 20. Условное графическое обозначение стабилизаторов (стабилитронов):

а — однополярного; б — двухполярного.

Импульсные диоды необходимы для работы в импульсных схемах. Они должны обладать способностью сохранять форму импульсов при пропускании их к различным участкам схемы.

К основным параметрам, характеризующим рассмотренные полупроводниковые диоды, относятся: максимально допустимый выпрямленный ток $I_{\text{макс}}$; максимально допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр.макс}}$; максимальный обратный ток $I_{\text{обр.макс}}$ при напряжении $U_{\text{обр.макс}}$. Эти и другие параметры диодов указываются в справочной литературе, причем для надежной работы диодов обычно не используют их по максимальным значениям параметров, а ограничиваются лишь 70—80% от этих значений.

При расчетах падений напряжений на отдельных участках электрических цепей иногда следует учитывать и падение напряжения на переходах диодов при протекании через них прямых токов. Для германиевых диодов оно составляет 0,2—0,5 В, а для кремниевых 0,6—1,5 В. Такая разница получается из-за зависимости от протекающего прямого тока: при увеличении силы тока увеличивается и падение напряжения на переходе. Из приведенных цифровых данных видно, что $p-n$ переход у кремниевых диодов оказывает большее сопротивление протекающему току по сравнению с германиевыми диодами. Это следует учитывать при детектировании слабых сигналов. По этой причине в детекторных каскадах (если они выполнены на диодах) приемников обычно используются германиевые диоды.

Опорные диоды предназначены для стабилизации постоянных напряжений. Раньше их называли стабилизаторами, а сейчас — стабилитронами (рис. 20). Работа стабилитронов основана на явлении пробоя некоторых кремниевых переходов. У таких переходов характеристика пробоя рас-

положена почти параллельно оси токов, то есть при одном и том же значении напряжения на диоде ток может изменяться в довольно широких пределах. В настоящее время с помощью стабилитронов стабилизируют напряжение от 3,3 В и выше. Кроме того, разработаны и выпускаются промышленные двусторонние (двуханодные) стабилитроны, которые могут стабилизировать одновременно положительные и отрицательные напряжения.

Стабилитроны подключают к источнику напряжения в обратном направлении, то есть к полюсу источника подключают катод стабилитрона, а к минусу — анод. Разумеется, что при подключении двустороннего стабилитрона нет необходимости соблюдать это условие.

Разновидностью стабилитронов являются *стабисторы*, которые предназначены для стабилизации малых напряжений (порядка 1 В). В качестве стабисторов используют кремниевые диоды, у которых прямая ветвь идет почти параллельно оси токов (но вверх). Стабистор включают в прямом направлении, то есть анод подключают к плюсу источника напряжения, а катод — к минусу. На схемах стабилитроны и стабисторы изображаются одинаково — к символу катода добавляется короткий штрих. Обозначение как и у всех диодов — латинской буквой V.

К основным параметрам стабилитронов и стабисторов относятся: напряжение стабилизации $U_{ст}$; номинальный ток стабилизации $I_{ст. ном}$; максимальный ток стабилизации $I_{ст. макс}$; минимальный ток стабилизации $I_{ст. мин}$; максимальная допустимая мощность $P_{макс}$.

В большинстве случаев кристалл с переходом помещается в специальный корпус, который у различных типов диодов бывает различным: стеклянным, металлоглазным, металлическим. На корпусе диода обычно проставляют тип диода, а также условное его обозначение. Условное обозначение диода (анод и катод) указывает, как нужно подключать диод на платах устройств. Стабилитроны надо включать наоборот. У некоторых диодов маркировка ставится на выводах (например, у диодов серии Д2), а для других типов пользуются цветной маркировкой.

5. Транзисторы

В настоящее время есть два вида транзисторов: *биполярные* и *униполярные (полевые)*. «Биполярными» их назвали потому, что для нормальной работы этих полупроводни-

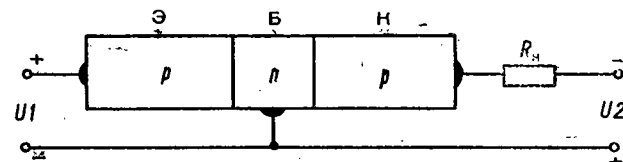


Рис. 21. Схематическое изображение транзистора

$p-n-p$ структуры:

Э — эмиттер; Б — база; К — коллектор; R_n — нагрузка.

ковых приборов необходимо одновременно иметь два типа носителей зарядов: электроны и дырки. Для работы униполярных транзисторов достаточно одного типа носителей.

Биполярные транзисторы. Основные физические процессы. Транзистор состоит из *трех областей* полупроводника, и в отличие от диода имеет не один, а два $p-n$ перехода (рис. 21). Транзистор, в котором крайние области обладают электропроводностью p -типа, а средняя область — электропроводностью n -типа, называют *транзистором структуры $p-n-p$* . Если же крайние области являются полупроводниками n -типа, а средняя область p -типа, такой транзистор называют *транзистором структуры $n-p-n$* .

В обоих случаях среднюю область пластинки биполярного транзистора называют *базой*, одну из крайних областей — *эмиттером* (что означает поставщик носителей тока), вторую крайнюю область — *коллектором* (что означает собиратель носителей тока). Обычно эмиттер меньше коллектора (рис. 22), чтобы коллектор имел возможность собрать все носители заряда, уходящие из эмиттера.

Переход между эмиттером и базой называют *эмиттерным $p-n$ переходом*, а между коллектором и базой — *коллекторным $p-n$ переходом*. Ток, протекающий через вывод эмиттера и эмиттерный переход, называют *током эмиттера* (I_e , или I_E), ток через вывод коллектора и коллекторный переход — *током коллектора* (I_k , или I_C), ток через вывод базы — *током базы* (I_b , или I_B).

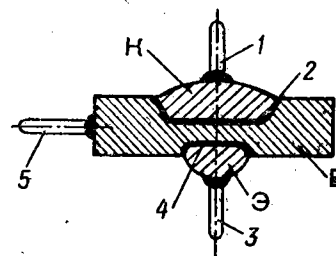


Рис. 22. Схематическое изображение разреза кристалла сплавного транзистора:

К — коллектор; Б — база; Э — эмиттер; 1 — вывод коллектора; 2 — коллекторный $p-n$ переход; 3 — вывод эмиттера; 4 — эмиттерный $p-n$ переход; 5 — вывод базы.

Для того, чтобы транзистор мог усиливать электрические сигналы, нужно к эмиттерному переходу приложить прямое напряжение, а к коллекторному — обратное. Транзистор можно рассматривать как два полупроводниковых диода, имеющих одну общую область (базу). Если напряжение подавать только на коллекторный переход (внешнее напряжение будет при этом усиливать внутреннее поле коллекторного перехода), ток будет течь лишь через коллекторный переход; величина его небольшая, так как он образован неосновными носителями. Этот ток называют *обратным током коллектора* ($I_{ко}$, или $I_{сво}$). Его значение зависит только от температуры (все это было рассмотрено раньше при изучении свойств $p-n$ перехода полупроводниковых диодов). Эмиттерный переход находится в состоянии динамического равновесия, то есть диффузионный ток уравновешивается током проводимости.

Если к эмиттерному переходу подключить прямое напряжение; внутреннее поле перехода уменьшается, и через переход потечет прямой ток (диффузионный). Этот ток обусловливается проникновением дырок из эмиттера в базу и электронов из базы в эмиттер. Хотя течения противоположных по знаку основных носителей зарядов направлены навстречу друг другу, но токи, создаваемые ими, будут иметь одинаковое направление.

Обычно концентрацию примеси в эмиттере делают значительно выше, чем в базе. Когда области различных типов проводимости имеют разные концентрации примесей, диффузионный ток будет определяться главным образом основными носителями той области, в которой концентрация примесей больше. Для нашего случая (в эмиттере значительно больше примеси, чем в базе) прямой ток через эмиттерный переход будет определяться в основном дырками (электронной составляющей эмиттерного тока для облегчения понимания дальнейшего материала будем пренебрегать).

Для уяснения сущности физических процессов, происходящих в структуре транзистора, рассмотрим модель работы плоскостного транзистора структуры $p-n-p$, включенного по схеме с общей базой и в статическом режиме (в выходной цепи не включено сопротивление нагрузки). К эмиттерному переходу приложено прямое напряжение, а к коллекторному — обратное (рис. 23), причем $U_э < U_к$. При включении тумблера S к эмиттерному переходу при-

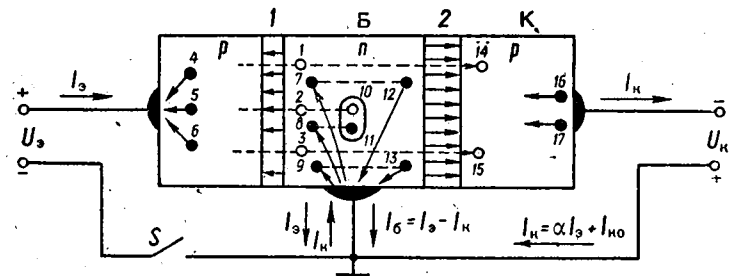


Рис. 23. Процессы в транзисторе структуры $p-n-p$, включенном по схеме с общей базой (статический режим): Э — эмиттер; Б — база; К — коллектор; 1 — эмиттерный переход; 2 — коллекторный переход; ● — электроны; ○ — дырки.

кладывается напряжение источника $U_э$ и внутреннее поле, препятствующее переходу дырок из p -области в n -область, ослабляется. Из эмиттера в базу будут вводиться дырки.

Чтобы понять глубже процессы, протекающие в транзисторе, выберем небольшое количество вводимых из эмиттера дырок. Пусть их будет три: 1, 2, 3. Итак, из эмиттера в базу введены (впрыснуты или инжектированы) дырки 1, 2, 3. Когда дырки поступают в базу, в ней создается избыточный положительный заряд (на три единицы). Одновременно и в эмиттере возникает избыточный заряд, но уже отрицательный.

В результате этих изменений электрическая нейтральность полупроводника нарушается и между эмиттером и его выводом (плюсом источника $U_э$), а также между базой и ее выводом (минусом источника $U_э$) возникают электрические поля, которые исправляют возникшую ситуацию, то есть выбрасывают из эмиттера во внешнюю цепь электроны 4, 5, 6 и втягивают в базу из внешней цепи электроны 7, 8, 9.

Таким образом, впрыскивание в базу из эмиттера трех дырок вызывает следующие явления:

1) в цепи эмиттер — база — источник питания $U_э$ появляется упорядоченное движение трех зарядов — ток эмиттера $I_э$;

2) одновременно в базе появляются парные носители противоположных зарядов (электроны и дырки), причем можно считать, что втянутые в базу электроны оказываются рядом с инжектированными дырками.

Концентрация возникших парных носителей противоположных зарядов в объеме базы неравномерна. Она максимальна у эмиттерного перехода и минимальна у коллекторного. Поэтому будет происходить выравнивание концентрации парных носителей зарядов в базе — их диффузионное перемещение от эмиттерного перехода к коллекторному. (Напомним, что диффузия — это самопроизвольное выравнивание концентрации вещества, зарядов и т. п.). Следует также четко представлять себе, что направленное движение парных носителей зарядов в базе не означает возникновения в промежутке эмиттер — коллектор тока, так как результирующий заряд пары дырка — электрон равен нулю.

В процессе диффузионного движения дырок и электронов в базе некоторые из них рекомбинируют, то есть исчезают (например, дырка 2 и электрон 8). По этой причине количество парных носителей у коллекторного перехода несколько меньше, чем их было у эмиттерного. Зависит это от ширины базы, то есть от расстояния между эмиттерным и коллекторным переходами. Чем меньше ширина базы, тем больше пар носителей достигает коллекторного перехода.

Предположим, что рассматриваемые нами и сохранившиеся парные носители зарядов дырки 1, 3 и электроны 7, 9 достигли коллекторного перехода и попали в его электрическое поле. Так как направление электрического поля коллекторного перехода совпадает с направлением движения дырок, то оно ускоряет их движение и перебрасывает дырки в область коллектора. Одновременно это поле тормозит движение электронов, препятствуя их прохождению в область коллектора.

Поэтому в момент переброса дырок через коллекторный переход в базе создается избыточный отрицательный заряд. В результате этого между выводом базы (между плюсом источника U_k) и ее объемом на мгновение возникает электрическое поле. Это поле является ускоряющим уже для электронов. Оно подхватывает их и выбрасывает (электроны 12, 13) во внешнюю цепь через вывод базы (к плюсу источника U_k) и база снова становится нейтральной.

Дырки 14, 15, переброшенные в область коллектора, создают там избыточный положительный заряд. При этом между выводом коллектора (между минусом источника U_k) и его объемом также на мгновение возникает электрическое

поле, которое втягивает в область коллектора из внешней цепи электроны 16, 17 (через вывод коллектора). Область коллектора снова становится нейтральной.

Таким образом, впрыскивание из эмиттера в базу трех дырок также вызывает упорядоченное перемещение двух (т. е. меньшего числа) зарядов в цепи база — коллектор — источник питания U_k . Этот ток I_k называют *током коллектора* (рис. 23). В выводе базы он протекает в направлении, противоположном току эмиттера I_e .

Теперь разберемся с направлениями токов во внешних цепях. Почему токи I_e и I_k имеют направление, противоположное движению электронов, хотя ток — это направленное движение именно электронов. Следует твердо помнить, что за *техническое направление тока* от плюса к минусу во внешней цепи принимается направление, *противоположное движению электронов*. Хотя это и условность, но она давно принята и изменять ее не будут. Продолжим рассмотрение токов, протекающих в транзисторе при подключении к нему двух источников напряжения U_e и U_k . Через базу проходят два тока, направленные навстречу друг другу: ток эмиттера I_e и ток коллектора I_k . Можно считать, что они протекают параллельно своим переходам и образуют ток базы: $I_b = I_e - I_k$.

Ток коллектора состоит из двух составляющих. В этом можно убедиться, если тумблером S выключить питание от эмиттерного перехода. Тогда ток в цепи коллектора останется, но значение его резко уменьшится. При этом изменится направление тока базы, так как в этом случае он будет равняться обратному току коллектора I_{ko} . Желательно, чтобы ток I_{ko} был как можно меньше. У германиевых транзисторов этот ток бывает порядка единиц или десятков микроампер. У кремниевых транзисторов ток I_{ko} значительно меньше, чем у германиевых (десятые и даже сотые доли микроампера).

Если цепь питания эмиттера замкнута, а к коллекторному переходу также приложено напряжение U_k (рис. 23), ток коллектора будет равен: $I_k = \alpha I_e + I_{ko}$, где α — коэффициент усиления транзистора по току в схеме с общей базой; значение α всегда меньше единицы и обычно равно 0,95—0,99.

При работе транзистора в нормальных условиях αI_e значительно больше I_{ko} ($\alpha I_e \gg I_{ko}$), поэтому значением I_{ko} можно пренебречь и тогда $\alpha \approx I_k / I_e$.

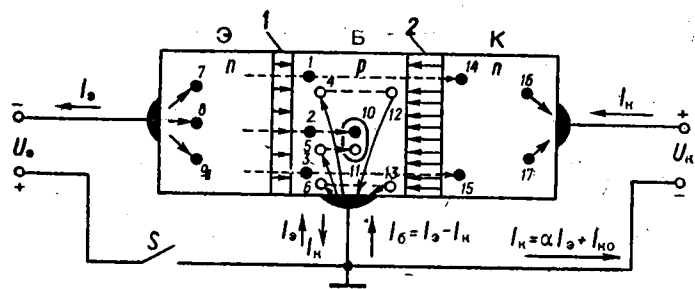


Рис. 24. Процессы в транзисторе структуры $n-p-n$, включенном по схеме с общей базой (статический режим):

Э — эмиттер; Б — база; К — коллектор; 1 — эмиттерный переход; 2 — коллекторный переход; ● — электроны; ○ — дырки.

Все сказанное относится к транзистору структуры $p-n-p$. Процессы, происходящие в транзисторе структуры $n-p-n$, включенном по схеме с общей базой, можно рассмотреть по рис. 24. Источники напряжения $U_э$ и $U_к$ подключаются к областям транзистора в полярности, противоположной предыдущему случаю. В таком транзисторе ток эмиттера преимущественно состоит из электронной составляющей. Дырочным током эмиттера, из-за его малости по сравнению с электронным, можно пренебречь.

Электроны 1, 2, 3, впрыснутые из эмиттера в базу, создают отрицательный заряд, а в эмиттере одновременно появляется такой же положительный заряд. Возникают электрические поля, под действием одного из них в эмиттере из внешней цепи вводятся три электрона 7, 8, 9. Эмиттер становится нейтральным. Под действием второго поля через вывод базы во внешнюю цепь выбрасываются три электрона. Это равносильно тому, что в объем базы инжектируются три дырки 4, 5, 6, которые расположатся рядом с электронами 1, 2, 3. База также становится нейтральной. Образовавшиеся в области базы пары свободных носителей разноименных зарядов будут совершать диффузионное движение к коллекторному переходу. Во время этого движения некоторые из таких пар рекомбинируют (например, электрон 10 и дырка 11). Остальные пары носителей, достигнув коллекторного перехода, попадают в зону действия его электрического поля. Последнее является ускоряющим для электронов и тормозящим для дырок. Электроны подошедших пар носителей будут переброшены в область

коллектора. Снова нарушается электрическая нейтральность полупроводника. На какое-то мгновение возникают электрические поля между базой и ее выводом, а также между коллектором и его выводом. В результате действия этих полей дырки из объема базы будут вытолкнуты через вывод базы во внешнюю цепь. Из внешней цепи в коллектор будут втянуты дырки. Полупроводник становится нейтральным.

Мы рассмотрели поведение нескольких отдельных носителей зарядов, хотя на самом деле при подключении источников напряжения $U_э$ и $U_к$ эти процессы происходят непрерывно. Надо сказать, что процессы, происходящие в транзисторе структуры $n-p-n$, почти аналогичны процессам, происходящим в транзисторе структуры $p-n-p$.

Из рассмотренного можно сделать следующие выводы:

1. Причиной возникновения токов в цепях эмиттера, базы и коллектора являются напряжения, приложенные к эмиттеру — базе и базе — коллектору транзистора.

2. Ток эмиттера состоит из двух составляющих, резко отличающихся по значению (тока, обусловленного инжекцией основных носителей зарядов из эмиттера в базу, и тока, обусловленного инжекцией основных носителей зарядов из базы в эмиттер). Эти токи протекают в одном направлении, ибо обусловлены встречным перемещением носителей разноименных зарядов. Поскольку ток эмиттера, обусловленный инжекцией основных носителей зарядов из базы в эмиттер, не влияет на ток коллектора, а только нагружает источник напряжения $U_э$, то желательно, чтобы он был минимальным. Поэтому концентрацию примесей в базе делают во много раз меньше концентрации примесей в эмиттере.

3. Ток коллектора также состоит из двух составляющих ($\alpha I_э$ и $I_к0$). Оба тока протекают в одном направлении. Так как ток $I_к0$ не является полезным, то он должен быть как можно меньшим.

4. Ток базы равен разности токов эмиттера и коллектора. Эти токи протекают навстречу друг другу. Чем меньше ток коллектора отличается от тока эмиттера (то есть, чем меньше ток базы), тем лучше транзистор.

Физические процессы, изученные нами на упрощенных моделях транзисторов, необходимы для понимания работы транзисторов. При рассмотрении работы транзистора в практических схемах условно можно считать,

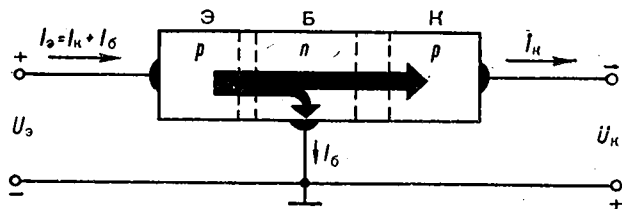


Рис. 25. Условное представление токов транзистора.

что постоянный ток эмиттера разделяется на два тока: относительно большой ток коллектора I_K и меньший ток базы I_0 (рис. 25).

Рассмотрим процессы в транзисторе структуры $p-n-p$, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 26). Такую схему включения транзистора часто применяют в радиоэлектронных устройствах. Рассмотрим статический режим

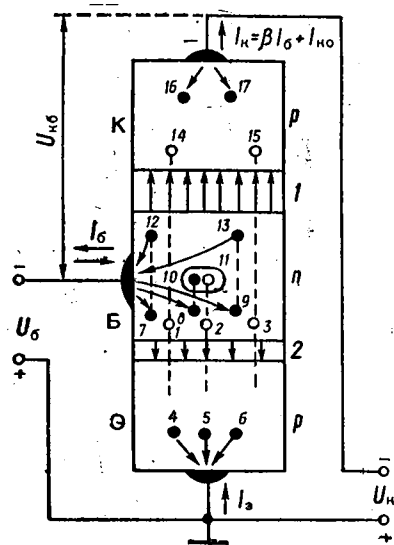


Рис. 26. Процессы в транзисторе структуры $p-n-p$, включенном по схеме с общим эмиттером (статический режим):

К — коллектор; Б — база; Э — эмиттер; 1 — коллекторный переход; 2 — эмиттерный переход.

работы транзистора, которого в практических схемах, конечно, нет, но он подходит для рассмотрения физических процессов, происходящих в транзисторе при подключении источников напряжения U_0 и U_K . В этом случае к коллекторному переходу приложено напряжение $U_{K0} = U_K - U_0$. Обычно $U_K \gg U_0$, поэтому можно считать, что $U_{K0} \approx U_K$, то есть к эмиттерному переходу приложено напряжение U_0 , а к коллекторному U_K и можно считать, что в данной схеме включения транзистора (схема с общим эмиттером) происходят те же процессы, что и в предыдущей. Отличие заключается только в значениях входных токов. В схеме с общей базой входным

током является ток эмиттера, который имеет большое значение даже при небольшом напряжении U_0 .

А что, если даже при небольшом напряжении через нагрузку протекает большой ток? Это значит, что нагрузка имеет малое сопротивление. Для схемы с общей базой это значит, что она обладает малым входным сопротивлением (всего лишь десятки ом). Поэтому для ее нормальной работы нужен источник напряжения U_0 значительной мощности.

В схеме с общим эмиттером входным током является ток базы, который обычно имеет малую величину. А что, если при том же источнике напряжения U_0 протекает уже незначительный ток? Это означает, что схема с общим эмиттером имеет сравнительно большое входное сопротивление (сотни и тысячи ом). Для нормальной работы такой схемы источник напряжения U_0 может иметь незначительную мощность. В транзисторе с общим эмиттером ток коллектора определяется формулой: $I_K = \beta I_0 + I_{K0}$, где β — коэффициент усиления транзистора по току в схеме с общим эмиттером; I_{K0} — обратный (или температурный) ток коллектора; в этой схеме его значение больше, чем в схеме с общей базой.

Структура формулы для I_K в схеме с общим эмиттером аналогична структуре для I_K в схеме с общей базой, лишь изменились входные токи и коэффициенты при них.

В обычных условиях работы транзистора $\beta I_0 \gg I_{K0}$. Поэтому с небольшой погрешностью запишем: $\beta \approx I_K / I_0$.

Между коэффициентами α и β существует зависимость, позволяющая найти один из них, зная другой: $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$.

Как было указано, $\alpha < 1$, поэтому из формулы видно, что коэффициент $\beta > 1$. Пусть $\alpha = 0,98$, тогда $\beta = 0,98 / 0,02 = 49$.

Прежде чем продолжить рассмотрение свойств транзисторов и схем включения, ознакомимся с их условными графическими обозначениями на схемах (рис. 27). Условное обозначение транзистора на схеме содержит обозначения базы, эмиттера и коллектора. Базу транзистора обозначают короткой черточкой, эмиттер — наклонной линией со стрелкой. Для транзистора структуры $p-n-p$ стрелка направлена к изображению базы, а для транзистора структуры $n-p-n$ — от базы. Кружок на схеме

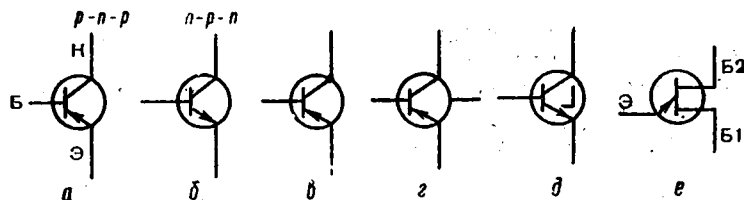


Рис. 27. Условные графические обозначения биполярных транзисторов на схемах:

а — транзистор структуры $p-n-p$; б — транзистор структуры $n-p-n$; в — транзистор структуры $p-n-p$ с коллектором, соединенным с корпусом; г — транзистор структуры $p-n-p$ с выводом корпуса; д — лавинный транзистор; е — транзистор с n -базой; К — коллектор; Б — база; Э — эмиттер.

является символом корпуса транзистора. Кружок не ставят, если транзистор без корпуса (например, когда транзистор входит в состав интегральных или гибридных микросхем).

Один из электродов транзистора нередко соединяют с металлическим корпусом (чаще всего коллектор). На условном обозначении это обозначается жирной точкой, в том месте, где вывод электрода пересекается с символом корпуса (рис. 27, в). Если же у корпуса транзистора самостоятельный вывод, его изображают, как на рис. 27, г.

Разновидностью биполярных транзисторов является *лавинный транзистор*. В его изображении используется дополнительный знак — прямой уголок, который ставится между эмиттером и коллектором.

Своеобразное условное графическое обозначение *однопереходного транзистора*, который имеет особую структуру: у него всего один $p-n$ переход (эмиттерный). Но у его базы два вывода — по обе стороны от $p-n$ перехода. Символ эмиттера однопереходного транзистора направлен под углом к середине символа базы, а выводы от нее (база 1 и база 2) смещены к краям. На рис. 27, е изображено условное графическое обозначение однопереходного транзистора с n -базой.

Итак, транзистор имеет три электрода: эмиттер, базу и коллектор. На вход транзистора подводится входной сигнал, а с выхода снимается выходной. Для подачи входного сигнала нужны два электрода, для снятия сигнала — еще два. Но так как электродов у транзистора всего три,

то один из них делают общим для входного и выходного сигналов. В зависимости от того, какой из трех электродов транзистора общий, различают три основные схемы включения: с *общей базой* (ОБ), *общим эмиттером* (ОЭ) и *общим коллектором* (ОК) (рис. 28).

В схеме с *общей базой* токи входного и выходного сигналов проходят через базу транзистора. Входным электродом здесь является эмиттер, а выходным — коллектор. В схеме с *общим эмиттером* токи входного и выходного сигналов проходят через эмиттер транзистора. Входным электродом является база, а выходным — коллектор. В схеме с *общим коллектором* (часто эту схему называют «*эмиттерный повторитель*») токи входного и выходного сигналов проходят через коллектор транзистора. Входным электродом является база, а выходным эмиттер.

К наиболее важным параметрам, характеризующим свойства транзистора, относятся: коэффициент усиления по току в схеме с *общей базой* α ; коэффициент усиления по току в схеме с *общим эмиттером* β ; обратный ток коллектора $I_{к0}$; наибольшая рассеиваемая мощность $P_{\text{макс}}$; наибольшее напряжение коллектор — эмиттер $U_{кэ, \text{макс}}$; наибольший ток коллектора (эмиттера) $I_{к, \text{макс}}$ ($I_{э, \text{макс}}$);

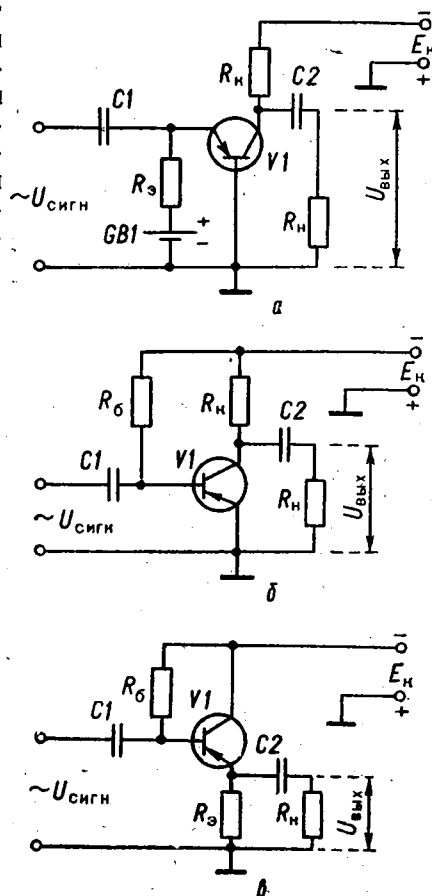


Рис. 28. Схемы включения транзистора:

а — с общей базой; б — с общим эмиттером; в — с общим коллектором.

предельная частота усиления по току в схеме с общей базой f_{α} ; диапазон рабочих температур.

В соответствии с классификацией по мощности транзисторы разделяются на три группы: транзисторы малой мощности — с мощностью рассеяния не более 0,3 Вт; транзисторы средней мощности — 0,3—1,5 Вт; транзисторы большой мощности — более 1,5 Вт.

Мощность транзисторов второй и третьей групп определяется при условии, что они установлены на радиаторах.

По частоте транзисторы подразделяются также на три группы: низкочастотные — с предельной частотой усиления по току не более 3 МГц; среднечастотные — с предельной частотой 3—30 МГц; высокочастотные — с предельной частотой более 30 МГц.

При применении транзисторов для надежной их работы начинающему радиолюбителю нужно придерживаться следующих правил:

1. Для обеспечения надежной работы транзисторов рабочие напряжения, токи и мощности рассеяния должны быть ниже предельных значений.

2. Нельзя подавать напряжение на транзистор, базовый вывод которого отключен.

3. Базовый вывод транзистора подключается к схеме первым и отключается последним.

Недопустимо проверять транзисторы с помощью омметров, тестеров, т. к. транзистор может выйти из строя. Проверку транзисторов следует делать с помощью приборов, предназначенных для этих целей.

Полевые транзисторы находят все более широкое применение в различных радиоэлектронных устройствах. Их называют еще *канальными*, или *униполярными*. Все три названия в той или иной мере отражают принцип работы этих полупроводниковых приборов.

У биполярных транзисторов управление током в выходной цепи ведется входными токами: током эмиттера или током базы. У этих же транзисторов управление выходным током ведется с помощью электрического поля, поэтому их называют *полевыми*. Действие полевых транзисторов основано на использовании носителей заряда только одного типа: электронов или дырок. Это послужило основой для второго названия — *униполярные*. Рабочий ток в полевом транзисторе протекает в области, называемой каналом, поэтому их называют *канальными*.

Все три названия для этих транзисторов равноценны, но мы будем называть их полевыми транзисторами.

Полевые транзисторы подразделяются на транзисторы с управляющим $p-n$ переходом и транзисторы с изолированным затвором.

Первыми были разработаны и нашли свое применение в схемах полевые транзисторы с управляющим $p-n$ переходом. Простейшая модель такого транзистора представлена на рис. 29. В полупроводнике с проводимостью n -типа создают небольшую область p -типа. Что при этом получается, мы уже знаем: образуется $p-n$ переход. К $p-n$ переходу прикладывается напряжение в обратной полярности с тем, чтобы закрыть его.

Когда мы рассматривали механизм образования $p-n$ перехода и влияния на него значения и полярности прикладываемого внешнего напряжения, то мы не отметили важного явления, возникающего в $p-n$ переходе при приложении обратного напряжения. Для полупроводниковых диодов это не имело существенного значения, а для полевых транзисторов с $p-n$ переходом это имеет значение.

Отмечалось, что при приложении к $p-n$ переходу обратного напряжения происходит его расширение. Но все дело в том, что если n -область и p -область имеют разное количество (концентрацию) примесей, то $p-n$ переход расширяется неодинаково. Большее расширение происходит в ту область, где меньше примесей (где меньше основных носителей заряда). Так и поступают при соз-

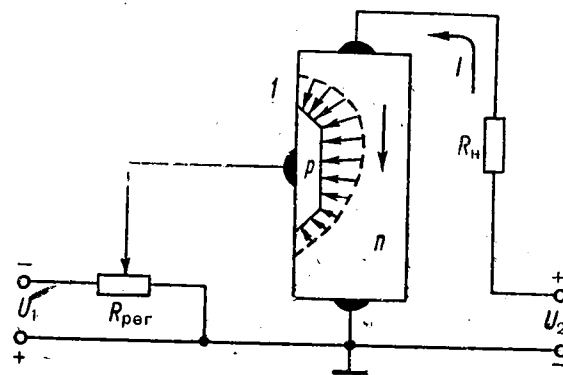


Рис. 29. Модель работы полевого транзистора с управляющим переходом (I).

дании полевых транзисторов с управляющим $p-n$ переходом: в одну из областей вводят большее количество примесей (в рассматриваемом случае это p -область), а в другую — незначительное (в n -область). Тогда при приложении к $p-n$ переходу внешнего обратного напряжения он будет расширяться в n -область.

Приложим к n -области внешнее напряжение от другого источника постоянного напряжения. Тогда через n -область проходит ток, который ограничивается сопротивлением нагрузки R_n и сопротивлением полупроводника. Если изменять напряжение U_1 , будет изменяться ширина $p-n$ перехода и, следовательно, толщина области, по которой проходит ток. Область, толщина (поперечное сечение) которой управляется внешним напряжением, называют *каналом*. Электрод, из которого основные носители заряда входят в канал, называют *исток*ом, а электрод, через который основные носители уходят из канала — *сток*ом. Электрод для регулирования поперечного сечения канала называют *затвором*.

Итак, основными элементами полевого транзистора являются: сток, исток, затвор и канал. Все эти элементы образуются в кристалле полупроводника, который называется *подложкой*. Между затвором и каналом образуется $p-n$ -переход. Если к $p-n$ переходу приложить обратное напряжение, он расширится, причем расширение направлено в объем полупроводника. Если к стоку и истоку приложить напряжение U_2 , через полупроводник потечет ток. Область полупроводника, по которой проходит ток, представляет собой обычное активное сопротивление.

Электрическое поле в области $p-n$ перехода препятствует проникновению в эту область основных носителей заряда полупроводника (в данном случае — электронам). При увеличении обратного напряжения, прикладываемого к переходу, он еще больше расширится, а область полупроводника, через которую проходит ток (канал), уменьшится. Поэтому сопротивление канала увеличивается, а проходящий ток уменьшается. При определенном значении обратного напряжения $p-n$ переход может расширяться настолько, что перекроет канал, и ток через полупроводник не будет проходить. Если к $p-n$ переходу приложить переменное напряжение, то в такт с его изменениями изменится и ширина $p-n$ перехода, а соответственно и ширина (сечение) канала. Поэтому $p-n$ переход называют

управляющим. Изменение ширины канала приводит к изменению тока, а это вызывает изменение падения напряжения на сопротивлении нагрузки R_n .

Мы рассмотрели случай, когда затвором была p -область, а канал образовывался в n -области полупроводника. Аналогичные явления наблюдаются, если области поменять местами, изменив только полярность прикладываемых напряжений. У полевых транзисторов сток и исток можно поменять местами; и работа транзистора не изменится. Полевые транзисторы с управляющим $p-n$ переходом имеют большие входные и выходные сопротивления. Для практики ценно то, что у них высокое входное сопротивление (по этому параметру они похожи на электронные лампы).

Для того чтобы увеличить входное сопротивление полевого транзистора, нужно очень тонким изолирующим слоем затвор отделить от канала. Отсюда и возникло название таких приборов — *полевые транзисторы с изолированным затвором* (рис. 30). Сам затвор — металлический. В качестве подложки обычно используется кристалл кремния с небольшим количеством примеси. В подложке создаются две области, в которых большая (даже сильная) концентрация примесей; эти примеси создают тип проводимости, противоположный типу проводимости подложки. Эти две области называются *сток* и *исток*.

Затвор изолируют от подложки слоем диэлектрика толщиной 0,15—0,3 мкм. В качестве диэлектрика используют различные материалы, обладающие соответствующими изоляционными свойствами. Транзисторы, у которых в качестве диэлектрика используются окислы кремния, называются МОП-транзисторами (металл—окисел—полупроводник); металл — это материал затвора, окисел — изоляция между затвором и каналом, полупроводник — материал подложки, канала. При использовании других видов диэлектриков их называют МДП-транзисторами (металл—диэлектрик—полупроводник).

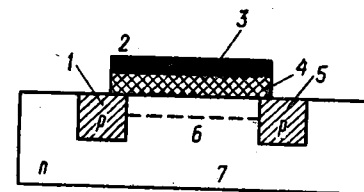


Рис. 30. Изображение структуры транзистора с изолированным затвором:

1 — исток; 2 — металл; 3 — затвор; 4 — изолятор; 5 — сток; 6 — канал; 7 — подложка.

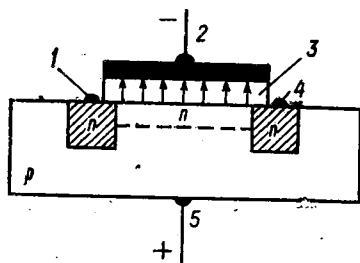


Рис. 31. Изображение транзистора со встроенным каналом: 1 — исток; 2 — затвор; 3 — изолятор; 4 — сток; 5 — подложка.

Если к структуре металл — диэлектрик — полупроводник приложить напряжение, то из-за большого различия сопротивлений диэлектрика и полупроводника практически все напряжение прикладывается к диэлектрику и в нем образуется электрическое поле, управляющее носителями заряда в поверхности полупроводника (под диэлектриком), то есть каналом.

Транзисторы с изолированным затвором делятся на две группы: транзисторы с индуцированным (возникающим) каналом и транзисторы со *встроенным* каналом. Индуцированный канал называют каналом *обогащенного типа*, а встроенный — *обедненного*.

Встроенный канал создается в процессе изготовления транзистора введением примесей. Ток по встроенному каналу протекает тогда, когда напряжение на затворе отсутствует, но оно есть между стоком и истоком. Это так называемый *начальный ток стока*. Значение его можно увеличивать и уменьшать, изменяя значение и полярность напряжения, прикладываемого к затвору. При некотором отрицательном значении напряжения на затворе транзистора с каналом *n*-типа, или, соответственно, положительном для транзистора с каналом *p*-типа, ток в канале прекращается.

Рассмотрим эти процессы на примере транзистора со встроенным каналом *n*-типа (рис. 31). Если напряжение прикладывать к стоку и истоку, и не прикладывать к затвору, то через канал протекает ток, образованный электронами. Теперь приложим напряжение к затвору («минус» к затвору, «плюс» к подложке). Тогда в диэлектрике

В транзисторах с изолированным затвором, в отличие от полевых транзисторов с управляющим *p—n* переходом, канал образуется не внутри объема полупроводника, а в поверхностном слое — под слоем диэлектрика. Электрическое поле, которое образуется в диэлектрике, управляет каналом.

Если к структуре металл — диэлектрик — полупроводник приложить на-

создается электрическое поле, силовые линии которого направлены, как показано на рисунке. Это поле вытесняет носители заряда (электроны) из поверхностной зоны (из канала) вглубь полупроводника. При некотором отрицательном напряжении на затворе электроны из канала вытесняются (это явление называют «обеднение носителями»), а на их место поступают дырки. Канал будет перекрыт, и ток практически будет равен нулю. Когда канал заполнен дырками, он является уже областью с дырочной проводимостью, то есть *p*-областью. Между двумя *n*-областями (стоком и истоком) находится *p*-область и образуются два *p—n* перехода, один из которых при любой полярности напряжения сток — исток включается в обратном направлении, при этом сопротивление участка цепи сток — канал — исток очень большое. Напряжение на затворе, при котором перекрывается канал и прекращается ток, называется *напряжением отсечки*.

Транзисторы с индуцированным каналом отличаются тем, что область канала приобретает электропроводность заданного типа лишь при наличии напряжения на затворе: отрицательного — в транзисторе с подложкой из кремния *n*-типа и положительного — в транзисторе с подложкой из кремния *p*-типа.

Рассмотрим принцип работы транзистора с индуцированным каналом на примере транзистора с подложкой из кремния *p*-типа (рис. 32). Сток и исток представляют собой в этом случае *n*-области. Когда на затворе нет напряжения, ток в канале очень мал, так как снова имеем два встречно включенные *p—n* переходы. При подаче на затвор транзистора, положительного относительно подложки, в диэлектрике образуется электрическое поле, силовые линии которого направлены так, как показано на рисунке. Это поле начнет вытеснять дырки из поверхностного слоя (из канала) вглубь полупроводника. При некотором напряжении на затворе, на-

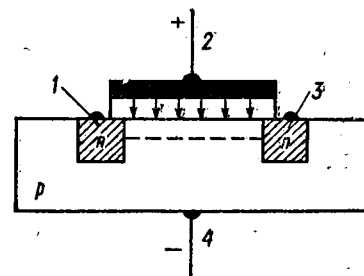


Рис. 32. Изображение транзистора с индуцированным каналом: 1 — исток; 2 — затвор; 3 — сток; 4 — подложка.

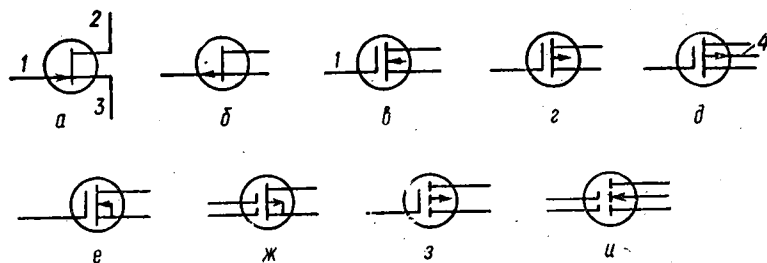


Рис. 33. Условные графические обозначения полевых транзисторов:

а — транзистор с управляющим $p-n$ переходом и каналом n -типа; *б* — транзистор с управляющим $p-n$ переходом и каналом p -типа; *в* — транзистор с изолированным затвором обедненного типа с n -каналом; *г* — транзистор с изолированным затвором обедненного типа с p -каналом; *д* — транзистор с p -каналом с выводом от подложки; *е* — транзистор с изолированным затвором обедненного типа с n -каналом и внутренним соединением подложки и истока; *ж* — транзистор с двумя изолированными затворами обедненного типа с p -каналом и внутренним соединением подложки и истока; *з* — транзистор с изолированным затвором обогащенного типа с p -каналом; *и* — транзистор с двумя изолированными затворами обогащенного типа с n -каналом и с выводом от подложки; 1 — затвор; 2 — сток; 3 — исток; 4 — вывод подложки.

зывается *пороговым напряжением*, дырки вытесняются из области канала, а их место занимают электроны, втянутые полем из объема полупроводника (это явление носит название «обогащение носителями»). Канал становится проводящим (n -типа) и соединяет собой области стока и истока, также n -типа. Образуется однородная среда. Если к стоку — истоку приложить напряжение, то протекает ток, образованный электронами.

При увеличении положительного напряжения, прикладываемого к затвору, канал расширяется и ток, протекающий в цепи исток—канал—сток, увеличивается.

В транзисторе с подложкой из кремния n -типа процесс образования индуцированного канала проходит аналогично, с той лишь разницей, что на затвор следует подавать отрицательное напряжение относительно подложки, а ток в цепи исток—канал—сток образуется дырками.

Условные графические обозначения полевых транзисторов представлены на рис. 33. Сначала рассмотрим изображение полевых транзисторов с управляющим $p-n$ переходом. Канал этих транзисторов изображают в виде черточки (как базу биполярных транзисторов). Две параллельные линии справа изображают сток и исток полевого

транзистора. Линия, которая продолжает (в противоположную сторону) линию истока, изображает затвор. Так как затвор соединяется с каналом, управляющим $p-n$ переходом, то на условном обозначении затвора представляется стрелка, указывающая электропроводность канала. Если электропроводность канала n -типа, острие стрелки будет направлено к изображению канала, если p -типа, то от него. Корпус такого транзистора изображают окружностью, причем обозначение канала помещают в середине символа корпуса.

В полевых транзисторах с изолированным затвором последний изображается короткой линией, параллельной символу канала с выводом на продолжении линии истока. Между короткой линией затвора и символом канала оставляют небольшое расстояние, которое обозначает изолированный затвор. Электропроводность канала показывают короткой стрелкой со стороны выводов истока и стока. Если стрелка направлена к символу канала, значит, его проводимость n -типа, а если от символа канала, — p -типа. Таким же способом показывается тип проводимости канала и тогда, когда от кристалла (подложки) делают отдельный вывод. Очень часто вывод подложки соединен с истоком внутри транзистора. На схемах это нужно показать так, как изображено на рис. 33, *е*, *ж*. В полевом транзисторе может быть несколько затворов (на рис. 33, *ж*, *и* изображены полевые транзисторы с двумя изолированными затворами).

О мерах предосторожности при работе с полевыми транзисторами. При работе с полевыми транзисторами надо соблюдать особые меры предосторожности. Все работы с полевыми транзисторами следует выполнять на металлическом заземленном листе, на котором располагаются руки монтажника (настройщика), инструмент и другое оборудование для выполнения работ. На руке монтажника должно быть заземленное кольцо или браслет.

Выводы транзисторов паяют низковольтным паяльником мощностью не более 60 Вт; его жало должно быть заземлено. Температура паяльника не должна превышать 260°C , длительность пайки не более 3 с. Пайку производить не ближе 5 мм от корпуса транзистора. На время пайки выводы транзистора нужно соединить между собой коротко. Изгиб выводов выполнять на расстоянии не менее 3 мм от корпуса.

6. Тиристоры

Мы уже познакомились с полупроводниковыми приборами — диодом и биполярным транзистором. Диод имеет один $p-n$ переход между двумя областями полупроводника с проводимостью разного типа и пропускает ток только в одном направлении (от анода к катоду). Транзистор состоит из трех чередующихся слоев полупроводника с проводимостью p - и n -типа и обладает усилительными свойствами. Это позволяет использовать транзистор и в качестве переключающего элемента — аналогично электромагнитному реле. Но транзистор может находиться в открытом состоянии (подобно реле) лишь при наличии управляющего сигнала.

Еще недавно в качестве электронного ключа в технике использовали газонаполненный прибор — тиратрон. С появлением биполярного транзистора появилась и четырехслойная структура, у которой рабочие характеристики напоминали характеристики тиратронов. Эти четырехслойные структуры получили название **тиристов** (название образовано от слов *тиратрон* и *транзистор*).

Работа тиристора основана на тех же процессах, что и работа биполярного транзистора. Однако последовательное соединение трех $p-n$ переходов усложняет физические процессы.

Тиристоры, выпускаемые промышленностью, изготавливаются на основе кремневых пластинок с $p-n-p-n$ структурой (рис. 34). Внешняя p -область называется **анодом** — к ней присоединяется плюс источника напряжения, внешняя n -область — **катодом**, к ней

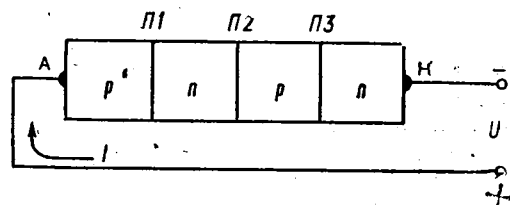


Рис. 34. Четырехслойная $p-n-p-n$ структура:

П1, П2, П3 — соответственно первый, второй и третий $p-n$ переходы; А — анод; К — катод.

присоединяется минус источника напряжения. К p -области анода прилежит область с электронной проводимостью (ее называют n -базой), за ней — область с дырочной проводимостью (p -база), а замыкает эту цепочку n -область катода. Между областями с различной проводимостью образуются $p-n$ переходы.

Приложим внешнее напряжение к рассматриваемой структуре: плюс — к аноду, а минус — к катоду. Тогда крайние переходы П1 и П3 будут включены в прямом направлении, поэтому их называют **эмиттерными**; средний переход П2 будет включен в обратном направлении, поэтому его называют **коллекторным**. Если имеем две эмиттерные области (n - и p -эмиттеры), то соседние области будут базовыми (p - и n -базы), коллектор же получается общим.

Большая часть внешнего напряжения падает на коллекторном переходе, поэтому первый участок 1 вольт-амперной характеристики тиристора (рис. 35) аналогичен обратной ветви вольт-амперной характеристики диода. С увеличением напряжения, приложенного к тиристор, возрастает напряжение и на эмиттерных переходах. Дырки, инжектированные из p -эмиттера в n -базу, диффундируют к $p-n$ переходу коллектора, проходят его и попадают в p -базу. Дальнейшему прохождению дырок по тиристорной структуре препятствует небольшое электрическое поле правого эмиттерного перехода П3. Дырки, оказавшись в p -базе, не могут двигаться ни вправо, ни влево и создают избыточный положительный заряд, который уменьшает ширину перехода П3 (ослабляет его электрическое поле). Это, в свою очередь, вызывает инжекцию электронов из n -эмиттера. Инжектированные электроны диффундируют к $p-n$ переходу коллектора П2, проходят через этот переход и попадают в n -базу. Далее им препятствует небольшое электрическое поле левого эмиттерного перехода П1. Электроны, оказавшись в n -базе, не

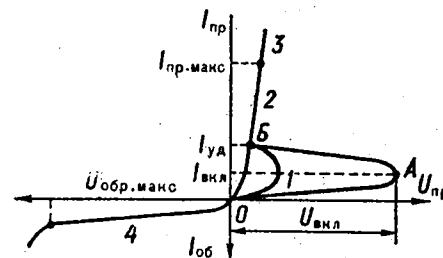


Рис. 35. Вольт-амперная характеристика тиристора.

могут двигаться ни влево, ни вправо (слева и справа оказываются тормозящие электрические поля $p-n$ переходов). Следовательно, в n -базе будет накапливаться избыточный отрицательный заряд, уменьшающий ширину перехода $\Pi 1$, что вызывает увеличение инжекции дырок из p -эмиттера. В результате накопления избыточного отрицательного заряда в n -базе и положительного — в p -базе при напряжении на тиристоре $U_{\text{нкл}}$ (напряжение включения) резко увеличивается ток, проходящий через тиристор, и одновременно уменьшается падение напряжения на тиристоре. Сила тока ограничивается практически только сопротивлением нагрузки.

Второй участок вольтамперной характеристики тиристора 2 аналогичен прямой ветви вольтамперной характеристики $p-n$ перехода. В режиме, соответствующем второму участку характеристики, коллекторный переход оказывается включенным в прямом направлении из-за большого заряда, накопленного в базах.

Таким образом, тиристор может находиться в двух состояниях: в выключенном (закрытом), которое характеризуется большим падением напряжения на тиристоре и прохождением малого тока через него, то есть большим сопротивлением; и во включенном (открытом), характеризующемся малым падением напряжения на тиристоре и прохождением больших токов через него, то есть малым сопротивлением.

Тиристор находится в открытом состоянии до тех пор, пока проходящий ток поддерживает избыточные заряды в базах. Последние необходимы для того, чтобы включать коллекторный переход в прямом направлении. При уменьшении тока через тиристор до некоторой определенной величины $I_{\text{уд}}$, избыточный заряд в базах уменьшается. При этом коллекторный $p-n$ переход окажется включенным в обратном направлении, уменьшится инжекция из эмиттеров, и тиристор перейдет в закрытое состояние.

Если изменить полярность напряжения, приложенного к тиристору, на обратную, переходы $\Pi 1$ и $\Pi 3$ окажутся смещенными в обратном направлении, и вольтамперная характеристика тиристора будет иметь вид обратной ветви обной диодной характеристики.

Принцип работы тиристора можно рассмотреть и несколько иначе. Когда речь шла о составе областей тиристора, мы называли два эмиттера (p - и n -типа), две базы (n -

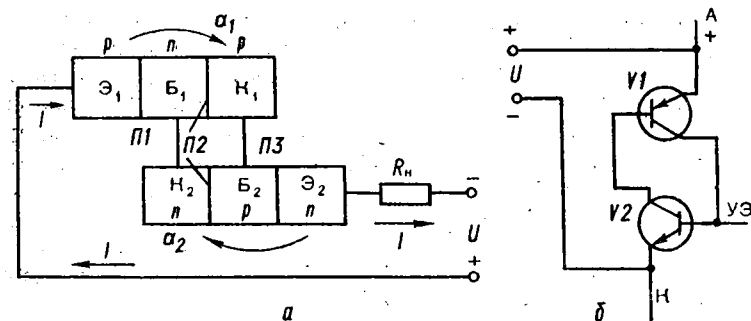


Рис. 36. Схема замещения тиристора:
А — анод; К — катод; УЭ — управляющий электрод.

и p -типа) и один коллектор. Исходя из этого, тиристорную структуру можно условно разделить на два транзистора с различными типами проводимости: $p-n-p$ и $n-p-n$ (рис. 36). У транзистора $p-n-p$ переход $\Pi 1$ является эмиттерным, а $\Pi 2$ — коллекторным, у транзистора $n-p-n$ эмиттерным переходом будет переход $\Pi 3$, а коллекторным — $\Pi 2$, то есть два транзистора имеют общий коллекторный переход, причем база транзистора $p-n-p$ является одновременно коллектором транзистора $n-p-n$, а база транзистора $n-p-n$ — коллектором транзистора $p-n-p$.

Когда прямое напряжение подается на тиристор, дырочный ток эмиттера транзистора $p-n-p$ протекает через переход $\Pi 1$, частично рекомбинирует с электронами n -базы, а частично проходит через коллекторный переход $\Pi 2$. Эта часть дырочного тока определяется коэффициентом усиления транзистора по току α_1 . Его величина равна: $\Gamma_{k1} = \alpha_1 I_{\Sigma 1}$.

Пройдя через переход $\Pi 2$ в область p -базы транзистора $n-p-n$, дырки образуют там избыточный положительный объемный заряд, который вызовет встречный поток электронов из n -эмиттера через переходы $\Pi 3$ и $\Pi 2$ в p -базу транзистора $p-n-p$. Аналогично коллекторный ток $I_{k2} = \alpha_2 I_{\Sigma 2}$.

Электроны, достигнув n -базы транзистора $p-n-p$, создают в ней избыточный отрицательный объемный заряд, который вызовет вторичный поток дырок из p -эмиттера, дырки — вызовут новый поток электронов из n -эмиттера

и т. д. Начинается так называемый *лавинный процесс нарастания тока* через структуру. Явление, которое вызывает такое лавинное (мгновенное) нарастание тока (для нашего случая это ток, а для общего случая — любой другой параметр), называется *положительной обратной связью*. Лавинный процесс нарастания тока начинается только при определенном напряжении на тиристоре.

Определим ток через тиристор.

Через коллекторный переход $P2$ протекают три составляющие тока: $I_{K1} = \alpha_1 I_{E1}$ — дырочный ток транзистора $p-n-p$; $I_{K2} = \alpha_2 I_{E2}$ — электронный ток транзистора $n-p-n$; I_{K0} — обратный ток коллекторного перехода (его мы рассматривали в биполярных транзисторах). Поскольку токи I_{E1} , I_{E2} и I_{K0} в сумме должны равняться току I , протекающему во внешней цепи, то можно записать: $I = \alpha_1 I + \alpha_2 I + I_{K0}$. Здесь токи эмиттеров I_{E1} и I_{E2} заменяют на ток I на основании того, что эти эмиттерные токи являются частями общего тока, каким есть ток I . Исходя из этой формулы, получим:

$$I = \frac{I_{K0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}.$$

Из формулы видно, что при $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ знаменатель равен нулю и ток I стремится к бесконечности. Ток I ограничивается лишь сопротивлением нагрузки. В этом случае тиристор открыт.

В открытом состоянии внутренние области тиристора так сильно насыщаются зарядами, что все три перехода оказываются смещенными в прямом направлении, то есть составляющие транзисторы находятся в режиме насыщения. Известно, что отдельный транзистор не может длительное время находиться в режиме насыщения, если снять управляющий сигнал. Тиристор же будет оставаться открытым, если даже ток управляющего электрода станет равным нулю.

Из рис. 36 видим, что ток коллектора транзистора $p-n-p$ является током базы транзистора $n-p-n$ и наоборот, то есть в структуре существует положительная обратная связь, благодаря которой составляющие транзисторы находятся в состоянии насыщения. Таким обра-

зом, чтобы перевести тиристор в открытое состояние, нужно увеличивать коэффициенты α_1 и α_2 , которые зависят от возрастания тока через структуру. Увеличить же ток можно двумя способами: 1) повысить напряжение между анодом и катодом тиристора до величины лавинного нарастания тока в структуре тиристора; 2) ввести дополнительный ток через так называемый управляющий электрод, который включают в одну из базовых областей тиристорной структуры.

Использование той или иной базы приводит лишь к изменению полярности источника управляющего напряжения. Полярность управляющего напряжения должна обеспечивать отпирание соответствующего эмиттерного перехода (включить переход в прямом направлении). Чаще всего управляющий электрод подключают к p -базе (p -базу изготавливают тоньше n -базы, поэтому через катодный эмиттер легче управлять тиристором). Источник напряжения, создающий дополнительный ток (он называется управляющим током I_{y3}) через катодный эмиттер, включают плюсом к p -базе, а минусом к катоду. Ток I_{y3} , поступая в базу транзистора $n-p-n$, увеличивает ток через транзистор и тем самым коэффициент усиления α_2 , в результате сумма коэффициентов $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1$. Начинается лавинное нарастание тока в цепи.

Если тиристор имеет для подключения в схему только два электрода (анод и катод), он называется *диодным тиристором*, или сокращенно — *динистором*. Их называют еще неуправляемыми диодами, подчеркивая тем самым, что с их помощью нельзя управлять величиной напряжения переключения. Тиристоры, у которых, кроме анода и катода, есть управляющий электрод, называют *триодными тиристорами*, или *тринисторами*.

Работу тиристора можно проследить по его вольтамперной характеристике (см. рис. 35). Если приложить прямое напряжение к тиристору (плюс к аноду, минус к катоду), не подавая напряжения на управляющий электрод (в этом случае он работает как динистор), он откроется лишь в точке A при напряжении, равном напряжению включения $U_{вкл}$. При этом сопротивление тиристора резко уменьшается и он переходит в режим работы на участке характеристики 2. Подавая напряжение на управляющий электрод, мы можем включить тиристор (в этом случае он работает как тринистор) гораздо раньше, чем напряжение на аноде

достигнет значения $U_{\text{вкл.}}$ (Участок такого включения обозначен жирной линией). В этом суть использования управляющего электрода. С помощью управляющего электрода можно включать тринистор в нужные для нас моменты времени. Кроме того, управляющий электрод позволяет использовать тринистор при небольших напряжениях между анодом и катодом, а для радиоэлектронных схем на полупроводниках как раз характерны небольшие напряжения питания.

Включив тринистор, мы можем снять напряжение с управляющего электрода, и если при этом через тринистор протекает ток, который больше тока удержания $I_{\text{уд}}$, тринистор останется включенным. Выключить его можно, лишь сняв напряжение питания или подав на анод напряжение обратной полярности (то есть фактически тоже сняв прямое напряжение). Если же при снятии напряжения с управляющего электрода ток через тринистор окажется меньше тока $I_{\text{уд}}$, тринистор выключается (закрывается).

Своеобразной может быть практическая замена тринистора на два транзистора различной структуры $p - n - p$ и $n - p - n$ (см. рис. 36, б). В исходном состоянии транзисторы $V1$ и $V2$ при подаче напряжения U закрыты. Если на базу транзистора $V2$ (структуры $n - p - n$) подать положительное (по отношению к эмиттеру) напряжение (на управляющий электрод), транзистор приоткроется, и через него потечет ток базы транзистора $V1$ (структуры $p - n - p$). Этот ток протекает по следующей цепи: плюс источника, переход эмиттер — база транзистора $V1$, участок коллектор — эмиттер транзистора $V2$, минус источника. Транзистор $V1$ приоткроется и по цепи: плюс источника, участок эмиттер — коллектор транзистора $V1$, переход база — эмиттер транзистора $V2$, минус источника потечет ток. Таким образом, увеличился ток базы транзистора $V2$. Это, в свою очередь, вызовет увеличение тока базы транзистора $V1$ и т. д. Благодаря наличию такой положительной обратной связи транзисторы мгновенно открываются.

Управлять транзисторным аналогом можно и отрицательным напряжением, которое при этом следует подавать на базу транзистора $V1$. Рассмотрев транзисторный аналог тринистора и доказав его работоспособность, мы тем самым доказали правомочность выбранной нами раньше модели тиристора и справедливость наших рассуждений.

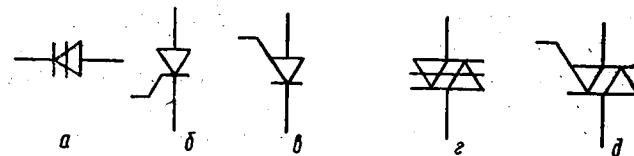


Рис. 37. Условные графические обозначения тиристоров:

а — динистор; б — тринистор с управлением по катоду; в — тринистор с управлением по аноду; г — симметричный динистор; д — симистор.

К основным параметрам тиристоров относятся: *напряжение включения, максимальное обратное напряжение, ток включения, обратный ток, наибольшая мощность рассеяния и температурный диапазон.*

Среди тиристоров, которые применяются в схемах, отметим следующие: динисторы типа КН102 (кремниевые неуправляемые диоды); тринисторы типа Д235, КУ101, КУ201, КУ202 (кремниевые управляемые диоды).

Существенный недостаток динисторов и тринисторов — их *односторонняя проводимость*. Если к ним приложить переменное напряжение, эти приборы пропускают ток только в течение одного полупериода. Для того чтобы они пропускали ток в течение обоих полупериодов, эти приборы включают параллельно навстречу друг другу. Однако это создает определенные трудности. Поэтому были разработаны *симметричные тиристоры*: симметричные динисторы и тринисторы (*симисторы*). Название симметричные они получили из-за симметричной вольтамперной характеристики. У них пятислойная структура (обычно $n - p - n - p - n$) и соответственно четыре электронно-дырочных перехода. Эти приборы проводят ток в обоих направлениях, то есть при приложении к ним переменного напряжения ток проходит в течение обоих полупериодов (конечно, когда эти приборы открыты). Симистор (подобно тринистору) имеет управляющий электрод. В качестве симистора, применяемого в схемах, можно назвать симистор типа КУ208.

Условное графическое изображение тиристоров представлено на рис. 37. Основу их изображения составляет изображение обычного диода (тиристоры и сами являются диодами), к которому добавляются дополнительные символы, отражающие специфику того или иного тиристора.

7. Прочие полупроводниковые схемные элементы

В этом параграфе рассмотрим полупроводниковые приборы, которые пока не имеют столь широкого применения в радиоэлектронных схемах, по сравнению с рассмотренными выше.

Терморезисторы (рис. 38) — это полупроводниковые нелинейные резисторы, сопротивление которых зависит от температуры. Большинство терморезисторов уменьшают свое сопротивление при увеличении температуры, то есть, имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Есть терморезисторы с положительным ТКС (с увеличением температуры их сопротивление увеличивается). Такие терморезисторы называют *позисторами*.

Терморезисторы используют для температурной стабилизации схем радиоэлектронной аппаратуры, а также для измерения и регулировки температуры. Терморезисторы, предназначенные для измерения температуры, называют *термисторами*. Чаще всего применяются медно-марганцевые (ММТ и СТ2), кобальто-марганцевые (КМТ и СТ1) и медно-кобальто-марганцевые (СТ3) терморезисторы.

К основным параметрам терморезисторов относятся: номинальное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления.

Варисторы. Это нелинейные полупроводниковые резисторы, сопротивление которых изменяется в зависимости от напряжения. Варисторы изготовляют на основе порошкообразного карбида кремния с добавкой связывающего вещества (глины).

Их используют для защиты элементов электрических цепей от перенапряжений, в стабилизаторах напряжения для искрогашения и т. п.

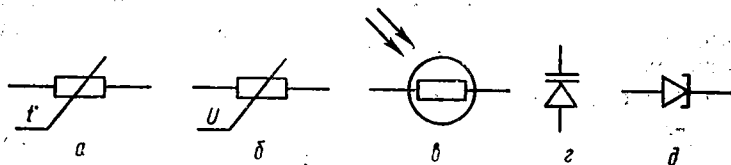


Рис. 38. Условное графическое обозначение термистора (а), варистора (б), фоторезистора (в), варикапа (г) и туннельного диода (д).

Примером обозначения может быть обозначение варистора СН1-2-1: СН — сопротивление нелинейное; первая цифра обозначает материал (1 — карбид кремния), вторая — тип конструкции (2 — дисковый) и третья — номер разработки.

Фоторезисторы — полупроводниковые резисторы, сопротивление которых изменяется (уменьшается) под воздействием светового потока. (При рассмотрении полупроводниковых диодов мы уже отмечали: для того чтобы валентные электроны стали свободными носителями заряда, полупроводнику нужно сообщить энергию извне (тепловую, световую или другую; в нашем случае — световую).

Обычно фоторезисторы в радиоэлектронных устройствах применяются в качестве светочувствительных датчиков, реагирующих на приращение светового потока. Материалом для изготовления фоторезисторов являются сернистые и селенистые соединения кадмия и свинца.

В практике чаще всего применяются фоторезисторы типа ФСК или СФ2. Фоторезистор ФСК: ФС — фотосопротивление, К — материал полупроводника (сернистый кадмий). Фоторезистор СФ2: СФ — сопротивление фоточувствительное, 2 — материал полупроводника (сернистый кадмий). Второй случай обозначения соответствует новым обозначениям фоторезисторов.

К основным параметрам фоторезисторов можно отнести: *темновое сопротивление $R_{\text{тем}}$, световой ток $I_{\text{св}}$, фототок $I_{\text{ф}}$, рабочее напряжение и мощность рассеяния.*

Варикапы. Это полупроводниковые диоды, которые используются в качестве конденсаторов с электрическим управлением емкости. Их еще называют *варикондами*. Емкостью такого конденсатора является емкость $p-n$ перехода, которая образуется при приложении к нему обратного напряжения. Изменяя величину последнего, можно управлять шириной $p-n$ перехода, то есть значением емкости. Для работы в схемах в качестве переменной емкости диод (варикап) нужно включать обратной полярности, указанной на корпусе.

Туннельные диоды по своему устройству аналогичны обычным полупроводниковым. Туннельный диод тоже состоит из двух областей: p -области с дырочной проводимостью и n -области с электронной, между которыми образуется $p-n$ переход. Однако в отличие от обычных диодов для изготовления туннельных диодов применяют полупро-

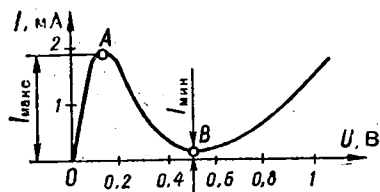


Рис. 39. Вольтамперная характеристика туннельного диода (ЗИ301А).

водниковый материал с большим содержанием примесей. Туннельные диоды имеют очень малую ширину $p-n$ перехода. В связи с особенностью структуры полупроводникового материала в основе работы туннельных диодов лежит так называемый *туннельный механизм перехода*

носителей заряда (электронов) из одной области полупроводника в другую иначе это явление называют *туннельным эффектом*. Отсюда и название этих диодов. В $p-n$ переходе обычного диода электроны, участвующие в создании тока, должны затрачивать определенную энергию для того, чтобы преодолеть потенциальный барьер между p - и n -областями. Это преодоление происходит за счет энергии теплового движения электронов.

При туннельном механизме перехода электроны не затрачивают энергии на преодоление потенциального барьера, они как бы проходят под ним (как проходят поезда под горой, пользуясь туннелем). Когда напряжение на туннельном диоде равно нулю, часть электронов из n -области проходит в p -область, а оттуда в n -область, фактически без затраты энергии (пользуясь туннелем). Количества электронов, поступающих с той и другой областей, равны, и общий ток через полупроводник равен нулю.

Если к туннельному диоду приложить небольшое прямое напряжение, то поток электронов из n -области увеличится, а из p -области уменьшится. Результирующий ток будет увеличиваться, причем гораздо быстрее, чем у обычного диода (рис. 39).

При незначительном увеличении прямого напряжения туннельный ток будет иметь максимальное значение $I_{\text{макс}}$ (при этом поток электронов из p -области прекращается). При дальнейшем увеличении прямого напряжения уменьшается туннельный ток, ибо с возрастанием напряжения уменьшается количество электронов, которые могут совершать туннельный переход. После того как туннельный ток достигнет значения $I_{\text{мин}}$ (точка В), ток снова увеличивается. Причем увеличение происходит аналогично процессам, которые происходят в обычном диоде. Поэтому правая часть

вольтамперной характеристики (после точки В) туннельного диода почти одинакова с прямой ветвью вольтамперной характеристики обычного диода. Наличие туннельного участка АВ на вольтамперной характеристике дает возможность использовать туннельный диод для генерирования и усиления электрических сигналов. Нужно отметить, что все рассмотренные процессы в туннельном диоде происходят при незначительных прямых напряжениях, примерно до 0,5 В. Отсюда следует, что туннельный диод работает при очень малых напряжениях источника питания. Малая потребляемая мощность делает этот диод очень нужным в тех радиоэлектронных устройствах, в которых потребление энергии от источников питания имеет важное значение.

Недостатком туннельного диода является то, что он обладает всего лишь двумя выводами (он является двухполюсником). Это вызывает затруднения у разработчика схем, так как возникают сложности с разделением входных и выходных цепей.

К основным параметрам туннельных диодов относятся: ток максимума $I_{\text{макс}}$, отношение тока максимума к току минимума, наибольшее напряжение максимума.

К туннельным диодам, нашедшим применение в схемах, относятся диоды типа ЗИ301, АИ101, АИ201, АИ301. Первый элемент в обозначении указывает исходный материал (А или З — арсенид галлия), буква И — что это туннельный диод.

Фотодиоды. Фотодиоды (рис. 40) относятся к полупроводниковым приборам с электронно-дырочным переходом, которые реагируют на световые изменения. На фотодиод подают обратное напряжение. При отсутствии освещения

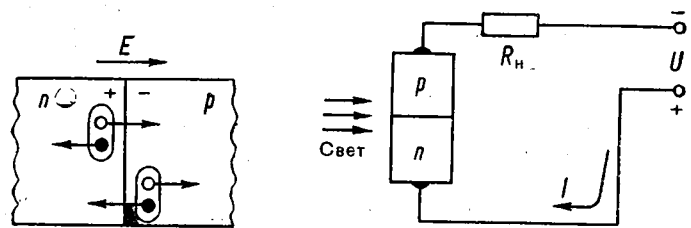


Рис. 40. Схема включения фотодиода и изображение разделения переходом зарядов, возбужденных светом:

● — электроны; ○ — дырки.

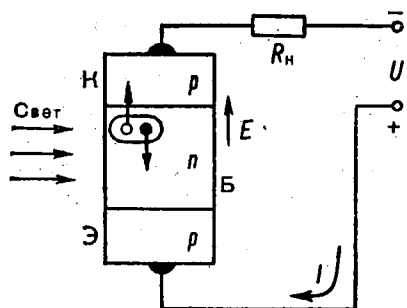


Рис. 41. Схема включения фототранзистора:

К — коллектор; Б — база; Э — эмиттер;
● — электрон; ○ — дырка

воздействия света на полупроводник. У $p-n$ перехода парные заряды будут разделяться.

Электроны из p -области (в ней они являются неосновными носителями) захватываются полем перехода и перебрасываются в n -область, а дырки отталкиваются полем вглубь p -области. В тот момент, когда электроны перебрасываются через переход, в p -области создается избыточный положительный заряд. Между выводом p -области и ее объемом возникает электрическое поле, которое втягивает электроны из внешней цепи, p -область становится нейтральной.

Электроны, переброшенные в n -область, создают в ней избыточный отрицательный заряд. Между выводом n -области и ее объемом возникает электрическое поле, которое выбрасывает избыточные электроны во внешнюю цепь, и n -область также становится нейтральной.

Аналогичная картина наблюдается и с парными зарядами, возникающими в n -области. Однако при этом через переход перебрасываются дырки, а электроны отталкиваются полем перехода вглубь n -области.

Эти процессы происходят до тех пор, пока фотодиод освещается светом. Через фотодиод и внешнюю цепь протекает фототок. Чем больше световой поток, облучающий фотодиод, тем больше ток. Если изменять световой поток, то соответственно будет изменяться и ток фотодиода. И тогда напряжение на сопротивлении нагрузки R_n повторяет изменения тока, то есть светового потока. Мы рассмотрели

в цепи будет протекать *темновой ток* I_T , который представляет собой обратный ток диода. Если полупроводник осветить, то под действием световой энергии из ковалентных связей высвобождаются электроны, которые становятся свободными носителями заряда. Итогда в дополнение к тепловым носителям добавляются пары зарядов электрон — дырка, возникающие вследствие

работу фотодиода в режиме Б, который характеризуется работой фотодиода с внешним источником питания.

Фотодиод может работать и без внешнего источника питания — в режиме А. Если освещать фотодиод, в нем образуются парные заряды, которые разделяются электрическим полем $p-n$ перехода. При этом в n -области полупроводника накапливаются избыточные электроны, а в p -области — избыточные дырки. В результате обе области дополнительно заряжаются: n -область становится отрицательной, а p -область — положительной, и на выводах фотодиода появляется фото-ЭДС.

Если к освещенному фотодиоду подключить внешнюю замкнутую цепь, в ней будет протекать электрический ток. Основу фотодиода составляет электронно-дырочный переход. Поэтому можно сказать, что $p-n$ переход может выполнять роль фотоэлемента, который преобразует световую энергию в электрическую. Этот принцип является основой работы так называемых солнечных батарей.

К фотодиодам, нашедшим применение в радиоэлектронных устройствах, относятся: ФД-1, ФД-2, ФД-3.

Фототранзисторы, как и обычные биполярные транзисторы, представляют собой полупроводниковую пластинку, в которой имеются чередующиеся p - и n -области. Отличие в том, что базовая область у фототранзистора облучается светом.

Рассмотрим принцип работы фототранзистора, включенного по схеме с общим эмиттером при токе базы, равном нулю (рис. 41). В этом случае темновой ток будет значительно больше, чем темновой ток фотодиода. Если на базу транзистора воздействовать световым потоком, в ней образуются парные носители заряда (как и в фотодиоде), которые делятся электрическим полем коллекторного перехода. Дырки увлекаются полем и через переход перебрасываются в p -область, а электроны остаются в базе, создавая в ней отрицательный объемный заряд (выйти электронам во внешнюю цепь через переходы мешают их поля, а вывод базы отсутствует). Объемные заряды воздействуют на эмиттерный переход и понижают его потенциальный барьер. Это вызывает дополнительную инжекцию дырок в область базы. Большинство этих дырок проходит через коллекторный переход. Управляющим сигналом (входным сигналом) в такой схеме является сигнал, поступающий через базу; в рассматриваемом случае это световой поток. Для такой схемы,

как мы видели у биполярных транзисторов, характерно усиление базового тока, то есть транзисторная структура более чувствительна к световым изменениям по сравнению с диодом. Фототранзисторы, как и фотодиоды, имеют металлический корпус, в которые вставляются тонкие стекла. Через эти стекла свет попадает на чувствительные слои фотоприборов. Фототранзисторы имеют такие же основные параметры, как и фотодиоды. В схемах применяется фототранзистор ФТ-1.

Фотодиоды, фототранзисторы (как и фоторезисторы) применяются в радиоэлектронных устройствах в качестве датчиков, реагирующих на световые изменения, но они более чувствительны (реагируют на меньшие световые приращения). Поэтому их используют чаще, чем фоторезисторы.

Последними разработками фотоприборов являются *фототиристоры*, которые используются в оптронах. По своему принципу действия фототиристор отличается от обычного транзистора тем, что действие напряжения управляющего электрода заменяется действием светового потока, воздействующего на одну из баз тиристора.

Светодиоды. Работа фотоприборов, имеющих один или несколько $p-n$ переходов, основана на возбуждении (генерации) парных носителей заряда электрон — дырка под действием света. Световая энергия при этом превращается в электрическую. А нельзя ли сделать наоборот: превратить электрическую энергию в световую? Оказывается, можно и это было осуществлено с помощью светодиодов. Основа светодиода — электронно-дырочный переход. При приложении к светодиоду прямого напряжения происходят два явления: инжекция носителей заряда через $p-n$ переход (это явление рассматривалось в обычном диоде) и излучение света при рекомбинациях пар электрон — дырка. Конечно, не все полупроводники способны при приложении к ним прямого напряжения создавать излучение. Этим свойством обладают лишь некоторые сложные полупроводниковые материалы, основой которых являются карбид кремния, галлий и мышьяк. В настоящее время разработаны материалы, создающие различное излучение — инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое. Светодиоды разработаны сравнительно недавно, но в настоящее время находят все большее применение. Они потребляют мало энергии, отличаются большим сроком службы, малогабаритны, удобны для индикации и вывода информации.

Часто применяют следующие типы светодиодов: КЛ101 (цвет свечения — желтый), АЛ102 (цвет свечения в зависимости от модификации может быть красный или зеленый), КЛ104 (цифровой индикатор).

Оптроны представляют собой комбинации из светодиода и какого-либо фотоприбора: фоторезистора, фотодиода, фототранзистора или фототиристора. Таким образом, оптрон — это пара из излучающего элемента и приемника этого излучения. Ее помещают в герметичный корпус.

При протекании через светодиод тока определенной силы происходит излучение, которое освещает чувствительные слои фотоприемников. В фотоприемниках световой сигнал преобразуется в электрический, который подается дальше в схему. Преобразуя электрический сигнал в световой, мы развязываем с помощью светового потока входную и выходную электрические цепи.

В зависимости от фотоприемника оптроны называют: *резисторный* (светодиод — фотосопротивление), *диодный* (светодиод-фотодиод), *транзисторный* (светодиод — фототранзистор), *тиристорный* (светодиод — тиристор).

В схемах оптроны обозначают буквой *V*. В качестве примера можно назвать резисторный оптрон АОР104А или тиристорный АОУ103В.

Микросхемы. В настоящее время эти полупроводниковые схемные элементы находят широкое применение при разработке новых радиоэлектронных устройств. Микросхема представляет собой группу миниатюрных радиоэлектронных узлов, выполненных на поверхности или в объеме твердых оснований (подложек). Микросхемы (их обычно называют интегральными) отличаются высокой плотностью монтажа, что позволяет изготавливать малогабаритную, экономичную и высоконадежную радиоэлектронную аппаратуру.

Микросхемы подразделяются на два основных вида: *аналоговые* и *цифровые*. Аналоговые микросхемы предназначены для преобразования и обработки сигналов. К аналоговым микросхемам относятся микросхемы, выполняющие функции усилителей, генераторов сигналов различной формы, преобразователей и пр.

Микросхемы, предназначенные для преобразования и обработки дискретных сигналов (сигналов, появляющихся лишь в определенные моменты времени), называют цифровыми. Частным случаем цифровых микросхем являются

логические микросхемы, осуществляющие логические операции (конъюнкции, дизъюнкции, инвертирования и т. д.)

В этой книге мы не будем подробно рассматривать работу микросхем и их применение, а ограничимся лишь тем, что укажем на обозначения микросхем в схемах. Аналоговые микросхемы обозначаются в схемах буквой А, а цифровые микросхемы — латинской буквой D.

На рис. 42, а приведен пример схемного обозначения аналоговой микросхемы К1УТ531. Треугольник внутри обозначения указывает, что микросхема работает в качестве усилителя. На рис. 42, б — пример цифровой микросхемы, выполняющей логическую операцию конъюнкции с отрицанием (ЗИ — НЕ). (Нумерация выводов не приведена, так как это может быть цифровая микросхема любой серии).

Маркировка полупроводниковых приборов. Условные обозначения полупроводниковых приборов, разработанных до 1964 г., состоят из двух или трех элементов. Первый элемент — буква: Д — для диодов, П — для транзисторов. Второй элемент — число, указывающее на область применения. Третий элемент — буква, указывающая на разновидность прибора.

Примеры обозначений: Д226А — диод плоскостной кремниевый, разновидность типа А; П16Б — транзистор маломощный, германиевый низкочастотный, разновидность типа Б.

В 1964 г. была введена новая система обозначений полупроводниковых приборов. По этой системе условное обозначение прибора состоит из четырех элементов.

Первый элемент — буква или цифра, указывающая исходный материал (Г или 1 — германий, К или 2 — кремний,

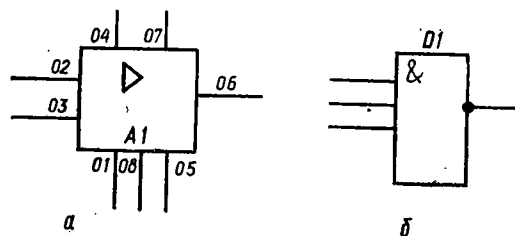


Рис. 42. Условные графические обозначения интегральных микросхем:
а — аналоговая микросхема; б — цифровая (логическая) микросхема

А или 3 — арсенид галлия). Обозначения, у которых первый элемент — буква, присвоены германиевым приборам, работающим при температурах до 60°С, и кремниевым, работающим при температурах до 85°С. Обозначения, начинающиеся с цифры, присвоены приборам, которые могут работать при более высоких температурах.

Второй элемент — буква, которая указывает на тип полупроводникового прибора (Д — выпрямительные, импульсные, универсальные диоды; Т — транзисторы; В — варикапы; А — сверхвысокочастотные диоды; Н и У — соответственно тиристоры диодные и триодные; И — туннельные диоды; С — стабилитроны; Ц — выпрямительные столбы и блоки; Ф — фотоприборы).

Третий элемент — число, указывающее на назначение прибора и его электрические свойства.

Четвертый элемент — буква указывает на разновидность типа данной разработки прибора (А, Б, В и т. д.).

Пример обозначения: КТ315А — транзистор кремниевый, малой мощности, высокочастотный, тип разработки А, предназначен для работы при температуре не выше 85°С.

Эта система обозначений применялась до 1973 г.

В настоящее время в соответствии с ГОСТом 10862—72 введена шестизначная система обозначений вновь разрабатываемых полупроводниковых приборов (приборы, разработанные раньше, чтобы не возникала путаница, продолжают маркировать прежними способами.).

В новой системе сохранено значение первого и второго элементов из системы обозначений, существовавшей с 1964 по 1973 г. Однако для второго элемента добавили новые буквы, характеризующие тип полупроводникового прибора (Л — излучающие диоды; Г — генераторы шума; К — стабилизаторы тока; П — полевые транзисторы; Б — приборы с объемным эффектом).

Третий элемент — число, указывающее на назначение прибора.

Четвертый и пятый элементы указывают порядковый номер разработки прибора и обозначаются от 01 до 99.

Шестой — на разновидность типа данной разработки прибора (буквы от А до Я).

Пример обозначения: ГТ605А — транзистор германиевый, средней мощности, высокочастотный, номер разработки 05, разновидность А, может работать при температурах до 60°С.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

В этой главе кратко рассмотрим основные соотношения, характеризующие постоянные и переменные токи, а также основные параметры импульсных сигналов.

1. Цепи постоянного тока

Ток, величина и направление которого постоянны во времени, называют *постоянным*. Ток протекает в цепи под действием источника электрической энергии. Его направление во внешней цепи от плюса источника к минусу, а внутри источника — от минуса к плюсу.

Источники энергии в электрических цепях принято рассматривать как источники ЭДС или как источники тока. К *источникам ЭДС* обычно относят источники электрической энергии, в которых ЭДС E практически не зависит от тока, идущего от источника через нагрузку, а внутреннее сопротивление r_0 мало. К *источникам тока* обычно относят источники электрической энергии, в которых ток практически не зависит от напряжения U , которое создается источником на нагрузке. Внутреннее сопротивление источников тока большое. Следует отметить, что при некоторых определенных условиях источник ЭДС и источник тока могут быть эквивалентны друг другу.

Наибольший интерес представляют источники ЭДС, поэтому продолжим их рассмотрение.

В электрической цепи (рис. 43) под действием ЭДС E возникает ток I , который определяется *законом Ома для полной цепи*:

$$I = \frac{E}{R + r_0}.$$

Согласно закону Ома, сила тока в замкнутой электрической цепи равна отношению ЭДС к полному сопротивлению цепи. Из этой формулы следует, что $E - Ir_0 = IR$. Раз-

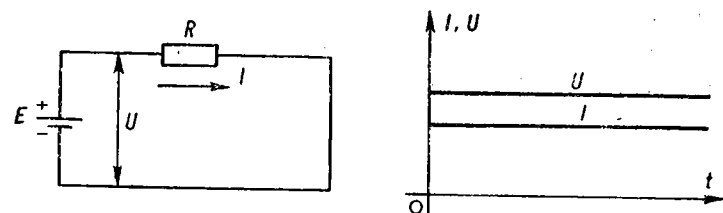


Рис. 43. Цепь постоянного тока и зависимость тока и напряжения от времени.

ность $E - Ir_0$ является напряжением U источника электрической энергии: $E - Ir_0 = U$, или $U = IR$, откуда ток $I = U/R$.

Последнее выражение является *законом Ома для участка цепи*.

Зная напряжение на участке цепи и ток, который проходит через этот участок, можно определить его сопротивление: $R = U/I$.

Основной единицей напряжения является вольт (В). В практике радиолюбительства пользуются и более мелкими единицами — милливольтами (мВ) и микровольтами (мкВ):

$$1 \text{ В} = 1000 \text{ мВ}; 1 \text{ мВ} = 1000 \text{ мкВ}; 1 \text{ В} = 10^6 \text{ мкВ}.$$

Основной единицей силы тока является ампер (А). Более мелкими единицами являются миллиампер (мА) и микроампер (мкА):

$$1 \text{ А} = 1000 \text{ мА}; 1 \text{ мА} = 1000 \text{ мкА}; 1 \text{ А} = 10^6 \text{ мкА}.$$

При прохождении тока через активное сопротивление нагрузки R_n на нем выделяется тепло. Мощность P , затрачиваемая на выделение тепла при протекании тока I через сопротивление R под действием напряжения U , определяется по формуле: $P = UI$, или $P = U^2/R$; $P = I^2R$. Если I выражается в амперах, U — в вольтах, R — в омах, то мощность P выражается в ваттах (Вт). Более мелкими единицами мощности в полупроводниковой технике являются милливатт (мВт) и микроватт (мкВт):

$$1 \text{ Вт} = 1000 \text{ мВт}; 1 \text{ мВт} = 1000 \text{ мкВт}; 1 \text{ Вт} = 10^6 \text{ мкВт}.$$

2. Цепи переменного тока

Переменным называют ток, который изменяет свое направление и значение. Ток, изменяющий лишь свое значение, называют *пульсирующим*.

Изобразим графически переменный ток, значение которого изменяется по синусоидальному (гармоническому) закону (рис. 44).

Наибольшее значение силы тока или напряжения при их периодических изменениях называют *амплитудным значением* или просто *амплитудой* (I_m , U_m), а текущие значения — *мгновенными* и обозначают малыми буквами (i , u). Амплитудное значение является частным случаем из множества мгновенных значений.

К основным параметрам колебаний относятся период и частота колебаний.

Период колебаний T — это время, в течение которого периодически изменяющаяся величина (например, i или u) проходит полный цикл своего изменения, после которого значения этой величины повторяются в прежней последовательности.

Частота колебаний f — это количество периодов за одну секунду. Частота является величиной, обратной периоду: $f = 1/T$, и измеряется в герцах (Гц). Один герц равен одному периоду в секунду. Чем больше колебаний происходит за секунду, тем выше (больше) частота этих колебаний. Частота колебаний напряжения в осветительной сети в нашей стране равна 50 Гц — это низкая частота.

Частоту измеряют в герцах, килогерцах (кГц) и мегагерцах (МГц): $1\text{ МГц} = 10^3\text{ кГц} = 10^6\text{ Гц}$; $1\text{ кГц} = 10^3\text{ Гц}$.

Рассматривают также круговую (циклическую) частоту ω (омега). Круговая частота — это количество периодов за 2π (6,28) секунд: $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$.

Рассматривают также *действующее (эффективное) значение* величины, изменяющейся по синусоидальному за-

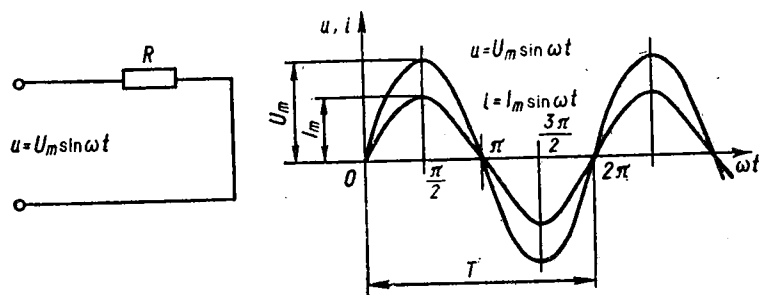


Рис. 44. Цепь переменного тока с активным сопротивлением и зависимость тока и напряжения во времени.

кону. Действующее значение переменного тока (I) или переменного напряжения (U) вводят для того, чтобы сравнить, как действуют переменный и постоянный токи на какую-либо активную нагрузку (например, резистор). Его значение в $\sqrt{2}$ раза меньше амплитудного значения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,7I_m; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,7U_m.$$

В цепях переменного тока в качестве сопротивлений используются активное сопротивление (резисторы), индуктивное (катушки индуктивности) и емкостное (конденсаторы).

Переменный ток воздействует на резистор, как и постоянный, — выделяет тепловую энергию.

Катушка индуктивности оказывает переменному току *индуктивное сопротивление* X_L , которое вычисляется по формуле: $X_L = 2\pi fL$, или $X_L = \omega L$.

Если индуктивность L измеряется в генри, а частота f — в герцах, то X_L выражается в омах.

Конденсатор также оказывает сопротивление переменному току. Оно называется *емкостным сопротивлением* X_C и вычисляется по формуле: $X_C = 1/2\pi fC$, или $X_C = 1/\omega C$.

Если емкость C измеряется в фарадах, а f — в герцах, то X_C выражается в омах.

Из формул видно, что индуктивное сопротивление X_L с увеличением частоты f также увеличивается, а емкостное сопротивление X_C уменьшается. С уменьшением частоты картина будет обратная. Катушки индуктивности и конденсаторы называются *реактивными элементами*, в отличие от резисторов, которые являются *активными*. Реактивные элементы периодически накапливают энергию, а затем возвращают ее источнику.

3. Последовательный и параллельный колебательные контуры

Если последовательно соединить емкость, индуктивность и активное сопротивление (рис. 45), а затем эту цепочку подключить к источнику переменного напряжения, то получим так называемый *последовательный колебательный контур*. Фактически сопротивление R в цепочку не включается, а просто выражает те потери, которые проис-

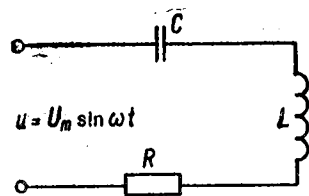


Рис. 45. Последовательный колебательный контур.

ходят в контуре. Если частота колебаний напряжения источника совпадает с частотой собственных колебаний контура, то наступает явление, называемое *резонансом*. Оно замечательно тем, что при этом наступает равенство индуктивного и емкостного сопротивлений: $X_L = X_C$.

Из этого равенства можно определить частоту, при которой происходит резонанс при заданных значениях емкости и индуктивности контура. Мы знаем, что $X_L = 2\pi fL$ и $X_C = 1/2\pi fC$, то есть, при резонансе $2\pi fL = 1/2\pi fC$, откуда $f_{\text{рез}}^2 = 1/(2\pi)^2 LC$, или $f_{\text{рез}} = 1/2\pi \sqrt{LC}$.

Резонанс, возникающий в последовательном колебательном контуре, называется *резонансом напряжений*. При этом резонансе значения напряжений, которые возникают на конденсаторе и катушке индуктивности, намного превосходят значение напряжения источника, которое подводится к контуру. Следует иметь в виду, что последовательный колебательный контур целесообразно подключать к источнику с малым внутренним сопротивлением.

При соединении конденсатора и катушки индуктивности параллельно друг другу и подключении их к источнику переменного напряжения образуется параллельный колебательный контур (рис. 46). Он находит большее применение в радиоэлектронных устройствах, чем последовательный. Параллельный контур обычно применяется при источниках напряжения с большим внутренним сопротивлением. Отметим, что при таком соединении конденсатора и катушки индуктивности активное сопротивление включается только в цепь индуктивности последовательно с ней. Сопротивлением в цепи емкости обычно пренебрегают.

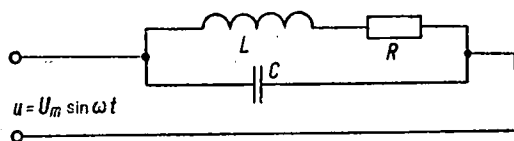


Рис. 46. Параллельный колебательный контур.

При резонансной частоте в параллельном контуре также наступает равенство индуктивного и емкостного сопротивлений, при этом резонанс в параллельном контуре называют *резонансом токов*, так как токи, протекающие через емкость и индуктивность, во много раз превосходят общий ток, проходящий через параллельный контур. В момент резонанса сопротивление контура достигает наибольшего значения.

Последовательные и параллельные контуры, реагирующие на сигналы определенных частот, применяют в резонансных усилителях.

4. Импульсные сигналы

Импульсные сигналы широко применяются в радиоэлектронной технике; область радиоэлектроники, изучающая вопросы формирования импульсных сигналов и их прохождения через электрические цепи называется *импульсной техникой*.

Импульсный сигнал может состоять из одного или серии (последовательности) импульсов. Одиночный импульсный сигнал (импульс) — это кратковременное воздействие тока или напряжения на импульсное устройство либо цепь.

Импульсы могут иметь различную форму: прямоугольную, треугольную, экспоненциальную, колокольную и др. Часто применяются прямоугольные импульсы, параметры периодической последовательности которых мы и рассмотрим. К основным параметрам импульсной последовательности относятся (рис. 47):

а) *период следования импульсов* T_n — интервал времени от момента появления одного импульса до момента появления следующего той же полярности. Период следования

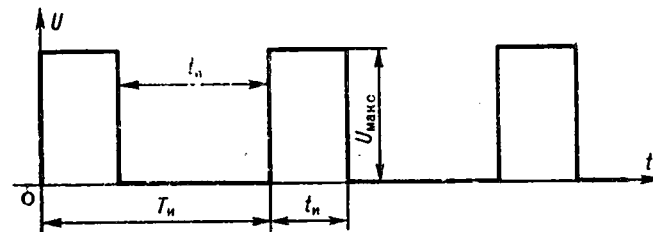


Рис. 47. Периодическая последовательность импульсов.

импульсов чаще всего выражается в микросекундах или миллисекундах;

б) величина, обратная T_n , называется *частотой следования импульсов* f_n . Ее измеряют в герцах (Гц), килогерцах (кГц) и мегагерцах (МГц);

в) *длительность импульсов* t_n ;

г) *длительность паузы* t_p — время между моментами окончания одного импульса и начала другого. Длительность паузы можно определить из соотношения: $t_p = T_n - t_n$;

д) *амплитуда импульсов* $U_{\text{макс}}$;

е) *скважность импульсов* $Q = T_n/t_n$ — отношение периода следования T_n к длительности импульса t_n .

Конечно, форма прямоугольных импульсов, вырабатываемых схемными генераторами (например, мультивибраторами) далеко не идеальна, однако это не мешает перенести рассмотренные параметры по идеальной форме на реальную импульсную последовательность.

Глава III.

УЗЛЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

После рассмотрения отдельных элементов полупроводниковых устройств можно перейти к ознакомлению с принципом действия и способами построения отдельных схемных узлов, которые можно использовать самостоятельно или в составе различных электрических схем.

1. Транзисторные усилители

Транзисторные усилители являются основой построения многих схем. *Усилитель* — это устройство, предназначенное для увеличения мощности электрических сигналов без изменения их формы. На выходе любого усилителя мощность полезного сигнала больше, чем на входе.

Процесс усиления электрических сигналов состоит в преобразовании энергии постоянного тока источника питания усилителя в энергию создаваемых выходных сигналов. В схеме усилителя транзистор выполняет роль *переменного сопротивления*, включенного в цепь источника питания, за счет энергии которого и создаются выходные сигналы. На это следует обратить особое внимание, ибо в усилителе транзистор не является источником электрической энергии и усиленных входных сигналов. Транзистор, выполняющий роль переменного сопротивления, вместе с сопротивлением нагрузки образуют делитель напряжения источника питания (рис. 48).

В транзисторном усилителе управляемой цепью является коллекторная цепь, а управляющей — базовая. В рассматриваемом случае (рис. 48) базовая цепь управляет положением движка резистора $R_{\text{транз}}$, изменяя его сопротивление. В соответствии с этим на сопротивлении нагрузки R_n изменяется выделяемая здесь мощность выходного сигнала.

В настоящее время разработано и используется большое количество разнообразных схем транзисторных усилителей, которые отличаются друг от друга назначениями, применяемыми транзисторами и режимами работы.

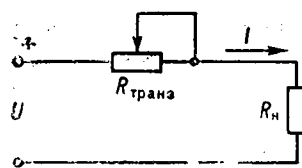


Рис. 48. Эквивалентная схема коллекторной цепи транзистора.

Усилители, предназначенные для усиления слабых сигналов, называют *усилителями напряжения*, или *предварительными усилителями*. Усилители, в которых мощность сигнала усиливается до необходимой величины, называют *усилителями мощности*, или *выходными каскадами усилителей*.

В зависимости от рабочего диапазона частот есть усилители постоянного тока (УПТ), низкой частоты (УНЧ), промежуточной частоты (УПЧ), высокой частоты (УВЧ) и сверхвысокой частоты (УСВЧ). Свои особенности имеют и усилители импульсных сигналов.

Применение одного усилительного каскада обычно не может обеспечить необходимого усиления, поэтому транзисторные схемы в большинстве многокаскадные.

Для передачи энергии сигнала с предшествующего каскада на последующий применяются различные виды *связи*. В качестве элементов связи можно использовать резисторы, конденсаторы, и тогда связь называется *резистивно-емкостной*. Если применяются катушки индуктивности или трансформаторы, связь называется *индуктивной*, или *трансформаторной*. В настоящее время довольно часто используется непосредственная связь: в этом случае управляющий электрод последующего транзистора подключают к выходному электроду предыдущего.

По характеру нагрузки транзистора усилители делят на *апериодические (неизбирательные)* и *резонансные (избирательные)*. На входе апериодических усилителей обычно действуют сигналы только одного источника. На входе резонансных усилителей одновременно могут действовать сигналы различных источников. Задача такого усилителя состоит в преимущественном (избирательном) усилении только тех сигналов, на частоту которых настроена нагрузка транзистора. Такой нагрузкой обычно бывает один или несколько резонансных контуров.

Различают *усилители напряжения*, *усилители тока* и *усилители мощности*. В усилителе напряжения всегда выходное напряжение больше входного $U_{\text{вых}} > U_{\text{вх}}$. В усилителе тока или мощности это условие может и не выполняться.

Применение транзисторов не ограничивается их использованием в каскадах УНЧ, УПЧ или УВЧ. Существуют устройства, где используются усилительные свойства транзисторов.

Рассмотрим построение и возможности некоторых основных каскадов транзисторных схем, которые представляют интерес для начинающих радиолюбителей. Эти схемы сами находят практическое применение, а кроме того, являются основой при построении более сложных усилительных каскадов.

Установка режима работы транзисторов. Для того чтобы транзистор проявил свои усилительные возможности, необходимо установить тот или иной режим его работы по постоянному току. Режим работы по постоянному току (режим покоя) рассматривают при отсутствии усиливаемого входного сигнала. Этот режим транзистора характеризуется постоянными токами (например, ток покоя коллектора $I_{\text{кп}}$) и постоянными напряжениями (например, напряжение покоя коллектора $U_{\text{кп}}$). Установка режима обеспечивается с помощью источников питания и активных сопротивлений, совокупность которых называют *схемой смещения*.

Когда мы раньше рассматривали свойства транзистора, то для его питания использовали два источника питания. Для питания же практических транзисторных схем используется обычно один источник питания, что и вызывает появление схем смещения.

К основным схемам смещения при создании режима по постоянному току транзистора относятся схема с делителем напряжения в цепи базы и схема с фиксированным током базы (рис. 49). В таком виде эти схемы смещения применяются редко, ибо не позволяют уменьшить влияния обратного тока коллектора $I_{\text{кб}}$ на ток коллектора $I_{\text{к}}$, а также уменьшить влияние технологического разброса коэффициента усиления транзисторов (этот разброс существует у каждого типа транзисторов) на коэффициент усиления усилителя. Поэтому схемы смещения дополняют схемными элементами (в основном резисторами), которые создают в усилителях элементы отрицательной обратной связи, уменьшающей влияние рассмотренных причин изменения тока коллектора.

Стабильность тока коллектора, которая обеспечивается той или иной схемой смещения, принято оценивать *коэффици-*

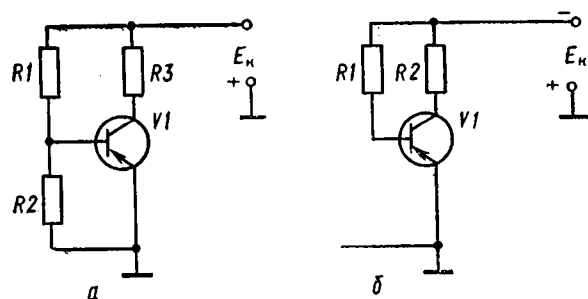


Рис. 49. Основные схемы смещения:
а — с делителем напряжения в цепи базы; б — с фиксированным током базы.

центом неустойчивости S : $S = \Delta I_k / \Delta I_{ko}$, где ΔI_{ko} — приращение обратного тока коллектора; ΔI_k — приращение тока коллектора, вызванное приращением обратного тока коллектора ΔI_{ko} . Чем меньше значение S , тем выше стабильность тока коллектора.

Более подробно с элементами схем смещения, отрицательной обратной связи и т. д. лучше познакомиться на конкретных усилителях.

Усилитель с резистивно-емкостной связью. Мы уже знаем, что в зависимости от того, какой электрод транзистора является общим, различают схемы с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором. Рассмотрим схемы усилителей с общими эмиттером и коллектором, как наиболее распространенные в радиолюбительской практике.

Схема усилителя с общим эмиттером (рис. 50) получила весьма широкое распространение. Из рисунка видно, что усилитель имеет схему смещения в виде делителя напряжения (резисторы $R1, R2$) в цепи базы транзистора, а также другие элементы.

В изображенной схеме использован транзистор структуры $p-n-p$, поэтому коллекторная цепь транзистора подключается к минусу источника постоянного тока E_k , а эмиттерная цепь — к его плюсу. Если бы использовался транзистор структуры $n-p-n$, то полярность источника нужно было бы изменить на обратную.

Напряжение источника питания обычно бывает заданным, поэтому транзистор усилителя подбирают под это напряжение: нужно, чтобы допустимое напряжение между коллектором и эмиттером выбранного транзистора по вели-

чине превосходило напряжение источника питания. При выборе транзистора следует обращать внимание также на величину тока I_{ko} , которая у кремниевых транзисторов значительно меньше, чем у германиевых.

В радиолюбительской практике при расчетах цепей обычно используют простые формулы, которые являются приближенными. Эти формулы будем использовать для расчета параметров элементов усилительных каскадов.

Сопротивление в цепи коллектора R_k обычно определяется по формуле: $R_k = 0,4 E_k / I_{kp}$.

Если производится расчет элементов предварительного усилителя, ток покоя коллектора обычно находится в пределах 0,5—2 мА и в среднем принимают для расчета $I_{kp} = 1$ мА.

При изменении температуры окружающей среды изменяется ток I_{ko} , что приводит к изменению режима работы усилителя. Для уменьшения влияния температуры применяют схемы автоматической стабилизации режима усилителя по постоянному току.

Напряжение смещения на базу подается от делителя напряжения $R1$ и $R2$. Сопротивление этих резисторов мало зависит от температуры, поэтому и напряжение смещения на базе можно считать практически постоянным. Дальнейшую стабилизацию режима поддерживает резистор R_3 , который выполняет роль элемента, осуществляющего отрицательную обратную связь в усилителе. При повышении температуры возрастает I_{ko} , при этом увеличивается ток покоя коллектора I_{kp} . Произойдет увеличение и эмит-

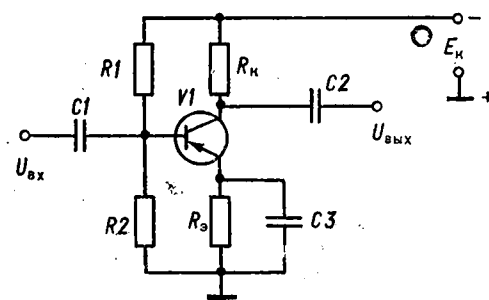


Рис. 50. Схема аperiodического усилителя с общим эмиттером и фиксированным напряжением базы.

терного тока покоя $I_{\text{эп}}$, в результате чего напряжение на сопротивлении резистора R_3 возрастает; при этом падает напряжение между базой и эмиттером транзистора, что, в свою очередь, вызывает уменьшение тока $I_{\text{кп}}$. В результате этих взаимодействий при возрастании температуры ток $I_{\text{кп}}$ увеличивается незначительно.

Сопротивление резистора R_3 можно определить из следующего соотношения: $R_3 = (0,1 - 0,3) E_{\text{к}} / I_{\text{кп}}$.

Теперь остановимся на выборе сопротивлений резисторов $R1$ и $R2$. Обычно сопротивление резистора $R1$ в несколько раз больше сопротивления резистора $R2$. Сопротивление резистора $R2$ выбирается примерно в 2—5 раз больше сопротивления R_3 .

Сопротивление резистора $R1$ можно определить по такой приближенной формуле:

$$R_1 = 2,4 \cdot \frac{E_{\text{к}} - I_{\text{кп}} R_3}{I_{\text{кп}}};$$

если $E_{\text{к}}$ измеряется в вольтах, $I_{\text{кп}}$ — в миллиамперах, R_3 — в килоомах, то $R1$ — в килоомах.

Емкость конденсатора в цепи эмиттера $C3$ выбирают из условия устранения отрицательной обратной связи по переменному току: $C_3 = 5000 I_{\text{эп}} / F_{\text{н}}$, где $F_{\text{н}}$ — низшая частота усиливаемого сигнала; $I_{\text{эп}}$ — ток покоя эмиттера, мА.

В усилителях НЧ частота $F_{\text{н}}$ выражается в герцах, при этом емкость $C3$ выражается в микрофарадах. В усилителях ВЧ частота $F_{\text{н}}$ выражается в мегагерцах, тогда емкость $C3$ — в пикофарадах.

Тогда, когда хотят иметь действие отрицательной обратной связи по переменному току, резистор R_3 не шунтируют конденсатором. При отсутствии конденсатора $C3$ коэффициент усиления усилителя по напряжению K_U определяется отношением сопротивлений $R_{\text{к}}$ и R_3 , даже при самых больших значениях β : $K_U = R_{\text{к}} / R_3$.

К этому способу прибегают обычно в тех случаях, когда нужен усилитель, у которого усиление по напряжению мало зависит от разброса величины коэффициента β применяемых транзисторов.

Имеются и такие разработки усилителей, у которых в цепи эмиттера отсутствует сопротивление R_3 . Это приводит к тому, что усиление зависит от коэффициента усиления β , что в большинстве случаев нежелательно. Поэтому в цепь эмиттера следует включать хотя бы небольшое сопротивление

в 100—150 Ом (нужно помнить, что это касается предварительных усилителей).

Конденсаторы $C1$ и $C2$ называются *разделительными*. Эти конденсаторы позволяют отделить усилительный каскад по постоянному току от источника входного сигнала и нагрузки, и в то же время обеспечивают связь по переменному току. Емкости разделительных конденсаторов (их часто называют переходными) выбирают такими, чтобы их сопротивление на самых низких усиливаемых частотах $F_{\text{н}}$ было меньше входного сопротивления последующего усилительного каскада или оконечной нагрузки по крайней мере в 5—6 раз; тогда их сопротивлениями для усиливаемых переменных сигналов можно пренебречь. Емкости этих конденсаторов выбирают в соответствии с выражением $C \geq 1000 / F_{\text{н}} R_{\text{вх}}$, где $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление последующего усилительного каскада или нагрузки, кОм.

Если частота $F_{\text{н}}$ — в герцах, то емкость C выражается в микрофарадах, если $F_{\text{н}}$ в мегагерцах, то C выражается в пикофарадах.

При среднем значении $R_{\text{вх}} \approx 1$ кОм в усилителе НЧ ($F_{\text{н}} = 100$ Гц) емкость $C \geq 1000 / 100 \cdot 1 = 10$ мкФ. В усилителе ВЧ ($F_{\text{н}} = 0,15$ МГц) емкость $C \geq 1000 / 0,15 \cdot 1 = 6600$ пФ.

Из этих простых расчетов можно также понять, почему емкости разделительных конденсаторов так отличаются по своей величине для сигналов высоких частот и низких частот.

На рис. 51 изображена схема усилителя с общим эмиттером, но уже с фиксированным током базы. Фиксирован-

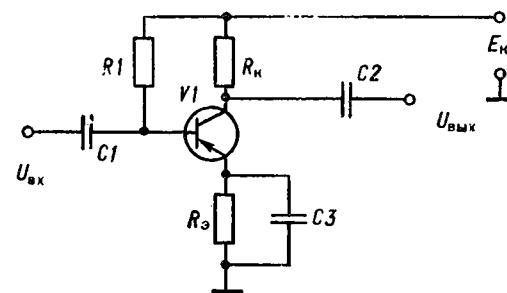


Рис. 51. Схема аperiodического усилителя с общим эмиттером и фиксированным током базы.

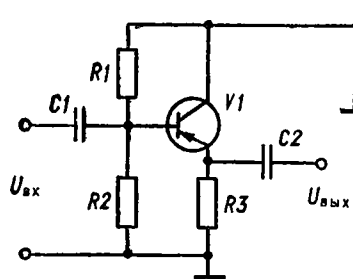


Рис. 52. Схема эмиттерного повторителя.

ный ток базы получается за счет того, что сопротивление резистора $R1$ выбирается намного больше входного сопротивления усилителя. Тогда ток покоя базы $I_{бп}$ можно определить по формуле: $I_{бп} = E_k / R_1$.

Эта формула написана в предположении, что входное сопротивление усилителя по сравнению с $R1$ мало и им можно прене-

бречь. Из формулы видно, что ток покоя базы $I_{бп}$ не зависит от типа и параметров транзистора.

Зная ток покоя базы и коэффициент усиления транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером β , можно определить коллекторный ток покоя $I_{кп}$; $I_{кп} = \beta I_{бп}$.

Определив $I_{кп}$ и зная величину E_k , можно определить сопротивления R_k и R_z аналогично случаю, рассмотренному выше. Емкости конденсаторов $C1$, $C2$ и $C3$ определяют так же, как и в предыдущем случае.

Другой весьма распространенной схемой усилителя является *усилитель с общим коллектором — эмиттерный повторитель* (рис. 52). Его основное отличие от схемы усилителя с общим эмиттером в том, что нагрузку включают в эмиттерную цепь транзистора, чем вводится отрицательная обратная связь. Схемы смещения, применяемые в эмиттерных повторителях, такие же, как и для схемы с общим эмиттером: с фиксированным напряжением базы или фиксированным током базы. Сопротивление резистора R_z обычно в пределах 1—5 кОм. Входное сопротивление эмиттерного повторителя велико и лежит в пределах от десятков до сотен килоом, а выходное сопротивление мало. Поэтому эмиттерные повторители часто используют для согласования усилительных каскадов, имеющих малое входное и большое выходное сопротивления, а также как оконечные (выходные) усилительные каскады, работающие на низкоомную нагрузку. Расчет и выбор элементов эмиттерного усилителя практически ничем не отличается от расчетов, рассмотренных для усилителя с общим эмиттером.

Большое применение в практических радиоэлектронных схемах находят *апериодические усилители* с непосредствен-

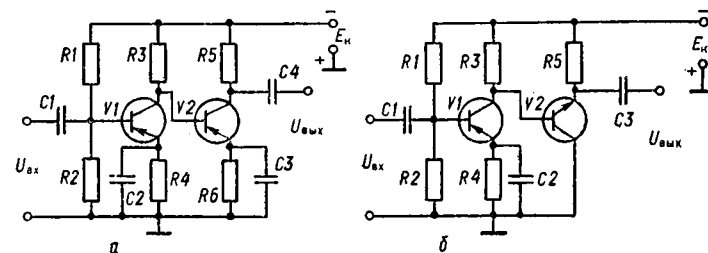


Рис. 53. Апериодические усилители с непосредственной связью: а — усилитель на транзисторах одинаковой структуры; б — усилитель на транзисторах различной структуры.

ной связью, которые по сравнению с усилителями с резистивно-емкостной связью содержат меньше резисторов и конденсаторов. Для создания необходимого смещения на входном электроде последующего каскада используется постоянное напряжение на выходном электроде предшествующего каскада, то есть здесь роль делителя напряжения выполняет предшествующий каскад усиления. Непосредственную связь между усилителями иногда называют *гальванической связью*.

Усилители, приведенные на рис. 53, являются примерами усилителей с непосредственной связью. На рис. 53, а представлена схема двухкаскадного усилителя с непосредственной связью, в котором использованы транзисторы типа $p - n - p$. Оба транзистора включены по схеме с общим эмиттером. Первый каскад практически ничем не отличается от схемы на рис. 50. Однако подключение базы транзистора $V2$ непосредственно к коллектору транзистора $V1$ дает возможность исключить один переходной конденсатор и два резистора в цепи смещения транзистора $V2$.

На рис. 53, б дана также схема двухкаскадного усилителя с непосредственной связью. В этом усилителе использованы транзисторы типов $p - n - p$ и $n - p - n$. Второй транзистор включен по схеме с общим коллектором.

Непосредственная связь между транзисторами усилителя позволяет образовать так называемые *составные транзисторы* (рис. 54). Соединение двух транзисторов (рис. 54, а) можно рассматривать как один составной — с базовым, коллекторным и эмиттерным выводами (точки Б, К, Э). Коэффициент усиления такого транзистора во много раз больше, чем у любого из его составляющих, он равен произведению их коэффициентов усиления: $\beta = \beta_1 \beta_2$.

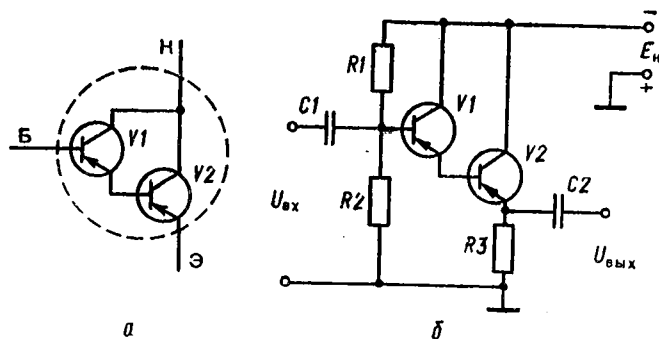


Рис. 54. Схема усилителя на составном транзисторе.

Составные транзисторы рекомендуется использовать в режиме эмиттерного повторителя, так как вследствие большого коэффициента усиления включение в цепь эмиттера даже малого сопротивления увеличивает входное и снижает выходное сопротивление каскада.

Усилительный каскад, которым заканчивается усилитель радиоэлектронного устройства и к которому непосредственно подключается полезная нагрузка, называют *выходным*. В выходных каскадах используются как маломощные транзисторы, так и транзисторы средней и большой мощности — все зависит от нагрузки усилителя.

Согласование выходного каскада усилителя с нагрузкой может быть непосредственное или через выходной трансформатор. За последнее время разработаны специальные схемы выходных каскадов для непосредственного подключения нагрузки, что позволяет избежать во многих случаях применения трансформаторов, которые утяжеляют конструкцию радиоэлектронных устройств и плохо вписываются в общий состав полупроводниковых схемных элементов.

2. Мультивибраторы

Мультивибраторы — это генераторы электрических колебаний, форма которых близка к прямоугольной. Такие генераторы широко применяются в различных радиоэлектронных устройствах. Их можно использовать в качестве переключающих устройств, имитаторов различных звуков, генераторов звуковых колебаний и т. д.

Слово «мультивибратор» состоит из двух частей: *мульти* — много и *вибро* — колеблюсь, то есть это источник множества колебаний. Это справедливо, так как прямоугольные колебания, генерируемые мультивибратором, можно разложить на множество гармонических колебаний, частота которых кратна частоте прямоугольных колебаний.

По режиму работы мультивибраторы подразделяются на автоколебательные (самовозбуждающиеся) и ждущие. Когда на *автоколебательный мультивибратор* подается напряжение питания, он начинает генерировать прямоугольные импульсы. *Ждущий мультивибратор* генерирует импульсы лишь под воздействием электрических импульсов, поступающих от внешних источников.

На рис. 55, а представлена схема мультивибратора с резистивно-емкостной связью. Мультивибратор представляет собой двухкаскадный аperiodический усилитель. Транзистор $V1$, его нагрузочный резистор $R1$ и базовый резистор $R3$ образуют один каскад, а транзистор $V2$ и резисторы $R2$ и $R4$ — другой. Выходное напряжение с коллектора транзистора $V1$ через конденсатор $C1$ подается в цепь базы транзистора $V2$, а выходное напряжение с коллектора транзистора $V2$ через конденсатор $C2$ поступает в цепь базы транзистора $V1$. Благодаря такой взаимосвязи (положительная обратная связь) двухкаскадный усилитель превращается в мультивибратор. В мультивибраторах, построенных по такой схеме, используют различные маломощные низкочастотные и высокочастотные транзисторы с коэффициентом усиления $\beta = 20 — 30$. Поскольку транзисторы имеют значительный разброс параметров, нужно ориенти-

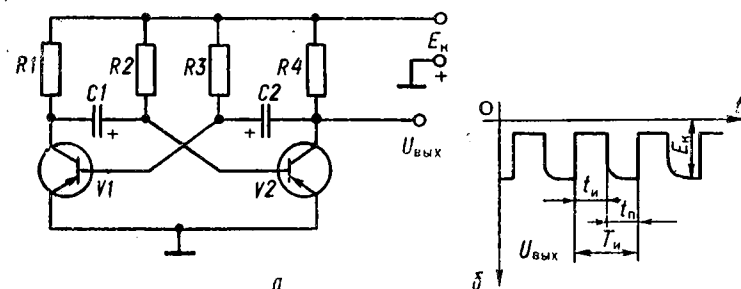


Рис. 55. Схема мультивибратора (а) и форма генерируемого напряжения (б).

роваться на минимальное значение β , гарантированное для данного типа транзистора. Сопротивления резисторов $R1$ и $R4$ обычно имеют одинаковые значения. Минимальное значение этих сопротивлений ограничивается максимальным током коллектора и в среднем составляет несколько килоом.

Если мультивибратор генерирует импульсы, длительность которых (t_n) равна паузам (t_p) между ними, то его называют *симметричным*. В симметричном мультивибраторе должно выполняться условие равенства емкостей конденсаторов связи $C1$ и $C2$, а также сопротивлений резисторов $R2$ и $R3$ (эти резисторы называют базовыми). Сопротивление резистора $R2$ (или $R3$) обычно выбирается из примерного соотношения: $R2 \approx 10 R_1$ (или $R3 \approx 10 R_4$). Частоту колебаний симметричного мультивибратора можно приблизительно определить по формуле: $f \approx 1/RC$, где f — частота повторения импульсов в герцах, R — сопротивление базовых резисторов в омах, C — емкость конденсаторов связи в фарадах.

Из формулы видно, что изменять частоту повторения можно, если изменять при этом величину емкостей связи или сопротивления базовых резисторов.

Амплитуду импульсов можно изменять, регулируя напряжения источника питания E_k , а также сопротивления коллекторных нагрузок (сопротивления $R1$ и $R4$).

При автоколебательном режиме работы мультивибратора транзисторы поочередно переходят из одного состояния (открытого) в другое (закрытое). В результате этого на выходе схемы возникают импульсы прямоугольной формы. Выходное напряжение можно снимать с коллектора транзистора $V1$ или $V2$ (или, как говорят, с любого плеча мультивибратора).

Рассмотрим принцип работы симметричного мультивибратора (рис. 55). Пусть на транзисторы обоих плечей мультивибратора подано напряжение питания E_k . Схему считаем симметричной, то есть $R1 = R4$, $R2 = R3$, $C1 = C2$, транзисторы $V1$ и $V2$ — одного типа. В момент подачи питания оба транзистора открываются, так как на их базы через резисторы $R1$ и $R3$ подается отрицательное напряжение смещения. При этом начинается заряд конденсаторов связи. Конденсатор $C1$ заряжается через открытый эмиттерный переход транзистора $V2$ и резистор $R1$. Ток заряда конденсатора протекает от плюса источника напряжения

к его минусу. Поэтому, если в качестве конденсаторов связи используются полярные конденсаторы, то к базам транзисторов подсоединяются их положительные обкладки (при транзисторах структуры $p-n-p$). При транзисторах структуры $n-p-n$ к базам нужно подсоединять отрицательные обкладки конденсаторов.

Конденсатор $C2$ заряжается через эмиттерный переход транзистора $V1$ и резистор $R4$. Цепи заряда конденсаторов связи являются делителями напряжения источника питания. По мере заряда конденсаторов они создают на базах транзисторов (относительно эмиттеров) возрастающие положительные напряжения, стремящиеся закрыть транзисторы. Хотя мы и оговорили равенство схемных элементов симметричного мультивибратора, но на практике такие равенства точно не выполняются. Различия, хотя и небольшие могут быть в коэффициентах усиления транзисторов, в номинальных значениях сопротивлений резисторов или емкостей конденсаторов. Это приводит к тому, что один транзистор оказывается открытым, а другой закрытым.

Рассмотрим это подробнее.

Пусть коллекторный ток транзистора $V1$ по каким-либо причинам немного увеличится. Тогда напряжение на коллекторе транзистора $V1$ несколько понизится. Это изменение напряжения на коллекторе транзистора $V1$ через конденсатор связи $C1$ передается на базу транзистора $V2$ и понижает на ней отрицательное напряжение. В результате уменьшается базовый ток транзистора $V2$, а затем — коллекторный ток этого транзистора. Отрицательное напряжение на коллекторе транзистора $V2$ повысится, а это отрицательное приращение напряжения через конденсатор связи $C2$ передается на базу транзистора $V1$, вызывая увеличение базового и коллекторного токов транзистора $V1$. Напряжение на коллекторе транзистора $V2$ снова понижается, что вызывает дальнейшее понижение отрицательного напряжения на базе транзистора $V2$, уменьшение базового и коллекторного токов в этом каскаде и т. д.

Таким образом, процессы, происходящие в мультивибраторе, стремятся увеличить случайно появившуюся несимметрию. Эти процессы протекают очень быстро, и уже через промежуток времени, измеряемый долями микросекунды, транзистор $V1$ окажется полностью открытым, а $V2$ закрытым. С этого момента через открытый транзистор $V1$ (через сопротивление участка коллектор—эмиттер)

и резистор $R2$ начинает разряжаться конденсатор $C1$. Разряд конденсатора приводит к тому, что напряжение на его обкладках уменьшается. При этом соответственно уменьшается и положительное напряжение на базе закрытого транзистора $V2$.

Затем наступает момент, когда конденсатор $C1$ полностью разряжается, и напряжение на базе транзистора $V2$ станет близким к нулю. С этого момента в коллекторной цепи транзистора $V2$ появляется ток, вызывающий понижение отрицательного напряжения на коллекторе. Это приращение напряжения через конденсатор связи $C2$ воздействует на базу транзистора $V1$ и понижает отрицательное напряжение. В результате коллекторный ток в транзисторе $V1$ уменьшается, а в транзисторе $V2$, наоборот, увеличивается. Это приводит к тому, что транзистор $V1$ закрывается, а транзистор $V2$ открывается. Теперь начнет разряжаться конденсатор $C2$ и заряжаться конденсатор $C1$. Конденсатор $C2$ разряжается через открытый транзистор $V2$ и резистор $R3$. После разрядки конденсатора $C2$ снова откроется транзистор $V1$ и закроется транзистор $V2$ и т. д. Транзисторы автоколебательного мультивибратора через конденсаторы связи все время воздействуют друг на друга, в результате чего происходит генерация электрических колебаний в виде прямоугольных импульсов.

Переход транзисторов из одного состояния в другое происходит почти мгновенно. Вслед за этим — относительно медленный процесс зарядки и разрядки конденсаторов связи до следующего момента закрывания одного и открывания другого транзистора.

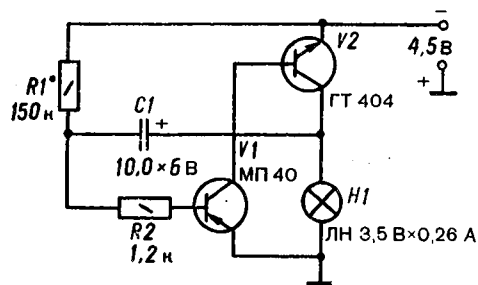


Рис. 56. Схема несимметричного мультивибратора на транзисторах различной структуры.

Форму напряжения, генерируемого мультивибратором, видно на рис. 55, б. Обычно амплитуда импульса меньше напряжения питания на 0,5—1,0 В.

Если в рассмотренной схеме мультивибратора сделать неравными емкости конденсаторов связи или сопротивления резисторов $R2$ и $R3$, получим *несимметричный мультивибратор*. Такой мультивибратор генерирует импульсы, длительность которых не равна длительности паузы. Несимметричные мультивибраторы, выполненные по двухкаскадной схеме на транзисторах одинаковой структуры, применяются очень часто. В последнее время получили распространение несимметричные мультивибраторы, выполненные на транзисторах различной структуры (рис. 56). Частоту повторения импульсов такого мультивибратора можно регулировать изменением емкости конденсатора $C1$.

3. Электронное реле

Электронные реле различного типа применяются во многих радиоэлектронных устройствах. Особенно популярны они у начинающих радиолюбителей, так как принцип их работы довольно прост и они не вызывают особых затруднений при настройке. Прежде чем изучать электронное реле, нужно ознакомиться с обычным электромагнитным реле, которое является составной частью электронного.

Электромагнитное реле — это электромеханическое устройство, предназначенное для коммутации (включения, выключения, переключения) электрических цепей, которые часто называют *исполнительными*.

Реле состоит из катушки, сердечника, якоря, контактной системы, основания и чехла. Реле открытого типа чехла не имеют. Сердечник расположен внутри катушки и образует вместе с ней электромагнит. Отсюда и название реле — «электромагнитное». При прохождении тока по обмотке катушки создается магнитное поле, сердечник намагничивается и притягивает якорь. Движение якоря вызывает замыкание (размыкание или переключение) контактов, через которые происходит коммутация исполнительных цепей. При выключении катушки реле магнитное поле исчезает и якорь под действием возвратных пружин возвращается в исходное состояние, контакты реле также занимают прежнее положение.

Основные электрические параметры реле: ток срабатывания, ток отпускания, сопротивление обмотки и мощность, коммутируемая контактами.

Напряжение, при котором происходит срабатывание реле, можно определить, если перемножить значение тока срабатывания реле на сопротивление обмотки катушки. Для надежного срабатывания и функционирования реле напряжение питания реле нужно брать на 20—30% больше напряжения, при котором срабатывает реле.

Условное графическое обозначение реле и его контактов приведено на рис. 57. Обмотка реле обозначается в виде прямоугольника, а контакты — изогнутыми линиями, напоминающими обозначения включателей и переключателей. Буквенно-цифровое обозначение реле состоит из буквы К и цифры, обозначающей позиционный номер реле по схеме. Контакты реле имеют буквенно-позиционное обозначение своего реле и, кроме того, через точку ставится номер контакта согласно его позиционного положения на схеме.

Наша промышленность выпускает различные типы электромагнитных реле постоянного тока. При работе в кругах чаще всего применяют малогабаритные реле, например, типа РСМ (реле слаботочное малогабаритное), РЭС (реле электромагнитное слаботочное) и т. п. Однако каждый тип реле имеет много разновидностей, которые отличаются друг от друга по электрическим параметрам. На разновидность реле указывает его паспорт. Зная марку и конкретный паспорт реле, по справочным данным можно узнать об его электрических параметрах, о количестве и виде контактов.

Если мощность сигнала, подводимого к обмотке реле, достаточна для его срабатывания, реле можно использовать как самостоятельный схемный элемент. Если же мощность подводимого сигнала меньше мощности, необходимой для срабатывания реле, то сигнал следует усилить. Для усиления управляющего сигнала используют транзисторные уси-

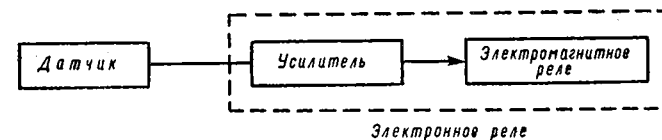


Рис. 58. Структурная схема электронного реле.

лители. Сочетание транзисторного усилителя и реле называют *электронным реле*.

Структурная схема электронного реле с источником управляющего сигнала (датчиком) изображена на рис. 58. Источник сигнала — датчик, в качестве которого можно использовать генератор прямоугольных импульсов, фотодиод или фототиристор, микрофон. Сигнал поступает на вход усилителя тока, для которого электромагнитное реле является нагрузкой. Если усиление достаточное, то при поступлении на вход усилителя управляющего сигнала реле срабатывает и своими контактами коммутирует исполнительные цепи. В исполнительные цепи могут быть включены электродвигатели, лампочки накаливания, обмотки более мощных электромагнитных реле, питание звуковых генераторов.

Такую структурную схему имеют различные реле времени, фотореле, емкостные и звуковые реле, термореле и другие автоматически действующие устройства, основой которых является электронное реле. Изменяются только датчики, а основа — электронное реле — остается. В качестве примеров использования электронного реле рассмотрим работу реле времени и фотореле.

4. Реле времени

С помощью реле времени можно выполнять временные задержки на включение или выключение исполнительных цепей. Схема такого реле показана на рис. 59. Задержка включения электромагнитного реле К1 образуется за счет времени заряда конденсатора С1. Когда на схему не подается напряжение источника питания E_k , конденсатор С1 разряжен. В момент включения питания тумблером S1 напряжение прикладывается к цепочке R1C1 и через нее начинает проходить ток. В первый момент времени напряжение на конденсаторе и его сопротивление равны нулю, и зарядный ток конденсатора определяется сопротивлением $R1 : I = E_k / R1$.

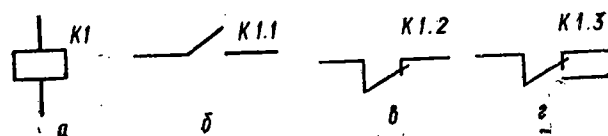


Рис. 57. Условное графическое обозначение реле и его контактной группы:

а — обмотка реле; б — нормально разомкнутый контакт; в — нормально замкнутый контакт; г — переключающий контакт.

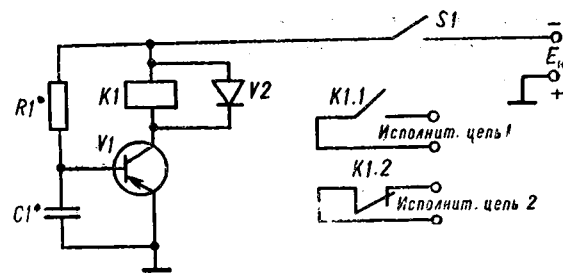


Рис. 59. Схема реле времени.

Проходящий ток заряжает конденсатор $C1$ и напряжение на нем возрастает. В момент включения тумблера $S1$ напряжение источника питания сразу же прикладывается к обмотке реле и участку коллектор — эмиттер транзистора. Но в этот момент времени транзистор закрыт, так как напряжение на конденсаторе, а следовательно, и на базе транзистора равно нулю (протекает лишь ток $I_{к0}$, но он слишком мал для срабатывания реле, и им можно просто пренебречь). Появившись на конденсаторе, напряжение сразу же передается на базу транзистора. Оно отрицательно относительно эмиттера. Начинает протекать базовый ток, который вызывает прохождение тока в коллекторной цепи, то есть через обмотку реле. Но этот ток пока мал, и реле не срабатывает.

В результате дальнейшего протекания зарядного тока через конденсатор напряжение на конденсаторе увеличивается, а следовательно, увеличиваются базовый и коллекторный токи. При определенном отрицательном напряжении на конденсаторе (и если коэффициент усиления достаточно большой) коллекторный ток достигает значения тока срабатывания реле, и реле срабатывает. При этом контакты реле замыкают или размыкают исполнительные цепи (для схемы на рис. 59 изображены оба случая).

Итак, в рассматриваемой схеме между моментом подачи питания в схему и моментом срабатывания реле проходит какой-то промежуток времени, который называют *задержкой на включение*. Это время зависит от элементов зарядной цепочки: от значений сопротивления резистора $R1$ и емкости конденсатора $C1$. Изменяя эти значения, можно изменять и временную выдержку, поэтому на схеме около этих элементов изображена звездочка. Чем больше значения $R1$ и $C1$, тем большую выдержку можно получить, и наоборот.

В схеме электронного реле параллельно обмотке электромагнитного реле подключен диод $V2$. При этом следует обратить внимание на его подключение относительно полярности источника питания: анодом к минусу, а катодом к плюсу источника, то есть он включен в обратном направлении. В таких схемах транзистор переходит из закрытого состояния в открытое, и наоборот. При открытом транзисторе реле срабатывает, а при закрытом — отпускает. Когда по коллекторной цепи транзистора проходит ток, он проходит также и по обмотке катушки реле. При этом вокруг катушки реле возникает постоянное магнитное поле.

Если теперь транзистор из открытого состояния перейдет в закрытое, то коллекторный ток прекратится, и напряжение источника питания будет приложено к участку коллектор — эмиттер. Исчезает причина, создавшая магнитное поле катушки, и исчезает само поле. При исчезновении магнитного поля в обмотке катушки возникает ЭДС самоиндукции, которая стремится поддержать причину, вызвавшую ее. Этой причиной был коллекторный ток, который прекращается, а ЭДС самоиндукции стремится поддержать его. При этом мгновенное суммарное напряжение ЭДС самоиндукции и источника питания может значительно превысить максимальное допустимое значение напряжения на участке коллектор — эмиттер, и транзистор выйдет из строя. Если по отношению к напряжению источника питания схемы диод включен в обратном направлении, то по отношению к ЭДС самоиндукции он включен в прямом направлении и будет гасить ее, тем самым предотвращая выход из строя транзистора.

Часто в схемах электронного реле используют *составной транзистор*, причем первый транзистор составного обычно маломощный, а второй — средней или большой мощности. Это вызывается тем, что для срабатывания электромагнитного реле через его обмотку нужно пропустить значительный ток, значение которого обычно является отправной точкой при расчете электронных реле.

5. Фотореле

Основой фотореле также является рассмотренное нами электронное реле, а приставка «фото» происходит от типа датчика, который используют для получения управляющего сигнала. В качестве датчика применяются фотопри-

боры, электрические параметры которых изменяются под действием света: фотодиоды, фототранзисторы, фоторезисторы. Когда фотодатчик затемнен, его сопротивление большое, а при достаточном освещении — резко падает. На этом свойстве изменения сопротивления и основана работа фотореле.

Схема фотореле с использованием фоторезистора изображена на рис. 60. При подаче питания тумблером $S1$ напряжение источника прикладывается к делителю напряжения, состоящему из фоторезистора $R1$ и резистора $R2$. Если фоторезистор $R1$ не освещен, его сопротивление велико по сравнению с сопротивлением резистора $R2$, и тогда практически все напряжение источника питания приложено к нему. На базе транзистора напряжение практически равно нулю, транзистор закрыт, реле обесточено. При достаточном освещении фоторезистора его сопротивление резко падает и на резисторе $R2$ (или на базе транзистора) появляется напряжение, которое вызовет ток в коллекторной цепи и реле $K1$ сработает. При этом замкнется нормально разомкнутый контакт реле $K1.1$ и исполнительная цепь будет замкнута. Если прекратить освещение фоторезистора, на базе транзистора снова будет нулевое напряжение, транзистор закроется, коллекторный ток прекратится, реле отпустит, контакт $K1.1$ и исполнительная цепь будут разомкнуты.

Фотореле широко применяются в различных устройствах автоматики.

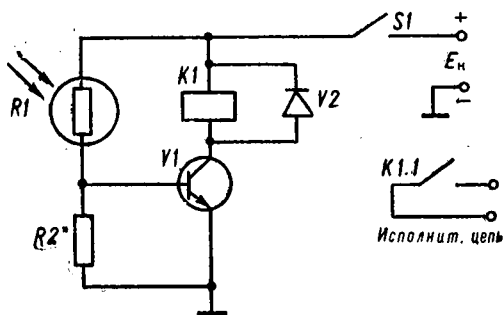


Рис. 60. Схема фотореле.

Глава IV.

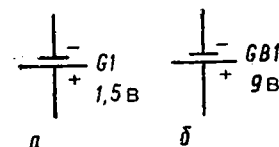
ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

1. Химические источники питания

К химическим источникам питания относятся гальванические и аккумуляторные элементы, гальванические и аккумуляторные батареи. Последние образуются соединением двух или более элементов. Эти источники питания часто используются радиолюбителями для питания различных приемников, детских электронных игрушек, сувениров и т. д. Недостатком этих источников питания является их малый срок службы.

На рис. 61 показано условное графическое обозначение химических источников питания. Оно состоит из двух параллельных линий разной длины, причем короткая линия обозначает отрицательный полюс источника, длинная — положительный. Буквенный код этих источников питания — латинская буква G . Чтобы отличить батарею от элемента, в ее обозначение вводят еще одну букву — латинскую букву B . Это различие можно определить и по значению напряжения, указываемого рядом с источником напряжения. Известно, что напряжение одного элемента не превышает 1,5 В. Поэтому, если на схеме указано напряжение 4,5 В или 9 В, это означает, что изображена батарея из трех или шести элементов.



2. Выпрямление переменного напряжения

Для питания схем полупроводниковых радиоэлектронных устройств необходимо постоянное напряжение. Это напряжение можно непосредственно получить от химических источников питания. Но в

Рис. 61. Условное графическое обозначение химических источников питания:

a — гальванический или аккумуляторный элемент;
 $б$ — гальваническая или аккумуляторная батарея.

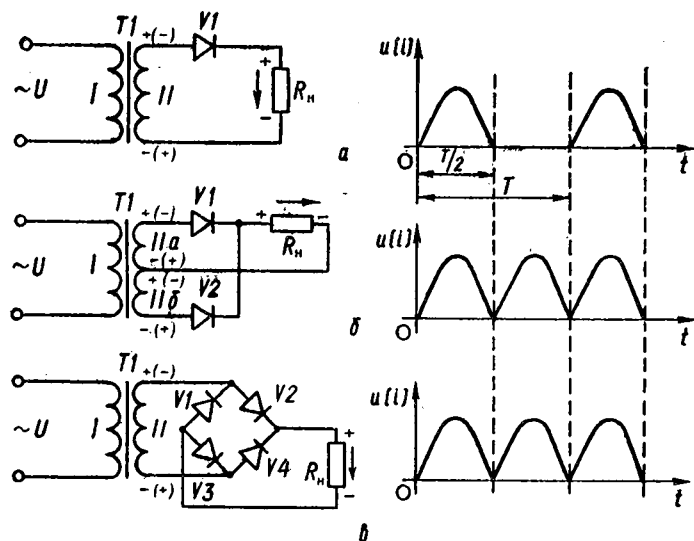


Рис. 62. Схемы выпрямителей и формы напряжений, получаемых на нагрузках:

а — однополупериодная схема, б — двухполупериодная схема (со средней точкой); в — двухполупериодная схема (мостовая).

большинстве случаев такие источники маломощны и у них небольшой срок службы. Зато этих недостатков нет у сетевых источников напряжения постоянного тока.

Современный сетевой источник питания (далее — источник питания) состоит из четырех основных узлов: трансформатора, выпрямителя, сглаживающего фильтра и стабилизатора напряжения (или тока).

Рассмотрим процесс выпрямления переменного напряжения. Частота сетевого напряжения равна 50 Гц, то есть в одну секунду имеем 50 периодов. В течение каждого периода имеется полпериода положительного напряжения и полпериода отрицательного. Для того чтобы выпрямить напряжение, надо избавиться от разнополярности. Этого можно добиться двумя способами: а) избавиться от напряжения одного из полупериодов и б) изменить полярность напряжения одного из полупериодов на противоположную.

При этом используют основное свойство диода — способность хорошо проводить ток только в одном направлении. Узел источника питания, который позволяет изба-

виться от разнополярности напряжения, называют *выпрямителем*. Этот узел состоит из диодов (их может быть один или несколько), которые называют выпрямительными. Выпрямительные диоды должны пропускать большие токи и выдерживать значительные обратные напряжения.

Выпрямители бывают *однополупериодными* или *двухполупериодными*. Это зависит от того, сколько полупериодов переменного тока используется — один или два. Схемы наиболее часто применяемых выпрямителей и форма получаемых с их помощью пульсирующих напряжений даны на рис. 62. По однополупериодной схеме выполняют выпрямители, от которых требуется небольшой ток. Такую схему используют редко. Схема работает следующим образом. Во время положительной полуволны (в первый полупериод синусоиды) плюс напряжения на вторичной обмотке II трансформатора приложен к аноду диода, а минус — к катоду (знаки плюс и минус указаны без скобок). Диод пропускает ток от плюса вторичной обмотки трансформатора к аноду диода, через диод, сопротивление нагрузки R_n и на минус вторичной обмотки. Во время отрицательной полуволны к аноду диода приложен минус, а к катоду — плюс (знаки указаны в скобках). К диоду в это время прикладывается обратное напряжение, и он считается закрытым. На графике (рис. 62, а) в это время на сопротивлении нагрузки нет падения напряжения.

Схема выпрямителя со средней точкой обеспечивает прохождение тока через сопротивление нагрузки в течение обоих полупериодов. Во время положительного полупериода работает первая половина вторичной обмотки (IIa). Ток идет от плюса вторичной обмотки трансформатора через диод V1, нагрузку R_n и на среднюю точку вторичной обмотки. В это время к аноду диода V2 приложен минус, а к катоду плюс, и диод закрыт. Во время отрицательного полупериода картина меняется — будет открыт диод V2, а диод V1 закрыт (для этого случая знаки указаны в скобках). В этот полупериод ток протекает за счет напряжения на обмотке IIб.

Наиболее распространенной схемой выпрямителя является *мостовая схема*, которая также является двухполупериодной. Во время положительного полупериода ток проходит от плюса вторичной обмотки трансформатора через диод V2, сопротивление нагрузки R_n , через диод V3 и на минус вторичной обмотки. В это время ко второй паре

диодов ($V1$, $V4$) приложено обратное напряжение, и они закрыты. Во время отрицательного полупериода переменного напряжения картина меняется. Ток будет протекать от плюса обмотки (знаки указаны в скобках), через диод $V4$, нагрузку R_n , диод $V1$ и на минус вторичной обмотки.

По виду выпрямленного напряжения мостовая схема и схема со средней точкой одинаковы. Но при схеме со средней точкой выпрямителя вторичная обмотка трансформатора имеет большее количество витков (для получения одинакового выпрямленного напряжения). Это увеличивает размеры трансформатора, что в большинстве случаев нежелательно. Кроме того, в схеме со средней точкой к диодам прикладывается обратное напряжение, примерно вдвое большее по сравнению с мостовой схемой, что также нежелательно. Учитывая все это следует отдавать предпочтение мостовой схеме выпрямителя, хотя здесь и требуется больше диодов.

3. Сглаживание выпрямленного напряжения

На сопротивлении нагрузки выпрямителя выделяется пульсирующее напряжение, форма которого значительно отличается от формы постоянного напряжения. Для сглаживания пульсирующего напряжения используют *сглаживающие фильтры*, которые до недавнего времени состояли в большинстве случаев из конденсатора и дросселя. Конденсатор сглаживал пульсирующее напряжение, а дроссель задерживал переменную составляющую сглаженного напряжения от попадания ее в нагрузку. В настоящее время функции дросселя выполняют *стабилизаторы напряжения*, которые, выполняя свою основную роль, в то же время за-

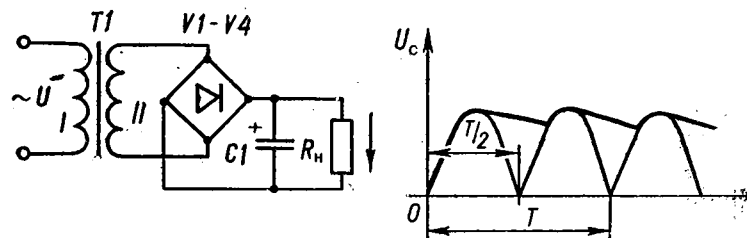


Рис. 63. Сглаживание напряжения с помощью емкости.

держивают переменную составляющую напряжения, сглаженного конденсатором.

Принцип сглаживания пульсирующего напряжения конденсатором можно проследить по рис. 63. Жирной линией на графике показано напряжение на емкости конденсатора (или на сопротивлении нагрузки). Сглаживание напряжения происходит за счет того, что во время уменьшения пульсирующего напряжения ток в нагрузке (а следовательно, и напряжение на R_n) поддерживается напряжением зарядившегося конденсатора. При возрастании пульсирующего напряжения конденсатор снова подзарядается и т. д. Емкость конденсатора обычно выбирают равной 30—50 мкФ.

4. Трансформаторы источников питания

Для питания полупроводниковых радиоэлектронных устройств необходимы постоянные напряжения, значения которых меньше напряжения сети, от которой питаются источники питания. Поэтому первой задачей, которую выполняют источники питания, является *понижение сетевого напряжения*. Для понижения напряжения в источниках питания служат трансформаторы. При наличии трансформатора получается развязка питания радиоэлектронного устройства непосредственно от сети. Трансформаторы, используемые в источниках питания, понижающие — вторичная обмотка имеет меньше витков, чем первичная. Сердечники трансформаторов в большинстве случаев Ш-образные или тороидальные. В качестве обмоточного провода лучше всего использовать провод марки ПЭВ-1 или ПЭВ-2.

Чтобы дать представление о том, что надо учитывать при выборе сердечника трансформатора, как выбирать диаметр обмоточного провода и количество витков в обмотках трансформатора и т. д., покажем ориентировочный расчет одного из трансформаторов. Расчет назван ориентировочным, так как точно рассчитать данные трансформатора удастся очень редко. Расчетные данные обычно являются первым приближением, которое надо будет уточнить при включении трансформатора под нагрузку.

Расчет трансформатора источника питания. Расчет будем вести для трансформатора, выполненного на Ш-образном сердечнике. Для того чтобы рассчитать трансформатор, нужно знать мощность, которую потребляет нагрузка.

Пусть условная нагрузка R_n при напряжении на ней $U_n = 30$ В потребляет ток $I_n = 0,8$ А.

1) Мощность, потребляемая нагрузкой: $P_n = U_n I_n = 30 \cdot 0,8 = 24$ Вт.

2) Определим мощность, потребляемую источником от сети. При этом следует иметь в виду, что в трансформаторе есть потери на нагрев проводов обмоток и сердечника (говорят, потери в меди и железе). Учитывая все это, коэффициент полезного действия трансформатора обычно принимают: $\eta = 70 - 80\%$. Пренебрегая потерями в выпрямителе и приняв $\eta = 70\%$, находим мощность P , потребляемую источником от сети: $P = P_n / \eta = 24 / 0,7 = 34$ ВА.

3) Исходя из этой мощности, определяется площадь сердечника трансформатора из трансформаторной стали по формуле: $S = \sqrt{P} = \sqrt{34} = 5,8$ см².

4) Зная площадь сечения сердечника, можно определить количество витков N обмоток трансформатора, приходящихся на 1 В напряжения. Для трансформаторов небольшой мощности (это и наш случай) существует приближенная зависимость: $SN = 60$. Отсюда $N = 60 / S = 60 / 5,8 \approx 10$ витков/В.

5) Находим количество витков каждой обмотки трансформатора, исходя из напряжений, действующих на них. Количество витков первичной (сетевой) обмотки трансформатора для напряжения 220 В составит: $W_1 = 220 N = 220 \cdot 10 = 2200$ витков. Количество витков вторичной обмотки составит: $W_2 = 30 N = 30 \cdot 10 = 300$ витков.

6) Определим диаметр провода обмоток. Рассчитываем по допустимой плотности тока. Для маломощных трансформаторов при использовании обмоточного провода в обычной эмалевой изоляции допустимая плотность тока равна 2 А на 1 мм² площади сечения провода. Исходя из этих соображений, диаметр провода для каждой обмотки рассчитывается по формуле: $d = 0,8 \sqrt{I}$, где d — диаметр провода, мм; I — ток в обмотке, А.

Ток в первичной обмотке трансформатора при подключении ее к сети $I_1 = P / U_1 = 34 / 220 = 0,15$ А. Тогда диаметр провода (без изоляции) первичной обмотки равен: $d = 0,8 \sqrt{0,15} = 0,8 \cdot 0,39 = 0,32$ мм. Диаметр провода вторичной обмотки $d_2 = 0,8 \sqrt{0,8} = 0,8 \cdot 0,9 = 0,72$ мм.

В качестве обмоточного провода для нашего трансформатора выберем провод в эмалевой изоляции типа ПЭВ-1

и найдем диаметры проводов* уже с изоляцией: $d_{1 \text{ из}} = 0,36$ мм; $d_{2 \text{ из}} = 0,77$ мм.

7) Выбираем тип Ш-образного сердечника. Форма такого сердечника и его основные размеры показаны на рис. 65. Ширина среднего стержня пластины a и толщина набора c определяются по формулам: $a = 0,9 \sqrt{S}$; $c = 1,1 \sqrt{S}$. Для нашего случая: $a = 0,9 \sqrt{5,8} = 2,16$ см = 21,6 мм; $c = 1,1 \sqrt{5,8} = 2,64$ см = 26,4 мм.

По этому же справочнику выбираем ближайший тип сердечника УШ22 × 33 (У — уширенный вариант).

8) Теперь нужно разместить обмотки в окне сердечника. Окно определяется размерами h и b (рис. 64), которые также определяются по справочнику. Если обмотки не помещаются в окне сердечника, то нужен сердечник с большим размером пластин.

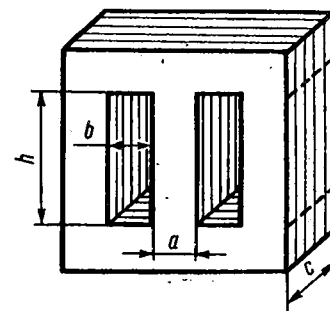


Рис. 64. Ш-образный сердечник с основными размерами.

5. Стабилизация напряжения в источниках питания

В большинстве случаев полупроводниковые радиоэлектронные устройства для своей работы требуют стабильного напряжения, которое не зависело бы от колебания сетевого напряжения, а также от изменения тока в нагрузке. Для стабилизации напряжения применяются параметрические и компенсационные стабилизаторы.

Параметрические стабилизаторы напряжения, принцип действия которых основан на свойствах полупроводниковых стабилитронов, применяются в различных радиоэлектронных устройствах. Мы уже рассматривали свойства стабилитронов и отмечали их важнейшие параметры: напряжение стабилизации $U_{ст}$ и ток стабилизации $I_{ст}$.

При включении стабилитрона в прямом направлении (на аноде — плюс источника напряжения, на катоде —

* Терещук Р. и др. Справочник радиолюбителя. К., Техника, 1969, т. 1.

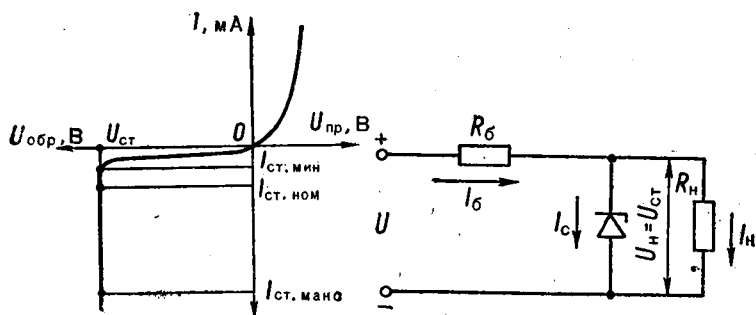


Рис. 65. Вольтамперная характеристика стабилитрона.

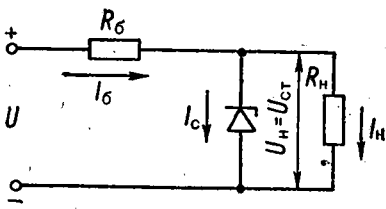


Рис. 66. Схема параметрического стабилизатора напряжения.

минус) его вольтамперная характеристика напоминает характеристику обычного кремниевого диода (рис. 65). Но обратная ветвь характеристики несколько необычна. При включении стабилитрона под обратное напряжение (на аноде — минус источника напряжения, на катоде — плюс) ток через него вначале возрастает очень незначительно, но при определенном значении напряжения наступает так называемый «пробой» — режим, при котором незначительное приращение напряжения вызывает значительный ток через стабилитрон (вертикальный участок обратной ветви).

Распространенная схема простейшего параметрического стабилизатора постоянного напряжения показана на рис. 66. Схема представляет делитель напряжения, состоящий из балластного (гасящего) резистора R_6 и стабилитрона V , параллельно которому подключено сопротивление нагрузки R_n .

При изменении напряжения питания U изменяется ток через резистор R_6 . Если бы не было стабилитрона, то изменение тока вызвало бы изменение напряжения на сопротивлении нагрузки. Стабилитрон принимает эти токовые изменения на себя: изменяется ток, проходящий через него, а напряжение на нем (то есть и на R_n) практически остается без изменений.

Другой случай: когда напряжение питания постоянно, а изменяется только сопротивление нагрузки R_n . В этом случае ток, проходящий через стабилитрон, также будет изменяться, причем с уменьшением R_n (с увеличением тока нагрузки) ток через стабилитрон уменьшается, и наоборот.

В этом и заключается стабилизирующее действие стабилизатора напряжения: поддерживать постоянным напряжение на нагрузке при изменении питающего напряжения или изменении самой нагрузки. Для нормальной работы схемы параметрического стабилизатора необходимо произвести расчет тока стабилитрона и параметров резистора R_6 .

Компенсационные стабилизаторы напряжения преимущественно применяются для питания полупроводниковых радиоэлектронных устройств. Параметрические стабилизаторы напряжения по своему устройству очень просты, но их основным недостатком является то, что они пригодны для питания устройств с потребляемым током, не превышающим максимального тока стабилизации стабилитрона. Очень часто этого недостаточно и тогда применяют компенсационные стабилизаторы напряжения, которые бывают двух разновидностей: последовательные и параллельные. Эти названия стабилизаторы получили от способа подключения нагрузки к регулирующему элементу (транзистору). Если нагрузка подключается параллельно, стабилизатор параллельного типа, если последовательно — последовательного. Чаще применяются компенсационные стабилизаторы последовательного типа. Схема простейшего компенсационного стабилизатора последовательного типа изображена на рис. 67.

Чем эта схема отличается от схемы параметрического стабилизатора напряжения? Всего лишь наличием транзистора и резистора, которые образуют эмиттерный повторитель. Нагрузку включают последовательно с регулирующим элементом, поэтому ток, протекающий через нагрузку, практически равен току транзистора. Здесь же мы видим и параметрический стабилизатор (резистор $R1$ и стабилитрон $V2$), который используется для того, чтобы поддерживать постоянным напряжение на базе транзистора.

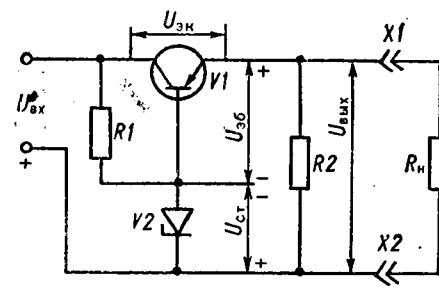


Рис. 67. Схема простейшего компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа.

Транзистор $V1$ всегда работает в усилительном (активном) режиме. Так как он имеет структуру $p - n - p$, потенциал базы будет отрицательным по отношению к эмиттеру; на аноде стабилитрона будет минус по отношению к катоду. Выходное напряжение стабилизатора $U_{\text{вых}}$ будет равным разности напряжений стабилизации стабилитрона $U_{\text{ст}}$ и эмиттерного перехода транзистора $U_{\text{эб}}$. Напряжение $U_{\text{эб}}$ обычно составляет лишь десятые доли вольта, поэтому им можно пренебречь и тогда $U_{\text{вых}} \approx U_{\text{ст}}$. Выбирая определенный тип стабилитрона, можно изменять выходное напряжение (однако входное напряжение стабилизатора должно превышать это значение).

Рассмотрим работу *компенсационного стабилизатора*. Допустим, что в результате повышения входного напряжения стабилизатора выходное напряжение также увеличится. За счет этого уменьшается напряжение на эмиттерном переходе, и транзистор начнет закрываться. При этом падение напряжения на участке эмиттер — коллектор $U_{\text{эк}}$ возрастает настолько, что выходное напряжение уменьшается до прежнего значения. Аналогично работает стабилизатор и при уменьшении входного напряжения.

Анализируя работу этого стабилизатора, замечаем, что его также можно представить в виде делителя входного напряжения, состоящего из транзистора и нагрузки. Транзистор выполняет роль сопротивления, значение которого при изменении входного напряжения и тока нагрузки изменяется управляющим напряжением $U_{\text{эб}}$ так, что выходное напряжение стабилизатора остается постоянным. Иначе говоря, изменения напряжения на регулирующем транзисторе компенсируют изменения входного напряжения стабилизатора и тока нагрузки. Поэтому такие стабилизаторы и называют *компенсационными*.

При выборе транзистора для стабилизатора необходимо учитывать, чтобы предельно допустимое напряжение между эмиттером и коллектором было больше, чем наибольшее входное напряжение стабилизатора, а предельно допустимый ток коллектора — больше максимального тока через нагрузку. Кроме того, важно, чтобы мощность, рассеиваемая транзистором, не превышала допустимой и транзистор имел бы достаточный коэффициент усиления по постоянному току.

Резистор $R2$ необходим для того, чтобы даже при отключенной нагрузке (так называемый режим холостого хода

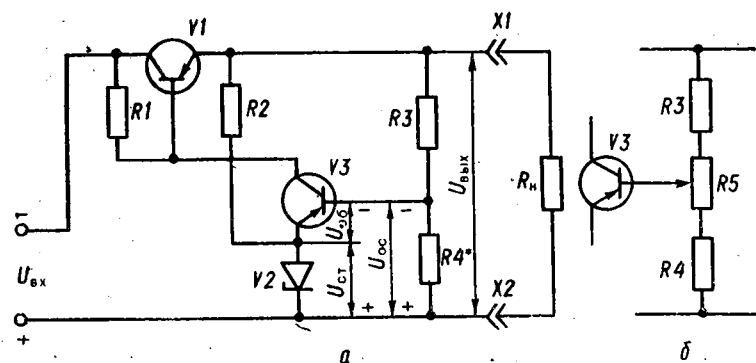


Рис. 68. Схема компенсационного стабилизатора с регулировкой выходного напряжения.

стабилизатора) транзистор работал в обычном режиме усиления. Значение сопротивления выбирается таким, чтобы ток, протекающий через него, составлял всего несколько миллиамперов, и тогда его можно не учитывать.

Рассмотренный компенсационный стабилизатор, как и параметрический, обладает недостатками: трудно получить точное значение выходного напряжения и регулировать его в процессе эксплуатации. Если есть необходимость в таких регулировках, компенсационный стабилизатор выполняют по схеме, приведенной на рис. 68, а. Здесь так же, как и в предыдущей схеме, регулирующим элементом является транзистор $V1$, а источником опорного напряжения — стабилитрон $V2$, режим которого задается через резистор $R2$. Резисторы $R3$ и $R4$ образуют делитель выходного напряжения. На транзисторе $V3$ и резисторе $R1$ выполнен усилитель постоянного тока. Часть выходного напряжения, подаваемого на базу транзистора $V3$ с резистора $R4$, называется *напряжением обратной связи* $U_{\text{ос}}$. Напряжение на эмиттере этого транзистора считаем постоянным, так как оно застabilизировано стабилитроном. Эмиттерный переход оказывается под действием двух напряжений — обратной связи (оно может изменяться) и стабилизации стабилитрона (оно постоянно).

Если выходное напряжение стабилизатора (соответственно и напряжение $U_{\text{ос}}$) начнет увеличиваться, база транзистора $V3$ станет более отрицательной по отношению к эмиттеру; это вызовет увеличение коллекторного тока че-

рез транзистор $V3$, а отрицательное напряжение на его коллекторе, а следовательно, и на базе транзистора $V1$ уменьшится. Это вызовет уменьшение тока базы транзистора $V1$ и его коллекторного тока, то есть транзистор будет закрываться, сопротивление увеличиваться и напряжение между эмиттером и коллектором возрастать. В результате выходное напряжение перестанет изменяться и возвратится к прежнему значению. При уменьшении выходного напряжения процессы те же. Резисторы $R3$ и $R4$ выбирают обычно такими, чтобы ток через них был равен 5—15 мА. Точное значение выходного напряжения устанавливают подбором одного из этих резисторов (это делается резистором $R4^*$). Плавную регулировку выходного напряжения можно получить, включая между резисторами $R3$ и $R4$ переменный резистор и соединяя его движок с базой транзистора $V3$ (рис. 68, б). И в этом случае сопротивления резисторов $R3$, $R4$ и $R5$ выбирают такими, чтобы ток через них был в пределах 5—15 мА. Сопротивление резистора $R1$, который является коллекторной нагрузкой транзистора $V3$, составляет обычно несколько килоомов. Транзистор $V3$ обычно маломощный, а $V1$ — имеет большую мощность.

На рис. 69 приведена схема стабилизированного источника питания с регулируемым выходным напряжением 9—14 В и током нагрузки до 200 мА.

Трансформатор $T1$ источника питания выполнен на Ш-образном сердечнике Ш16 × 20. Первичная обмотка I имеет 3300 витков провода ПЭВ-2 0,1, а вторичная обмотка II — 210 витков провода ПЭВ-2 0,36.

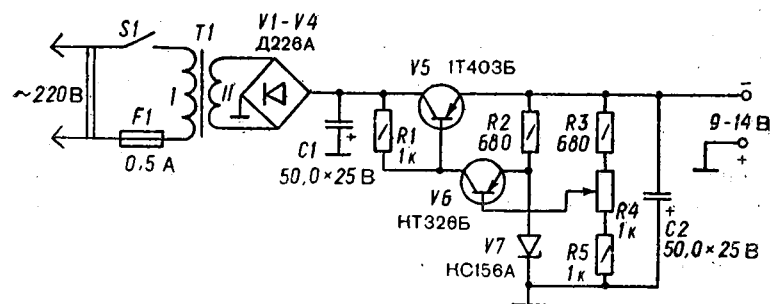


Рис. 69. Схема стабилизированного источника питания.

Глава V.

ДЕТЕКТОРНЫЕ ПРИЕМНИКИ, ПРИЕМНИКИ ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ И НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

Начинающие радиолюбители обычно начинают ознакомление с радиоэлектронными устройствами, предназначенными для приема радиопередач, с простейших приемников. Прежде чем рассматривать вопросы, связанные с построением приемников, нужно ознакомиться с процессами и некоторыми техническими решениями, которые обеспечивают передачу и прием радиопрограмм.

1. Амплитудная модуляция

Исследования показали, что энергия электромагнитных колебаний, которые излучает антенна передатчика в пространство, пропорциональна частоте колебаний в четвертой степени. Поэтому передачу высокочастотных колебаний обеспечить легко. А как быть, если необходимо передать низкочастотные колебания? Как передать на расстояние речь и музыку? Ведь человек может воспринимать звуковые колебания частотой всего лишь до 20 кГц. С помощью микрофона можно преобразовать звуковые колебания в электрические той же частоты. Если даже усилить последние, то антенна передатчика не сможет излучать в пространство электромагнитные колебания такой низкой частоты. Мощность низкочастотного электромагнитного излучения антенны слишком мала.

Получалось следующее: высокочастотные колебания хорошо излучаются антенной, но не несут в себе интересующей нас информации; низкочастотные колебания — наоборот.

Выход из этого положения нашли: была осуществлена *модуляция* высокочастотных колебаний. Высокочастотные колебания, как и всякие колебания, характеризуются тремя параметрами: амплитудой, частотой и фазой. Изменяя один из них, можно осуществить соответственно *амплитуд-*

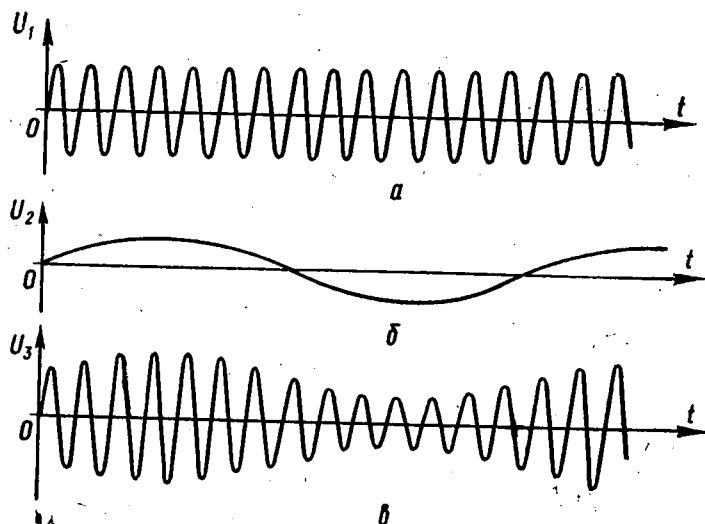


Рис. 70. Высокочастотные колебания (а), низкочастотные колебания (б), модулированные по амплитуде высокочастотные колебания (в).

ную, частотную и фазовую модуляции. Частотная и фазовая — представляют собой сложные способы модуляции. Для нас представляют интерес высокочастотные колебания, модулированные по амплитуде (рис. 70, в). Высокочастотные колебания обычно называют *несущей частотой*, а низкочастотные — *модулирующей частотой*. Процесс образования высокочастотных модулированных колебаний происходит в особых высокочастотных генераторах-модуляторах. Результатом модуляции является то, что антенна будет хорошо излучать в пространство модулированные колебания, которые теперь несут интересующую нас информацию (речь, музыку).

2. Амплитудное детектирование

Высокочастотные модулированные колебания излучаются в пространство и принимаются антенной приемника. Но принятый приемником модулированный высокочастотный сигнал даже и после усиления нельзя обнаружить с помощью телефона или динамической головки, ибо он содержит низкочастотные колебания лишь в неявной форме (в виде

огibaющей модулированного колебания). Поэтому необходимо преобразовать модулированные высокочастотные колебания в низкочастотные, но уже в явной форме. Часть приемника, в которой осуществляется этот процесс, называют *детектором*.

Детектирование может осуществляться схемными элементами, обладающими нелинейной вольт-амперной характеристикой. Для этого обычно используют полупроводниковые диоды или транзисторы. В первом случае детектор называют *диодным*, во втором — *транзисторным*. Рассмотрим работу диодного детектора (рис. 71). На вход детектора подаются высокочастотные модулированные колебания. Нагрузкой может быть катушка телефона или входная цепь усилителя НЧ. Процессы, происходящие при этом в детекторе, можно проследить по рис. 72.

Во время положительной полуволны высокочастотного модулированного колебания конденсатор заряжается (от нуля до момента t_1 — рис. 72, б); верхняя обкладка конденсатора $C1$ (рис. 71) — положительно, нижняя — отрицательно. После момента t_1 входное напряжение начинает уменьшаться и, когда его значение достигнет значения напряжения на конденсаторе, диод $V1$ закрывается и ток через него прекращается на время 2-й, 3-й и 4-й четвертей периода высокочастотного колебания. Конденсатор $C1$ не может разрядиться в это время через закрытый диод (его сопротивление в это время слишком велико), а разряжается через сопротивление нагрузки R_n . Сопротивление R_n сравнительно большое, время разряда мало, и конденсатор не успевает разрядиться и, начиная со второго периода (при-

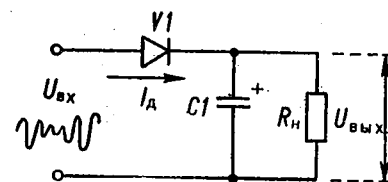


Рис. 71. Схема простейшего диодного детектора.

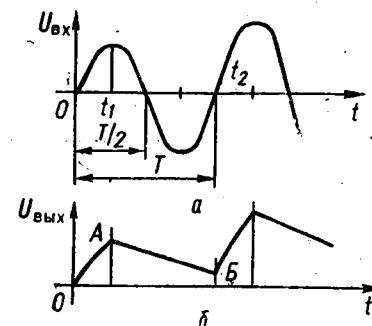


Рис. 72. Кривые изменений напряжений на входе (а) и выходе детектора (б).

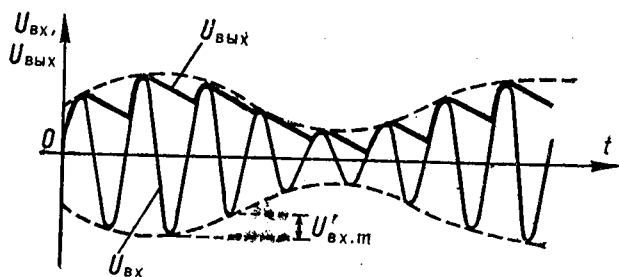


Рис. 73. Кривые изменений напряжений на входе и выходе детектора.

мерно с момента t_2 , рис. 72, б), когда положительное значение $U_{вх}$ превысит значение напряжения на конденсаторе, диод открывается и конденсатор начинает снова заряжаться. Если при этом периоде максимальное значение напряжения $U_{вх}$ превышает предыдущее, то и напряжение на конденсаторе будет больше, чем в предыдущем периоде.

Таким образом, в результате детектирования высокочастотных модулированных по амплитуде колебаний напряжение на выходе детектора $U_{вых}$ изменяется в соответствии с изменениями амплитуды входного напряжения, которая, в свою очередь, изменяется согласно изменениям модулирующего сигнала. Изменения модулирующего сигнала представлены на рис. 73 огибающей модулированного колебания ВЧ. Из рисунка видно, что напряжение на вы-

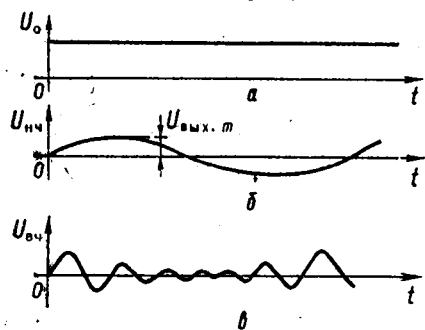


Рис. 74. Составляющие выходного напряжения детектора:

а — постоянная составляющая; б — переменная составляющая низкой частоты; в — переменная составляющая высокой частоты.

ходе детектора $U_{вых}$ пульсирующее, которое может быть представлено в виде суммы трех составляющих: постоянной составляющей U_0 , переменной составляющей НЧ $U_{нч}$, представляющей модулирующий сигнал, и переменной составляющей ВЧ $U_{вч}$ (рис. 74).

Постоянную и переменную составляющую ВЧ в приемниках прямого усиления

обычно отфильтровывают с помощью фильтров, а на вход усилителя НЧ подается лишь переменная составляющая НЧ.

Одним из основных параметров, характеризующих детектор, является коэффициент передачи напряжения $K_{пн}$ — отношение амплитуды выходного напряжения низкой частоты

(рис. 74, б) к амплитуде огибающей входного высокочастотного модулированного напряжения (штриховая линия, рис. 73): $K_{пн} = U_{нч.м} / U'_{вх.м}$. Коэффициенты передачи напряжения обычных детекторов значительно меньше единицы и обычно имеют значения 0,01—0,1. Для увеличения коэффициента передачи применяют либо диодные детекторы с удвоением напряжения, либо транзисторные детекторы.

Диодный детектор с удвоением напряжения (рис. 75) работает следующим образом. Если полярность входного сигнала соответствует указанной (без скобок), тогда диод $V2$ заперт, а диод $V1$ открыт. При этом конденсатор $C1$ заряжается почти до амплитудного значения напряжения входного сигнала. В следующий полупериод полярность напряжения входного сигнала изменяется на обратную (знаки указаны в скобках). В этом положении диод $V1$ закрыт, а диод $V2$ открывается. В этом случае к цепи $V2 - C2$ приложено напряжение, равное сумме напряжения входного сигнала и напряжения на конденсаторе $C1$. При этом конденсатор $C2$ заряжается почти до удвоенного амплитудного значения входного высокочастотного сигнала. Следовательно, на выходе такого детектора получается удвоенное напряжение. В качестве диодов в диодных детекторах обычно используют германиевые диоды типа Д9 или Д2. Для увеличения выходного напряжения детектора часто используют и транзисторные схемы детектирования. Поскольку транзистор по сравнению с диодом обладает еще и усиительными свойствами, то на выходе транзисторного детектора выходное напряжение может превышать выходное напряжение обычного диодного детектора в десятки и сотни раз. В транзисторных детекторах используют обычно высокочастотные транзисторы типа П401—П403, П416.

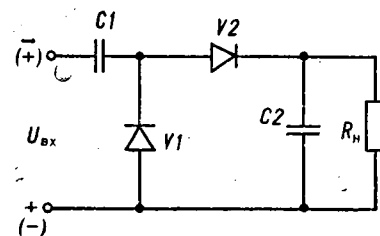


Рис. 75. Схема диодного детектора с удвоением напряжения.

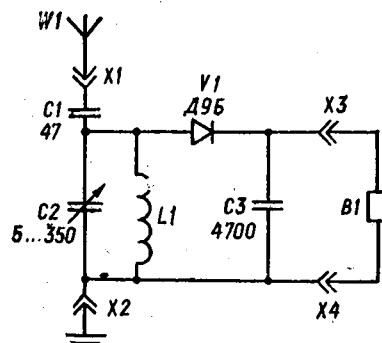


Рис. 76. Схема детекторного приемника.

3. Детекторные приемники

Детекторный приемник — первое радиоэлектронное устройство, предназначенное для радиоприема, с изготовления которого обычно начинают радиолюбители. С помощью такого приемника можно услышать программы ближайших радиостанций, ведущих передачи в сред-

не- и длинноволновом диапазонах. Детекторный приемник привлекателен

тем, что для его выполнения требуется совсем немного простых деталей и не нужен источник питания. Схема детекторного приемника приведена на рис. 76. Излучаемые антенной передающей радиостанции модулированные электромагнитные колебания ВЧ (радиоволны) распространяются в пространстве. Достигая антенны приемника *W1* радиоволны, пересекают провод антенны и возбуждают в нем высокочастотное напряжение, которое через конденсатор *C1* поступает на параллельно соединенные катушку индуктивности *L1* и конденсатор переменной емкости *C2*, образующие параллельный колебательный контур. При настройке контура в резонанс с поданным на него высокочастотным напряжением его сопротивление на этой частоте становится во много раз больше, чем для всех других сигналов, частоты которых отличны от резонансной. Это свойство резонансного контура дает возможность из всех сигналов, принимаемых антенной, выделить сигнал той радиостанции, на частоту которой настроен колебательный контур приемника. Настройка контура осуществляется изменением емкости конденсатора *C2*. Изменение емкости происходит до тех пор, пока частота настройки контура не совпадет с частотой сигнала выбранной радиостанции. При этом на контуре *L1C2* выделяется сравнительно большое напряжение сигнала ВЧ (относительно сигналов других частот).

Выделенный на контуре *L1C2* модулированный сигнал ВЧ поступает на диодный детектор, выполненный на диоде

V1. Высокочастотная составляющая протектированного сигнала шунтируется конденсатором *C3* и в нагрузку (в телефоны) не попадет. Сюда поступят низкочастотная и постоянная составляющие (для нашего случая последняя бесполезна). Низкочастотная составляющая, попадая в телефоны, позволит нам слушать радиопередачу.

Теперь о деталях приемника. Конденсатор переменной емкости может быть любого типа. Можно использовать и подстроечный конденсатор КПК-2 с изменением емкости от 25 до 125 пФ. Катушку индуктивности *L1* наматывают на круглый картонный каркас проводом ПЭВ-1, ПЭВ-2 или ПЭЛШО, диаметр которого 0,12—0,2 мм. Для приема в диапазоне средних волн нужно 100—120 витков, а для диапазона длинных волн — 200—250. В качестве диода *V1* используются германиевые точечные диоды типа Д2 или Д9 с любым буквенным обозначением. Емкость конденсатора *C3* выбирается в пределах 1000—10 000 пФ. Обычно используют конденсаторы типа КЛС или К10-7В. В качестве телефона *B1* можно использовать головные телефоны ТОН-2 или другие с сопротивлением обмоток 2—3 кОм.

Особое значение для детекторного приемника имеют хорошая антенна *W1* и заземление. Антенну делают из медного провода диаметром 1,5—2 мм, который натягивают между двумя опорами на высоте 5—10 м. Расстояние между опорами 10—15 м. Провод антенны следует изолировать от опор изоляторами. Саму антенну подключают к гнезду *X1* отрезком медного провода.

В качестве заземления можно использовать трубы центрального отопления или водопровода. Самое надежное заземление получится, если выкопать яму глубиной 1—1,5 м и закопать в ней лист оцинкованного железа или медную пластину. Перед этим к ним припаивают медный провод, который затем подводят к приемнику. Следует заметить, что антенна детекторного приемника во время грозы может быть источником опасности. Поэтому ее на это время (и вообще, когда приемником не пользуются) следует заземлять.

4. Приемники прямого усиления

Приемники прямого усиления на транзисторах из-за простоты устройства, изготовления и налаживания весьма популярны среди радиолюбителей. Обычно они использу-

ются для приема программ радиостанций диапазонов ДВ (700—2000 м) и СВ (190—550 м), то есть частот от 0,15 МГц до 1,5 МГц.

Приемник прямого усиления принято характеризовать условной формулой, по которой можно сразу узнать виды и количество каскадов приемника. В этой формуле обязательно есть буква *V*, которая обозначает детекторный каскад, имеющийся в любом радиоприемнике. Цифра перед буквой *V* обозначает количество каскадов усилителя высокой частоты (УВЧ), а после нее — количество каскадов усилителя низкой частоты (УНЧ). Если в приемнике нет какого-либо усилителя (УВЧ или УНЧ), то на этом месте ставится цифра 0. Например, запись 0—*V*—2 обозначает, что приемник имеет детекторный каскад и двухкаскадный УНЧ. Запись 2—*V*—3 обозначает, что приемник имеет двухкаскадный УВЧ, детекторный каскад и трехкаскадный УНЧ.

В транзисторных приемниках в качестве антенн используют одиночные провода длиной до 20 м, штыри и ферритовые антенны. Антенна в виде провода или штыря реагирует на электрическую составляющую электромагнитного поля. Но электромагнитное поле имеет еще и магнитную составляющую, на которую и реагируют *ферритовые антенны*. В литературе ферритовые антенны часто называют *магнитными*. Ферритовыми их называли потому, что антенны изготовляют на ферритовых стержнях, второе название дали из-за реакции антенны на магнитную составляющую электромагнитного поля.

Ферритовые антенны располагают внутри корпуса приемника. Мы уже знаем, что приемники прямого усиления обычно работают в диапазоне ДВ и СВ. Линии магнитного поля длинных и средних волн направлены горизонтально. Поэтому ферритовый стержень антенны нужно располагать в корпусе приемника в горизонтальной плоскости, причем если ось стержня направлена на принимаемую радиостанцию, будет наибольшая громкость приема.

В качестве ферритовых сердечников используют стандартные сердечники: для приема длинных волн — марок 600НН и 1000НН, для средних волн — 400НН и 600НН. Ферритовые стержни могут быть круглого или прямоугольного сечения. При обращении с ферритовыми стержнями нужно оберегать их от механических, тепловых и магнитных воздействий, так как при падениях и ударах серд-

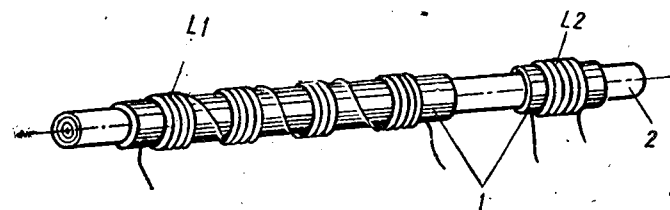


Рис. 77. Устройство ферритовой антенны.

дечники нередко раскалываются, а при воздействии на них высокой температуры (выше 110° С) и сильных постоянных магнитов — теряют свои ценные свойства магнитодиэлектриков.

Ферритовая антенна (рис. 77) состоит из ферритового стержня и надетых на него катушек. В процессе налаживания приемника катушки приходится перемещать вдоль стержня, поэтому их наматывают на подвижные каркасы. Каркасы склеивают клеем БФ-2, «Суперцементом» из нескольких слоев плотной бумаги. Склеивание бумаги и намотка катушек выполняется обычно непосредственно на ферритовом стержне.

Для приема радиостанций в диапазоне средних и длинных волн катушка *L1* должна иметь 100—250 витков. Катушка связи обычно имеет 3—15 витков. Следует учитывать, что чем меньше витков у катушки *L2*, тем лучше избирательность приемника. Для наматывания обычно используют провода ПЭВ-1, ПЭВ-2 или ПЭЛШО.

Катушку *L1* выполняют различными способами: а) наматывают непосредственно на сердечнике без каркаса; б) наматывают несколькими (4—6) одинаковыми секциями; при этом уменьшается собственная емкость катушки. Предпочтителен второй способ намотки катушки *L1*.

Для качественной работы приемника следует соблюдать следующие рекомендации: а) катушки располагать на расстоянии не менее 4—5 мм от краев сердечника; б) во избежание ухудшения приемных свойств ферритовой антенны не следует располагать ее рядом со стальными деталями (корпусом динамической головки, блоком конденсатора переменной емкости и др.); в) для крепления сердечника ферритовой антенны нельзя применять провод без изоляции и металлические замкнутые хомутки; для этой цели лучше всего использовать резиновые кольца, поливинилхлорид-

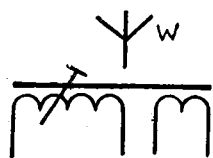


Рис. 78. Условное обозначение ферритовой антенны в схемах.

ную трубку или различные пластмассы (оргстекло, полистирол и т. п.).

Изображение ферритовой (магнитной) антенны на схемах показано на рис. 78. Символы сердечника и катушек изображаются горизонтально, а принадлежность их к антенным устройствам показывают общим обозначением антенны. Возможность подстройки индуктивности антенны показывают знаком подстроечного регулирования.

Входная цепь приемника прямого усиления образуется при соединении контурной катушки с конденсатором переменной емкости. При этом индуктивность катушки и емкость конденсатора образуют колебательный контур. В детекторном приемнике высокочастотное модулированное напряжение, выделенное в колебательном контуре, поступает непосредственно на детектор, а в приемнике прямого усиления это напряжение с помощью катушки связи передается в УВЧ приемника, усиливается и поступает на детекторный каскад. Здесь образуется пульсирующее напряжение, из которого выделяется низкочастотная составляющая, поступающая в УНЧ приемника. Усиленный модулирующий сигнал поступает на динамическую головку, которая преобразует электрические колебания в механические, и мы слышим звук.

Более подробное ознакомление с УВЧ, детекторным каскадом и УНЧ схемы приемника прямого усиления проведем на примере приемника «Электрон-М», который выпускается в виде набора деталей «Радиоконструктор «Электрон-М» (рис. 79). Приемник выполнен по схеме 2 — V — 3, то есть он имеет два каскада УВЧ, детектор и три каскада УНЧ. Программы радиостанций принимаются на магнитную антенну W1. Настройка на радиостанцию ведется с помощью конденсатора переменной емкости C1, который вместе с катушкой L1 образует колебательный контур. Контур не имеет непосредственной связи с УВЧ приемника: эта связь осуществляется через катушку связи L2, которая индуктивно связана с контуром. Такая связь позволяет частично согласовать высокоомное сопротивление резонансного контура с низкоомным входом УВЧ приемника. Количество витков катушки связи значительно меньше, чем у контурной катушки, поэтому на вход УВЧ поступает

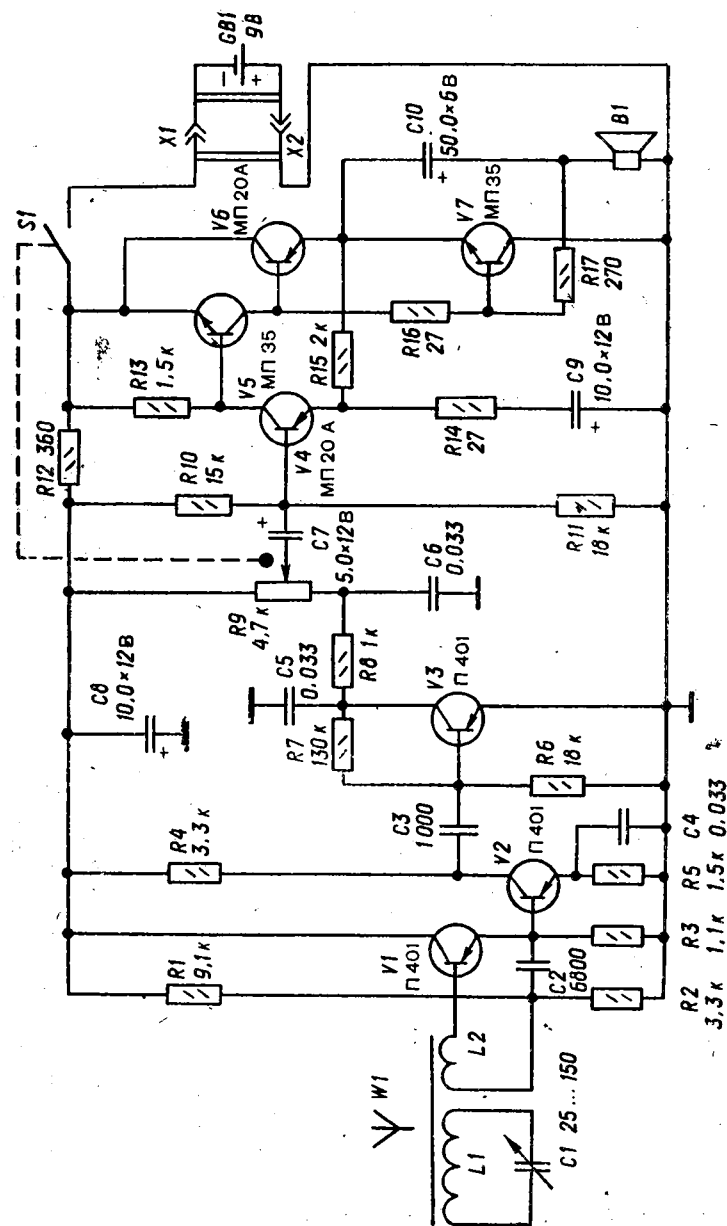


Рис. 79. Принципиальная схема приемника прямого усиления «Электрон-М».

с контура лишь небольшая часть напряжения. УВЧ и предназначен для усиления небольшого напряжения, выделенного на катушке связи, до значения, необходимого для нормального функционирования детекторного каскада. Для этого коэффициент усиления УВЧ должен быть равен 500—1000 (для приема радиостанций, удаленных на несколько десятков километров) или 50—100 (если прием ведется в непосредственной близости от радиостанции). УВЧ чаще всего выполняется на двух каскадах, реже на трех. Это связано с тем, что увеличение количества каскадов УВЧ связано с самовозбуждением приемника.

Приемник «Электрон-М» имеет двухкаскадный апериодический УВЧ, выполненный на транзисторах $V1$ и $V2$. Связь между этими каскадами непосредственная. Первый каскад выполнен по схеме эмиттерного повторителя, что повышает входное сопротивление приемника. Второй — по схеме с общим эмиттером. Нагрузкой этого усилительного каскада является резистор $R4$. Высокочастотный модулированный сигнал, снимаемый с резистора $R4$, через разделительный конденсатор $C3$ поступает на детектор, выполненный на транзисторе $V3$. Транзисторный детектор дает возможность получить больший коэффициент передачи по сравнению с диодным. Нагрузкой детектора является переменный резистор $R9$, который одновременно выполняет роль регулятора громкости. Как известно, на выходе детектора образуется пульсирующее напряжение, состоящее из трех составляющих. Связь УНЧ с детектором осуществляется через конденсатор $C7$, поэтому постоянная составляющая на усилитель попасть не может. Чтобы в УНЧ не попала высокочастотная составляющая, перед нагрузкой детектора включен П-образный фильтр $C5R8C6$, который отфильтровывает ее.

Сигнал звуковой частоты с подвижного контакта резистора $R9$ поступает на первый каскад УНЧ. Еще до недавнего времени УНЧ транзисторных приемников разрабатывали с применением согласующих и выходных трансформаторов. Не были исключением и приемники прямого усиления. В них нашли широкое применение согласующие трансформаторы типа ТСК (трансформатор согласующий для карманных приемников) и ТВК (трансформатор выходной для карманных приемников). Трансформаторы были неудобными элементами, поэтому начали разрабатывать УНЧ без использования трансформаторов. Эти усилители

отличаются высоким КПД, простотой конструкции, надежностью в работе, перспективностью. Все это обусловило то, что разработки УНЧ последних лет выполняются бестрансформаторными. Наглядным примером этому является УНЧ приемника «Электрон-М».

Первый каскад УНЧ этого приемника выполнен на транзисторе $V4$ по схеме с общим эмиттером. Нагрузкой каскада является резистор $R13$. Для улучшения частотной характеристики усилителя в этом каскаде осуществлена отрицательная обратная связь по переменному току с помощью цепочки $R14C9$.

Второй каскад УНЧ выполнен на транзисторе $V5$ также по схеме с общим эмиттером. Транзистор $V5$ $n-p-n$ имеет непосредственную связь с предыдущим транзистором. Нагрузкой второго каскада является резистор $R17$. Выходной двухтактный каскад является усилителем мощности, которую он отдает нагрузке — динамической головке $B1$. Каскад выполнен на транзисторах $V6$ и $V7$ различной структуры. Транзисторы выходного каскада также имеют непосредственную связь с транзистором предыдущего каскада. Между базами транзисторов $V6$ и $V7$ включен резистор $R16$, имеющий малое сопротивление. Этот резистор предназначен для создания небольшого смещения, благодаря чему в усиливаемом сигнале устраняется искажение типа «ступенька».

Положительная полуволна сигнала пропускается в нагрузку через транзистор $V7$, а отрицательная — через $V6$. В таких УНЧ надо обращать внимание на значение напряжения на эмиттерах выходных транзисторов. Чтобы выходной каскад работал с малыми искажениями, это напряжение должно быть равно половине напряжения источника питания. Выполнение этого условия достигается выбором сопротивления резистора $R17$. Резистор $R15$ введен для создания отрицательной обратной связи по постоянному току. Фильтр $R12C8$ служит для развязки УНЧ и УВЧ по цепи питания (для устранения возможного возбуждения приемника). Применение непосредственных связей между каскадами и введение отрицательных обратных связей позволяет добиться устойчивой работы приемника при изменении температуры окружающей среды.

Рассмотрим несколько практических схем, которые начинающие радиолюбители могут использовать при выполнении собственных радиоэлектронных устройств.

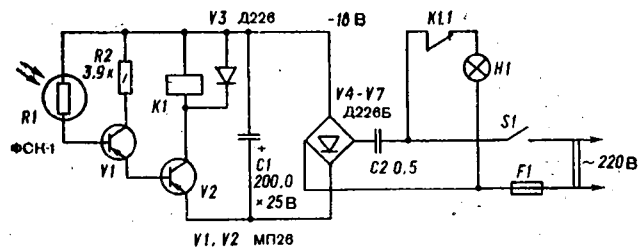


Рис. 80. Схема автомата включения уличного освещения.

Автомат включения уличного освещения можно использовать для включения или отключения уличного освещения. Датчиком в автомате является фоторезистор $R1$ (рис. 80). При затемнении — сопротивление его большое и реле $K1$ не возбуждено. Когда фоторезистор освещен, его сопротивление уменьшается, реле срабатывает и отключает нагрузку (осветительные лампы на 220 В — на схеме изображена лишь одна лампа $H1$). Реле $K1$ типа РЭС-22. При необходимости коммутации больших мощностей контакты этого реле должны коммутировать цепь питания другого реле, способного переключать большие мощности.

Модель тепловоза. Такая модель может быть частным случаем автоматического устройства, перемещающегося между двумя пунктами. Мы рассмотрим модель тепловоза, который перемещается по рельсовому участку между двумя семафорами. Электрическая схема, позволяющая выполнять автоматическое перемещение модели, приведена на рис. 81. Рассмотрим действие такого устройства. Модель тепловоза находится на рельсах, к которым подведено питание от конденсатора $C1$. По рельсам подводится напряжение к двигателю $M1$, с помощью которого и перемещается модель. При включении тумблера $S1$ срабатывает одно из реле — $K1$ или $K2$, и модель начинает двигаться. На светофоре, в сторону которого движется модель, горит зеленый свет, а на другом светофоре — красный. Перед светофором тепловоз нажимает на одну из кнопок $S2$ или $S3$, на короткое время останавливается и начинает движение в другую сторону. При этом изменяются цвета на светофорах и звучит сигнал тревоги. Модель движется в другую сторону, кнопка возвращается в прежнее положение, и сигнал исчезает. Сигнал вырабатывается звуковым генера-

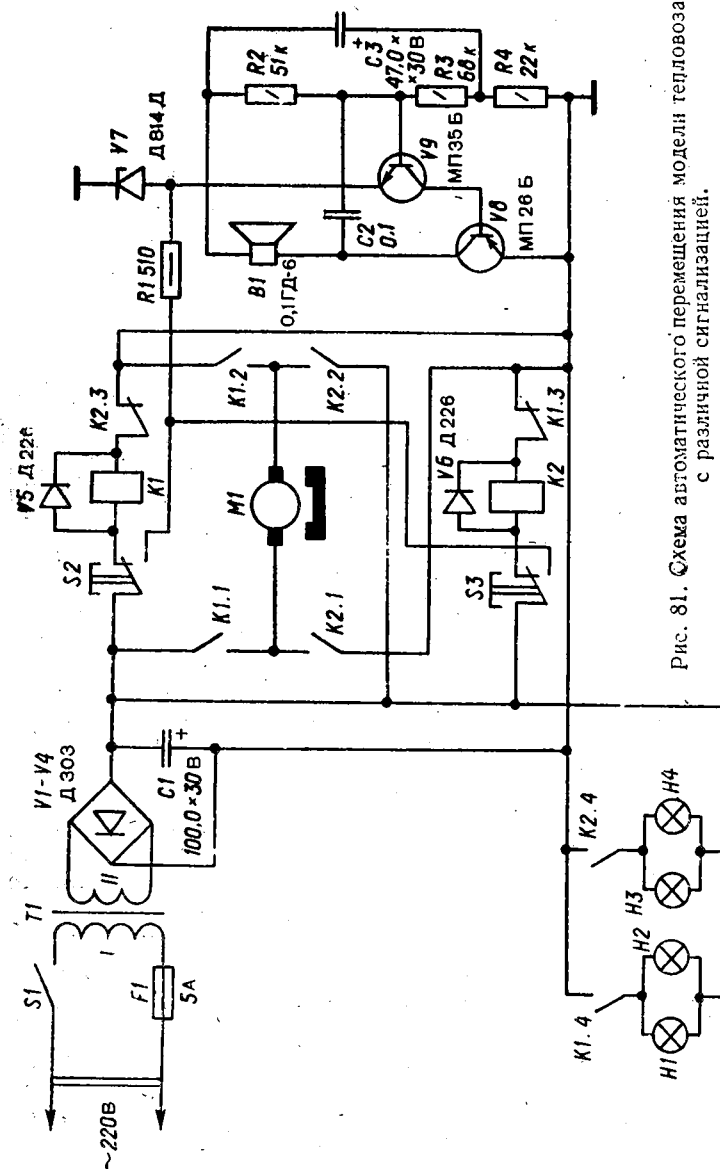


Рис. 81. Схема автоматического перемещения модели тепловоза с различной сигнализацией.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

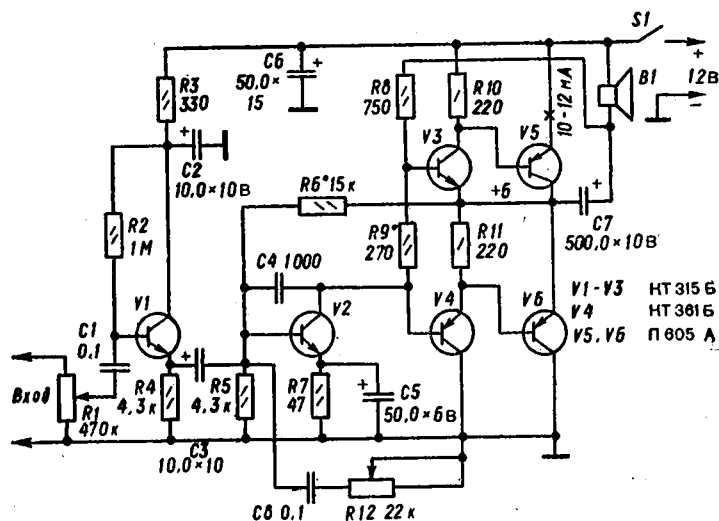


Рис. 82. Схема усилителя низкой частоты.

тором, собранном на транзисторах V8, V9. Огни светофоров выполнены на лампочках Н1—Н4.

Двигатель M1 типа МН-145Б; лампочки Н1—Н4 на 26 В; реле K1, K2 типа РЭС-22. Трансформатор T1 выполнен на сердечнике УШ18 × 32; обмотка I имеет 2200 витков ПЭВ-2 0,1; обмотка II — 230—250 витков ПЭВ-2 0,25.

Усилитель низкой частоты* (рис. 82) предназначен для воспроизведения монофонической грамзаписи (можно использовать и для других целей). Выходная мощность — около 1,2 Вт. В качестве головки B1 можно использовать головки типа 1ГД-19, 2ГД-28, 3ГД-1.

В усилителе введен регулятор тембра по высшим звуковым частотам на цепочке C8R12. Налаживание усилителя заключается в подборе резисторов R6 и R9. Резистором R6 добиваются в точке симметрии выходного напряжения, равного половине напряжения источника питания. Резистором R9 добиваются значения тока, указанного на схеме в цепи эмиттера транзистора V5.

* Борисов В. Усилитель низкой частоты. — Радио, 1979, № 4, с. 58.

Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.—Л., Госэнергонздат, 1963.

Лавриненко В. Ю. Справочник по полупроводниковым приборам. К., Техника, 1973.

Пасынков В. В., Чиркин Л. К., Шинков А. Д. Полупроводниковые приборы. М., Высшая школа, 1973.

Гершунский Б. С. Расчет основных электронных и полупроводниковых схем в примерах. К., Высшая школа, 1968.

Доброневский О. В. Справочник по радиоэлектронике. К., Высшая школа, 1978.

Терещук Р. С. и др. Справочник радиолюбителя. К., Техника, 1969, т. 1.

Радио. М., 1970—1981 гг.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1. Обозначения номинальных значений и единиц сопротивления резисторов

Единицы измерения	Обозначение единиц измерения	Пределы номинальных сопротивлений	Примеры полных обозначений	Примеры кодированных обозначений	Пределы номинальных сопротивлений	Обозначение единиц измерения	Единицы измерения
Омы	Ом	До 1000	0,1 Ом 0,27 Ом 4,7 Ом 47 Ом	E10 E27 4E7 47E	До 100	Е	Омы
			100 Ом 470 Ом	K10 K47			
Килоомы	кОм	От 1 до 1000	1 кОм 4,7 кОм 47 кОм	1K0 4K7 47K	От 0,1 до 100	К	Килоомы
			100 кОм 470 кОм	M10 M47			
Мегоммы	МОм	От 1 до 1000	1 МОм 4,7 МОм 47 МОм	1M0 4M7 47M	От 0,1 до 100	М	Мегоммы
			100 МОм 470 МОм	G10 G47	От 0,1 до 100	Г	Гигаомы

Таблица 2. Обозначения номинальных величин и единиц измерения емкости конденсаторов

Единицы измерения	Обозначение единиц измерения	Пределы номинальных емкостей	Примеры полных обозначений	Примеры кодированных обозначений	Пределы номинальных емкостей	Обозначение единиц измерения	Единицы измерения
Пикофарады	пФ	до 10 000	1 пФ 1,5 пФ 15 пФ	1P0 1P5 15P	до 100	П	Пикофарады
			100 пФ 150 пФ 1000 пФ 1500 пФ	N10 N15 1N0 1N5	От 0,1 до 100	Н	Нанофарады

Продолжение таблицы 2

Единицы измерения	Обозначение единиц измерения	Пределы номинальных емкостей	Примеры полных обозначений	Примеры кодированных обозначений	Пределы номинальных емкостей	Обозначение единиц измерения	Единицы измерения
Микрофарады	мкФ	0,01 и выше	0,01 мкФ 0,015 мкФ 0,1 мкФ 0,15 мкФ 1 мкФ 1,5 мкФ 15 мкФ 150 мкФ	10H 15H M10 M15 1M0 1M5 15M 150M	0,1 и выше		Микрофарады

Таблица 3. Ряды номинальных сопротивлений резисторов и номинальных емкостей конденсаторов постоянной емкости при различных допускаемых отклонениях

Обозначение рядов			Обозначение рядов		
E24/допускаемое отклонение ±5%	E12/допускаемое отклонение ±10%	E6/допускаемое отклонение ±20%	E24/допускаемое отклонение ±5%	E12/допускаемое отклонение ±10%	E6/допускаемое отклонение ±20%
1,0	1,0	1,0	3,3	3,3	3,3
1,1			3,6		
1,2	1,2		3,9	3,9	
1,3			4,3		
1,5	1,5	1,5	4,7	4,7	4,7
1,6			5,1		
1,8	1,8		5,6	5,6	
2,0			6,2		
2,2	2,2	2,2	6,8	6,8	6,8
2,4			7,5		
2,7	2,7		8,2	8,2	
3,0			9,1		

Таблица 4. Обозначения допускаемых отклонений сопротивления резисторов

Допускаемое отклонение сопротивления от номинального значения, %	±0,5	±1	±2	±5	±10	±20	±30
Кодированное обозначение	Д	Р	Л	И	С	В	Ф

Таблица 5. Обозначения допускаемых отклонений емкости конденсаторов

Допускаемое отклонение емкости от номинального значения, %	$\pm 0,4$	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20	± 30	± 50 -10	± 50 -20	± 80 -20	± 100	± 100 -10
Кодированное обозначение	Х	Р	Л	И	С	В	Ф	Э	Б	А	Я	Ю

Таблица 6. Номинальное значение и условное обозначение групп конденсаторов по ТКЕ в интервале температур от +20 до 85°С

Номинальное значение ТКЕ на 1° С	Условное обозначение группы				
	Буквами и цифрами	Цветным кодом			
		1-й вариант		2-й вариант	
		Цвет покрытия	Цвет марки- ровочного знака	Цвет пер- вого мар- кировочно- го знака	Цвет второго маркировоч- ного знака
Конденсаторы с диэлектриком из высокочастотной керамики					
+120·10 ⁻⁶	П120	Синий	—	Синий	Синий
+100·10 ⁻⁶	П100	Синий	Черный	Синий	Черный
+33·10 ⁻⁶	П33	Серый	—	Серый	Синий
0	МПО	Голубой	Черный	Голубой	Черный
-33·10 ⁻⁶	М33	Голубой	Коричне- вый	Голубой	Коричневый
-47·10 ⁻⁶	М47	Голубой	—	Голубой	Голубой
-75·10 ⁻⁶	М75	Голубой	Красный	Голубой	Красный
-150·10 ⁻⁶	М150	Красный	Оранжевый	Красный	Оранжевый
-220·10 ⁻⁶	М220	Красный	Желтый	Красный	Желтый
-330·10 ⁻⁶	М330	Красный	Зеленый	Красный	Зеленый
-470·10 ⁻⁶	М470	Красный	Синий	Красный	Синий
-750·10 ⁻⁶	М750	Красный	—	Красный	Красный
-1500·10 ⁻⁶	М1500	Зеленый	—	Зеленый	Зеленый

Примечание. 2-й вариант цветного кода применяют для маркировки группы конденсаторов, покрытия которых не соответствуют цвету, указанному в 1-м варианте кода. При этом покрытие конденсаторов может быть любым, кроме цвета второго маркировочного знака. При применении 2-го варианта цветного кода площадь первого маркировочного знака делают в два раза больше площади второго.

Таблица 7. Допускаемое изменение емкости керамических конденсаторов с ненормированным ТКЕ в интервале рабочих температур относительно емкости в нормальных условиях

Допускаемое изменение емкости, %	Условное обозначение группы				
	Буквами и цифрами	Цветным кодом			
		1-й вариант		2-й вариант	
		Цвет покрытия конденсаторов	Цвет маркировочного знака	Цвет первого маркировочного знака	Цвет второго маркировочного знака
± 10	H10	Оранжевый	Черный	Оранжевый	Черный
± 20	H20	Оранжевый	Красный	Оранжевый	Красный
± 30	H30	Оранжевый	Зеленый	Оранжевый	Зеленый
± 50	H50	Оранжевый	Синий	Оранжевый	Синий
— 70	H70	Оранжевый	—	Оранжевый	Оранжевый
— 90	H90	Оранжевый	Белый	Оранжевый	Белый

Примечание. Маркировка 2-м вариантом этих конденсаторов аналогична кодировке этого же варианта табл. 6.

Таблица 8. Основные параметры некоторых кремниевых стабилитронов и стабилиторов (для интервала температур $-60 \div +25^\circ\text{C}$)

Тип стабилитрона	Номинальное напряжение стабилизации $U_{ст. В}$	Минимальный ток стабилизации /ст. мин., мА	Номинальный ток стабилизации /ст. мА	Максимальный ток стабилизации /ст. макс., мА	Допустимая мощность рассеяния P, мВт
Однополярные стабилитроны					
D808(D814A)	7—8,5	3	5	33(40)	280(340)
D809(D814Б)	8—9,5	3	5	29(36)	280(340)
D810(D814В)	9—10,5	3	5	26(32)	280(340)
D811(D814Г)	10—12	3	5	23(29)	280(340)
D813(D814Д)	11,5—14	3	5	20(24)	280(340)
2C133A(KC133A)	2,97—3,63	3	10	81	330(300)
2C147A(KC147A)	4,23—5,17	3	10	58	330(300)
2C156A(KC156A)	5,04—6,16	3	10	55	330(300)
2C168A(KC168A)	6,12—7,48	3	10	45	330(300)
Двухполярные стабилитроны					
KC162A	5,8—6,6	3	10	20	150
KC170	6,3—7,8	3	10	20	150
KC210Б	9,3—10,7	3	5	14	150
Стабилитроны					
2C107A	0,63—0,77	1	10	100	—
2C113A	1,17—1,43	1	10	100	—
2C119A	1,72—2,1	1	10	100	—

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава I. Элементы радиоэлектронных схем	7
1. Резисторы	7
2. Конденсаторы	12
3. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы	24
4. Полупроводники, образование $p-n$ перехода, полупроводниковые диоды	33
5. Транзисторы	46
6. Тиристоры	66
7. Прочие полупроводниковые схемные элементы	74
Глава II. Электрические цепи	84
1. Цепи постоянного тока	84
2. Цепи переменного тока	85
3. Последовательный и параллельный колебательные контуры	87
4. Импульсные сигналы	89
Глава III. Узлы полупроводниковых радиоэлектронных устройств	91
1. Транзисторные усилители	91
2. Мультивибраторы	100
3. Электронное реле	105
4. Реле времени	107
5. Фотореле	109
Глава IV. Источники питания полупроводниковых радиоэлектронных устройств	111
1. Химические источники питания	111
2. Выпрямление переменного напряжения	111
3. Сглаживание выпрямленного напряжения	114
4. Трансформаторы источников питания	115
5. Стабилизация напряжения в источниках питания	117
Глава V. Детекторные приемники, приемники прямого усиления и некоторые практические схемы	123
1. Амплитудная модуляция	123
2. Амплитудное детектирование	124
3. Детекторные приемники	128
4. Приемники прямого усиления	129
Список рекомендованной литературы	139
Приложения	140