

**Москатов
Евгений Анатольевич**

**Электронная техника.
Начало**

2010

Москатов Е. А. Электронная техника. Начало. – 3-е изд., перераб. и доп. – Таганрог, 204 с., ил.

Рукопись содержит более 265000 знаков с пробелами основного текста.

Аннотация

В книгу входят сведения о полупроводниках, о созданных на их основе современных компонентах, например, плазменных панелях, дисплеях на углеродных нанотрубках, ионисторах, биполярных транзисторах с изолированными затворами, запираемых тиристорах и прочих. Материал содержит ответы на некоторые вопросы электронной техники, его отличает компактное изложение – в каждой теме дана минимально необходимая информация. Простым языком, понятным читателю с невысоким уровнем подготовки, был рассказан материал на качественном уровне без использования сложных формул и вычислений. Материал может быть интересен радиолюбителям, а также студентам профессионально-трудовых и средних специальных учебных заведений.

Лицензионное соглашение

1. Все права, не оговоренные в настоящем лицензионном соглашении, закреплены за Москатовым Евгением Анатольевичем.
2. Авторские права на рукопись «Электронная техника. Начало» принадлежат исключительно автору – Москатову Евгению Анатольевичу.
3. Автор предоставляет лицензию на использование данного материала (книга «Электронная техника. Начало»), но не продаёт рукопись. Книга «Электронная техника. Начало» распространяется по лицензии freeware.
4. «Электронная техника. Начало» РАСПРОСТРАНЯЕТСЯ НА УСЛОВИЯХ «AS IS». Москатов Евгений Анатольевич НЕ БЕРЁТ НА СЕБЯ И НЕ ПОДРАЗУМЕВАЕТ КАКИХ-ЛИБО ГАРАНТИЙНЫХ ОБЯЗАТЕЛЬСТВ. ВЫ ИСПОЛЬЗУЕТЕ книгу «Электронная техника. Начало» НА СВОЙ РИСК. АВТОР НЕ БЕРЁТ НА СЕБЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА ПОТЕРЮ ДАННЫХ, УЩЕРЬ, ПОТЕРЮ ПРИБЫЛИ ИЛИ ЛЮБЫЕ ДРУГИЕ ПОТЕРИ, ПРОИЗОШЕДШИЕ ВО ВРЕМЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЛИ НЕПРАВИЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННОГО МАТЕРИАЛА.
5. Вы не имеете права распечатывать, переписывать, изменять, копировать содержимое, создавать новые версии, сдавать внаём или в аренду, продавать книгу или любой текст или рисунки из неё иначе, чем определено настоящим лицензионным соглашением. Любое такое нелегальное использование означает автоматическое и немедленное прекращение действия настоящего соглашения и может преследоваться по закону. Исключение составляет случай, в котором указанные действия явно разрешены законодательством, несмотря на наличие в лицензионном соглашении данного ограничения.
6. Условия настоящего соглашения, равно как и материала книги,

могут быть изменены в последующих версиях книги «Электронная техника. Начало».

7. При распространении книги «Электронная техника. Начало» должны быть соблюдены следующие условия: (а) материал должен включать только оригинальный файл, предоставленный Москатовым Евгением Анатольевичем. Книга лицензируется как единое изделие. Вы не имеете права изменять, удалять или добавлять файлы в рукопись. Составляющие части запрещено изымать из книги для раздельного использования; (б) вы не имеете права брать плату за книгу, за исключением разумной суммы за носитель данных, каналы связи и т.п.

8. Автор придерживаемся строгих правил по секретности информации о своих пользователях, и НЕ собирает персонально-идентифицируемой информации о своих пользователях, за исключением случаев, когда она была добровольно ему сообщена.

9. Если Вы не согласны с условиями настоящего лицензионного соглашения или если условия настоящего соглашения противоречат законам Вашей страны, Вы должны немедленно удалить материалы книги «Электронная техника. Начало» с Ваших устройств хранения информации и прекратить пользоваться данным продуктом.

10. Чтение книги «Электронная техника. Начало» означает принятие условий настоящего лицензионного соглашения.

© Москатов Евгений Анатольевич, 2010

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	13
1. ПРОСТЕЙШИЕ КОМПОНЕНТЫ	14
1.1. Резисторы	14
1.2. Варисторы и негисторы	15
1.3. Терморезисторы	16
1.4. Конденсаторы	16
1.5. Ионисторы	17
1.6. Моточные компоненты	18
1.6.1. Катушки индуктивности и дроссели	18
1.6.2. Трансформаторы и пьезотрансформаторы	20
2. ПОЛУПРОВОДНИКИ И ПЕРЕХОДЫ	22
2.1. Общие сведения об электропроводности веществ	22
2.1.1. Диэлектрики, проводники, сверхпроводники и полупроводники	22
2.1.2. Носители заряда. Проводимости полупроводников: собственная и примесная	23
2.1.3. Диапазоны энергий и распределение носителей заряда в них	25
2.2. Электронно-дырочный переход	27
2.2.1. Получение электронно-дырочного перехода	27

2.2.2. Прямое и обратное включения электронно-дырочных переходов	29
2.2.3. Ёмкости и частотные свойства электронно-дырочных переходов	31
2.2.4. Пробои электронно-дырочных переходов	32
2.3. Переход и диод Шоттки: получение и включения в прямом и обратном направлении	34
2.4. Гетеропереходы	36
2.5. Эффекты полупроводников	37
2.5.1. Эффект Ганна	37
2.5.2. Эффект поля	40
2.5.3. Эффект Суля	40
2.5.4. Эффекты Пельтье и Зеебека	41
2.5.5. Туннельный эффект	42
2.5.6. Эффект Холла	44
3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ	46
3.1. Конструкция и основные параметры полупроводниковых диодов	46
3.1.1. Общие сведения о полупроводниковых диодах	46
3.1.2. Конструкции и простейшие способы изготовления полупроводниковых диодов	47
3.1.3. Некоторые основные параметры полупроводниковых диодов	49
3.2. Выпрямительные диоды	50
3.3. Импульсные диоды	51
3.4. Варикапы	52

3.5. Стабилитроны и стабисторы	53
3.6. Светодиоды	56
3.7. Полупроводниковые лазеры	57
3.8. Фотодиоды	59
4. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ	61
4.1. Общие сведения о транзисторах	61
4.2. Конструкция некоторых биполярных транзисторов	62
4.3. Принцип действия биполярных транзисторов	64
4.4. Схемы включения биполярных транзисторов	68
4.4.1. Схема включения транзистора с общим эмиттером	68
4.4.2. Схема включения транзистора с общим коллектором	70
4.4.3. Схема включения транзистора с общей базой	71
4.5. Биполярные фототранзисторы	72
4.6. Влияние частоты на усилительные свойства биполярных транзисторов	73
4.7. Влияние температуры на режимы работы биполярных транзисторов	74
5. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ	76
5.1. Общие сведения о полевых транзисторах	76
5.2. Полевые транзисторы с управляющим переходом	77

5.2.1. Конструкция полевых транзисторов с управляющим переходом	77
5.2.2. Принцип действия полевых транзисторов с управляющим переходом	79
5.3. Полевые транзисторы с изолированным затвором	82
5.3.1. Полевые транзисторы со встроенным каналом	82
5.3.2. Полевые транзисторы с индуцированным каналом	84
5.4. Режимы работы полевых транзисторов	86
5.4.1. Динамический режим работы транзистора	86
5.4.2. Ключевой режим работы транзистора	88
6. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ИЗОЛИРОВАННЫМИ ЗАТВОРАМИ	90
6.1. Общие сведения о БТИЗ	90
6.2. Конструкция и принцип действия БТИЗ	92
6.3. Основные параметры БТИЗ	94
7. ТИРИСТОРЫ	95
7.1. Общая информация о тиристорах	95
7.2. Динисторы	95
7.3. Тринисторы	98
7.4. Запираемые тиристоры	100
7.5. Симисторы	101

7.6. Фототиристоры	103
7.7. Основные параметры тиристоров	104
8. ВАКУУМНЫЕ И ИОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ	105
8.1. Общие сведения об электровакуумных приборах	105
8.2. Электровакуумные диоды	106
8.2.1. Конструкция и принцип действия электровакуумных диодов	106
8.2.2. Основные параметры и анодная характеристика электровакуумных диодов	107
8.3. Триоды	109
8.3.1. Конструкция и принцип действия триодов	109
8.3.2. Основные характеристики и параметры триодов	110
8.4. Тетроды	113
8.4.1. О тетродах и влиянии экранирующих сеток на их параметры	113
8.4.2. Динатронный эффект	115
8.5. Лучевые тетроды	116
8.6. Пентоды	118
8.7. Лампы бегущей волны	118
8.8. Лампы обратной волны	120
8.9. Пролётные клистроны	122
8.10. Магнетроны	124

8.11. Мазеры	126
8.12. Тиратроны	127
8.13. Крайтроны и спрайтроны	128
9. ВВЕДЕНИЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКУ	132
9.1. Интегральные микросхемы	132
9.2. Плёночные микросхемы	133
9.3. Гибридные интегральные микросхемы	135
9.4. Полупроводниковые микросхемы	136
10. УСТРОЙСТВА ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ	137
10.1. Индикаторы	137
10.1.1. Светодиодные индикаторы	137
10.1.2. Жидкокристаллические индикаторы	138
10.2. Общие сведения об электронно-лучевых трубках	140
10.3. Жидкокристаллические дисплеи и панели	142
10.3.1. Общие сведения о жидкокристаллических дисплеях	142
10.3.2. Электролюминесцентная подсветка жидкокристаллических дисплеев	143
10.3.3. Светодиодная подсветка жидкокристаллических дисплеев	144
10.3.4. Время отклика жидкокристаллических дисплеев и влияние температуры на их работу	144

10.4. Плазменные панели	145
10.5. Органические светодиодные дисплеи	146
10.6. Дисплеи на углеродных нанотрубках	148
10.7. Сенсорные экраны и классификация их типов	149
10.8. Голографические системы	151
11. АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА	152
11.1. Усилители сигналов и их классификация	152
11.2. Основные параметры и характеристики усилителей	153
11.2.1. Основные параметры усилителей	153
11.2.2. Важнейшие характеристики усилителей	155
11.3. Работа простейшего усилителя на различных частотах	158
11.4. Выходные усилительные каскады	159
11.4.1. Однотактный трансформаторный каскад	159
11.4.2. Двухтактный трансформаторный каскад	161
11.4.3. Двухтактный бестрансформаторный каскад	164
11.5. Основные сведения о режимах работы усилителей	165
11.5.1. Проходная динамическая характеристика и общие сведения о классах усиления	165
11.5.2. Режим работы класса А	167
11.5.3. Режим работы класса В	168
11.5.4. Режим работы класса АВ	168
11.5.5. Режим работы класса С	169
11.5.6. Режим работы класса D	170

11.6. Сведения об обратных связях и о влиянии, которое они оказывают на работу усилителей	170
11.6.1. Основная информация об обратных связях	170
11.6.2. Влияние обратных связей на коэффициенты усиления каскадов	172
11.7. Автогенераторы	175
11.8. Усилители постоянного тока	178
11.8.1. Усилитель постоянного тока с непосредственными связями	179
11.8.2. Дифференциальный усилитель	180
11.8.3. Операционные усилители	182
11.8.4. Обзор некоторых параметров операционных усилителей	183
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	185
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	200

Предисловие

Предыдущий вариант рукописи «Электронная техника» был написан в течение 2005 года, когда я был ещё студентом, в качестве подготовки к экзамену, и оформленный в электронную книгу материал в июне 2005 года был выставлен в Интернет. Книга оказалась востребована. На страницах форумов появились многочисленные обсуждения и цитаты из неё, а мой электронный ящик был заполнен письмами с отзывами и предложениями, например, о ещё более широком освещении новой элементной базы. Шли письма от студентов, радиолюбителей, преподавателей... Я благодарен всем читателям. К сожалению, не всё в той версии было выдержано на высоком уровне. Для исправления недостатков я заново переписал и отредактировал материал с учётом некоторых последних достижений в современной электронике. Изложение информации теперь выполнено официальным стилем. Этот полностью переработанный материал, по некоторым параметрам превосходящий предыдущий, сейчас перед Вами. Он предназначен для самостоятельного ознакомления с основами электронной техники всеми заинтересованными лицами и включает информацию по микроэлектронике, по вакуумной, оптической и квантовой электронике. Я надеюсь, что он будет Вам полезен, а также заранее приношу извинения за возможные ошибки и неточности.

Если Вам интересно, то можете посетить официальный сайт <http://moskatov.narod.ru>, на котором для ознакомления выложены подобные книги в электронной форме, радиотехнические программы, их исходные тексты и много другой информации. Для связи с автором можно использовать форум на этом сайте.

Автор, инженер, Евгений Анатольевич Москатов

1. Простейшие компоненты

1.1. Резисторы

Резисторы – это компоненты, основным параметром которых выступает сопротивление. Промышленность для аппаратуры широкого потребления выпускает резисторы сопротивлением примерно от 0,1 Ом до 100 МОм и мощностью от 0,125 Вт до 100 Вт.

В соответствии с веществами, из которых изготавливают важнейшие части компонентов, выделяют группы металлофольговых, проволочных и непроволочных резисторов. Металлофольговые резисторы изготавливают на основе диэлектриков, на которые наносят фольговые покрытия, к которым подсоединяют выводы. Проволочные резисторы выполняют из проволоки с высоким удельным сопротивлением, материалом которой часто служит нихром, манганин, константан и подобные сплавы. Чтобы уменьшить габариты таких резисторов, проволоку обычно навивают на диэлектрический каркас, например, спиралью укладывают на керамический стержень. Паразитная индуктивность проволочных резисторов при указанном способе изготовления довольно велика. Непроволочные резисторы можно отнести к классам углеродистых, полупроводниковых, металлодиэлектрических или композитных компонентов.

По возможности регулировки сопротивления резисторы подразделяют на постоянные, подстроечные и переменные. У постоянных резисторов сопротивление должно быть неизменно. У подстроечных резисторов его можно некоторое число раз отрегулировать, после чего наступит физический износ деталей. У переменных резисторов его можно изменять много раз. Подстроечные и переменные резисторы относят к группам регулировочных резисторов.

1.2. Варисторы и негисторы

Варисторы – это компоненты, сопротивление которых уменьшается при повышении приложенного напряжения сверх определённого значения. Таким образом, сопротивления варисторов нелинейны. Основным материалом для производства варисторов обычно выступает карбид кремния. Когда приложенное к выводам варистора напряжение превысит фиксированный порог, происходит пробой окислов, которыми покрыты кристаллы карбида кремния, и возникает эмиссия носителей заряда с поверхностей этих кристаллов. Это вызывает уменьшение сопротивления варистора. Варистор можно включать в цепь в любой полярности. Вольтамперная характеристика (ВАХ) варисторов симметрична, что отражено на рис. 1.1.

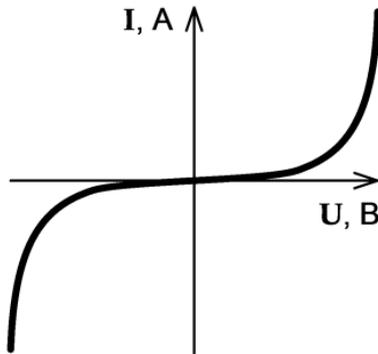


Рис. 1.1. ВАХ варисторов

Варисторы нашли широкое применение в качестве компонентов, которые включают после предохранителя параллельно питающей сети на входе электропитающих устройств с целью защиты последних от кратковременных перенапряжений, иногда возникающих в сети.

Негисторами называют специальные варисторы, вольтамперная характеристика которых имеет участок отрицательного со-

противления и симметрична. Микромощные негисторы применяются в микросхемах.

1.3. Терморезисторы

Терморезисторы – это компоненты, сопротивления которых зависят от температуры. Важным параметром терморезисторов выступает температурный коэффициент сопротивления (ТКС), который отражает, на сколько процентов станет иным сопротивление детали при изменении температуры на 1 °С. Терморезисторы, сопротивление которых возрастает при увеличении температуры, обладают положительным ТКС, и такие компоненты называют позисторами. Эти терморезисторы изготавливают чаще всего с использованием твёрдых растворов титаната бария. Терморезисторы, сопротивление которых уменьшается при увеличении температуры, обладают отрицательным значением ТКС, их изготавливают на основе оксидов магния, оксидов никеля и прочих оксидов с примесями кремния или германия. Помимо ТКС, к основным параметрам терморезисторов относят сопротивление в холодном состоянии, максимальную рабочую температуру, максимальную мощность рассеяния и др.

Маломощные терморезисторы применяют в качестве датчиков температуры, реле времени, а мощные – для ограничения импульсов тока, потребляемых от питающей сети импульсными источниками питания и т.д.

1.4. Конденсаторы

Конденсаторы – это компоненты, основным параметром которых выступает ёмкость, а основное назначение состоит в накоплении электрических зарядов. Ёмкость конденсатора тем выше, чем больше площадь обкладок, меньше расстояние между ними и чем выше

диэлектрическая проницаемость вещества между обкладками. Простейший конденсатор состоит из двух обкладок, между которыми размещён слой диэлектрика. Для экономии места диэлектрики и обкладки конденсаторов большой ёмкости сворачивают в рулоны.

Диэлектрики конденсаторов могут быть выполнены:

- из оксидной плёнки;
- из газов или воздуха;
- из жидкостей;
- из твёрдых органических материалов;
- из твёрдых неорганических материалов.

Различают постоянные, подстроечные и переменные конденсаторы. Постоянные конденсаторы обладают фиксированной ёмкостью, подстроечные конденсаторы допускают некоторое число регулировок ёмкости, а конденсаторы переменной ёмкости допускают её многократное изменение. Фактическая ёмкость постоянных конденсаторов всегда отличается от номинальной ёмкости. В документации на конденсаторы обычно указаны допустимые отклонения фактических ёмкостей относительно номинальных.

Важным параметром конденсаторов выступает тангенс угла потерь, которым называют отношение активной мощности к реактивной при фиксированной частоте, напряжённости поля, температуре.

1.5. Ионисторы

Ионисторы – это химические источники тока, обладающие исключительно высокой ёмкостью, обусловленной наличием двойного электрического слоя, возникающего на поверхности электродов, которые помещены в электролит. Ионисторы не относят к конденсаторам, хотя ёмкость – это их основной показатель. Ионисторы не имеют диэлектрика, а наличие изоляторов, называемых сепараторами, между электродами необходимо сугубо для исключения их за-

мыкания, но не для увеличения ёмкости. Сепараторы изготавливают из таких материалов, которые свободно пропускают ионы электролита. Электроды выполняют из материалов, которые порождают заряды с противоположными знаками. Их изготавливают из пористых веществ, например, активированного угля или графена, чтобы получить очень большую площадь поверхности, к которой поступает электролит. В качестве твёрдого электролита используют RbAg_4J_5 и пр. Ионы электролита притягиваются к электродам, и на поверхностях каждого электрода возникает слой из анионов и катионов, которые образуют электрический слой. Так как электрические слои возникают на обоих электродах, они носят название двойного электрического слоя. Толщина электрического слоя чрезвычайно мала и может составлять несколько нанометров, ввиду чего ёмкость ионисторов может быть очень большой. Отдельные экземпляры ионисторов обладают ёмкостью в тысячи фарад при номинальном напряжении в несколько вольт. Ионисторы применяют в резервных источниках питания, в устройствах запуска двигателей и т.д.

1.6. Моточные компоненты

1.6.1. Катушки индуктивности и дроссели

Катушки индуктивности – это компоненты, предназначенные для накопления энергии в магнитном поле, и состоящие из проводов, уложенных в обмотки, которые обычно охватывают магнитопроводы. Магнитопроводы, выполненные из ферромагнетиков, используют для увеличения индуктивности катушек, а выполненные из диамагнетиков уменьшают их индуктивность. Обмотки катушек индуктивности выполняют проводами круглого или прямоугольного сечений, а обмотки некоторых мощных высокочастотных компонентов – медными или посеребрёнными лентами. Катушки индук-

тивности без магнитопроводов и с магнитопроводами из диамагнетиков применяют только при протекании по обмоткам токов высокой частоты. С целью снижения паразитных индуктивности рассеяния и ёмкостей обмоток производят намотку отдельных катушек индуктивности проводами, которые укладывают с шагом под определённым углом. Так, широко распространена намотка типа «универсаль». Для расчёта индуктивности однослойной катушки цилиндрической формы без магнитопровода при укладке провода виток к витку можно применить следующую формулу:

$$L \approx \frac{d \cdot W^2 \cdot 10^{-3}}{0,45 + \frac{\ell}{d}}, \text{ мкГн,}$$

где d – внешний диаметр обмотки, мм;

W – число витков обмотки;

ℓ – длина обмотки, мм.

А число витков такой катушки индуктивности определим согласно выражению:

$$W \approx 32 \cdot \sqrt{\left(\frac{\ell}{d} + 0,45\right)} \cdot \frac{\ell}{d}.$$

Индуктивность тороидальной катушки без магнитопровода найдём по формуле:

$$L \approx 3,1 \cdot \frac{b^2 \cdot W^2 \cdot 10^{-4}}{D}, \text{ мкГн,}$$

где b – диаметр одного полного витка (или, то же самое, диаметр поперечного сечения катушки), мм;

D – усреднённый диаметр тора, мм.

Дроссели пульсирующего тока – это катушки индуктивности, предназначенные для пропускания постоянной составляющей тока и задерживания его переменной составляющей. Такие дроссели ис-

пользуют, например, в фильтрах постоянного напряжения источников питания. Дроссели переменного тока нужны для создания индуктивного сопротивления в цепях, по которым протекает сугубо переменный ток. Эти дроссели применяют, например, в качестве компонентов колебательных систем резонансных и квазирезонансных импульсных источников питания. На пути протекания магнитных потоков в сердечники описываемых дросселей часто вводят немагнитные зазоры, благодаря которым по обмоткам дросселей можно пропускать большие токи без вхождения магнитопроводов в насыщение.

1.6.2. Трансформаторы и пьезотрансформаторы

Трансформаторами называют статические компоненты, предназначенные для преобразования электрической энергии одной величины в электрическую энергию другой величины. Трансформация возможна только переменного напряжения. Конструктивно трансформаторы имеют магнитопроводы, на которые укладывают провода обмоток. Типы и марки магнитопроводов выбирают в зависимости от частоты, заданного температурного диапазона, скважности и прочего. Магнитопроводы высокочастотных трансформаторов изготавливают обычно из ферритов, низкочастотных – из трансформаторных сталей и пермаллоев. Для обеспечения высокого напряжения пробоя между обмотками прокладывают изоляцию. Ту обмотку двухобмоточного трансформатора, на которую подают напряжение, называют первичной, а ту, с которой снимают напряжение, – вторичной. Если переменное напряжение на первичной обмотке меньше, чем напряжение на вторичной обмотке, то такой трансформатор называют повышающим. А если наоборот – то называют понижающим. Если часть энергии из первичной обмотки поступает во вто-

ричную обмотку не через магнитную цепь, а по электрическому соединению, то имеем дело с автотрансформатором.

Различают сигнальные трансформаторы и трансформаторы питания. Сигнальные трансформаторы предназначены для передачи сигналов с минимальными искажениями. Бывает, что сигнальные трансформаторы задействуют для гальванической развязки цепей. Трансформаторы питания нужны в устройствах, обеспечивающих электропитание аппаратуры, которая по каким-либо причинам не может быть подключена непосредственно к питающей сети, например, ввиду несоответствия величин напряжений.

Промышленность также выпускает пьезотрансформаторы. Эти компоненты не имеют обмоток, а их принцип действия основан на наличии пьезоэффекта. Пьезотрансформатор состоит из кристалла вещества, в который вожжены серебряные электроды, обладающего пьезоэффектом, т.е. способностью к обратимым механическим деформациям под влиянием на него электрического поля. К таким веществам относят титанит бария, кварц, турмалин и прочие. Когда переменное напряжение подают на два предназначенные для этого электрода пьезотрансформатора, в кристалле сегнетоэлектрика возникают упругие колебания, которые дойдя до другой пары электродов, приводят к появлению между ними ЭДС. Пьезотрансформаторы могут функционировать в узкой полосе частот, на которой можно наблюдать резонансные явления. Крепление пьезотрансформаторов осуществляют мягкими кронштейнами или скобами в тех местах, в которых амплитуда изгиба пьезопластин минимальна. Наибольшая мощность пьезотрансформаторов обычно не велика и часто составляет всего от 5Вт до 30Вт.

2. Полупроводники и переходы

2.1. Общие сведения об электропроводности веществ

2.1.1. Диэлектрики, проводники, сверхпроводники и полупроводники

По электропроводности вещества можно разделить на четыре группы: диэлектрики, проводники, сверхпроводники и полупроводники.

Диэлектрики – это вещества, которые существенно препятствуют протеканию через них электрического тока ввиду высокого удельного сопротивления, часто превышающего 10^8 Ом · м. Диэлектрики, которые применяют в качестве изоляции, например, проводов, обычно обладают на много порядков более высоким сопротивлением.

Проводники – это материалы, которые почти не препятствуют протеканию по ним электрического тока благодаря низкому удельному сопротивлению, обычно не превышающему 10^{-5} Ом · м. Металлические проводники используют в кабелях и проводах в качестве токоведущих шин.

Сверхпроводники – это материалы, которые при охлаждении до некоторой критической температуры резко уменьшают удельное сопротивление до нуля. В результате отсутствуют потери энергии на омическом сопротивлении, что позволяет создавать мощные высокоэффективные кабели, трансформаторы мощностью в мегаватты с высоким КПД и т.п. К сверхпроводникам относят соединения NbN, NbTi, Nb₃Sn и другие. У большинства сверхпроводников кри-

тическая температура лежит вблизи абсолютного нуля, что снижает практическую пригодность этих материалов.

Полупроводники – это вещества, удельное сопротивление которых зависит от внешних условий, например, флуктуаций температуры, изменений интенсивности облучения световым потоком и прочего. В результате, в определённых условиях полупроводники могут менять своё удельное сопротивление, и оно может стать со всеми промежуточными градациями либо таким, как у проводников, либо как у диэлектриков. При температуре вблизи абсолютного нуля полупроводники обладают диэлектрическими свойствами, а при нагреве выше определённой критической температуры они проявляют свойства проводников. Зависимость их сопротивления от температуры нелинейна.

2.1.2. Носители заряда. Проводимости полупроводников: собственная и примесная

Собственным полупроводником называют полностью лишённый примесей полупроводник с идеальной кристаллической решёткой без дефектов. Его также называют полупроводником *i*-типа (от слова *intrinsic*, что в переводе с английского означает «собственный»). Собственный полупроводник при температуре $-273,15$ °С является диэлектриком, т.е. при температуре абсолютного нуля в собственном полупроводнике отсутствуют свободные носители заряда. При температуре выше абсолютного нуля возникают колебания атомов в узлах кристаллической решётки. При получении большей энергии, нежели ширина запрещённой зоны, они разрывают ковалентные связи, образуя фононы, в результате чего возникают расположенные в непосредственной близости друг от друга пары носителей зарядов: дырок и электронов, которые стали свободными. Дырка – это незаполненная электроном ковалентная связь, которая, аналогично частице, обладает положительным зарядом, равным по модулю отрица-

тельному заряду электрона. Образование электронно-дырочных пар называют генерацией носителей зарядов, обратный процесс – рекомбинацией зарядов. Генерацию пар носителей заряда, вызванную теплом, называют термогенерацией. Кроме того, появление электронно-дырочных пар происходит при облучении материала световым потоком, а также при помещении его в электрическое поле и пр. Последнее может быть как недостатком, так и достоинством. Если в полупроводнике, который поместили в электрическое поле, возникает движение носителей заряда, то его именуют дрейфом, а протекающий ток – дрейфовым током. Под действием электрического тока происходит миграция дырок: место дырки заполняет ближайший электрон, на месте которого возникает дырка, затем очередной электрон, расположенный рядом с дыркой, занимает её место и так далее. Собственной проводимостью называют проводимость полупроводника i -типа, возникшую в результате термогенерации носителей заряда. Если электрический ток был обусловлен неравномерным распределением носителей заряда, то такой ток называют диффузионным. Длительность времени от генерации до момента рекомбинации носителя заряда называют временем жизни, а пройденное им за это время расстояние называют диффузионной длиной.

Примесной называют проводимость полупроводника, в который были введены легирующие добавки. Полупроводник с примесями не может быть i -типа. Легирование – это процесс дозированного внесения примесей в полупроводник для придания ему новых свойств, которых не было в исходном материале, например, для изменения типа проводимости. Или таких новых свойств, например, как появление низкой зависимости к облучению светом, нечувствительностью полупроводника к полям (или, наоборот, высокой чувствительности) и прочему. Если при введении примеси в полупроводнике доминировать начнёт дырочная проводимость, то есть дырки собственного полупроводника будут «сложены» с дырками при-

меси, то такой полупроводник называют дырочного, или р-типа. А если превалять станет электронная проводимость, то полупроводник называют электронного, или n-типа. В полупроводнике дырочного типа основными носителями заряда являются дырки, а в полупроводнике электронного типа – электроны. В полупроводнике электронного типа дырки будут неосновными носителями заряда, а электроны – основными. В полупроводнике дырочного типа электроны будут неосновными носителями заряда, а дырки – основными. Если при введении примеси концентрация электронов превысит концентрацию дырок, то её называют донорной примесью. А если с введением примеси концентрация дырок станет больше концентрации электронов, то такую примесь называют акцепторной. В полупроводники, которые легируют при производстве электронных компонентов, обычно вводят в неодинаковых концентрациях и акцепторную, и донорную примеси.

Если концентрация примесей в полупроводнике будет очень велика и станет достигать ориентировочно $10^{21} \dots 10^{24}$ атомов на 1 см^3 , то такой полупроводник, близкий по свойствам к металлу, называют вырожденным. В отношении классификации безразлично, какая примесь – донорная или акцепторная – привела к образованию вырожденного полупроводника. Вырожденные полупроводники практически не реагируют на флуктуации температуры.

2.1.3. Диапазоны энергий и распределение носителей заряда в них

Энергетические зоны – это диапазоны энергий, к которым можно отнести энергии электронов. Зоной валентности называют такой диапазон энергий, внутри которого находится энергия электрона, который удерживается кристаллической решёткой. Чтобы электрон покинул атом кристаллической решётки, ему необходимо сообщить большую энергию, чем ширина запрещённой зоны. Зоной проводи-

мости именуют диапазон энергий, в котором находится энергия электрона, который больше не связан с определённым атомом кристаллической решётки. Уровень Ферми – это такой энергетический уровень, на котором с вероятностью $\frac{1}{2}$ находится электрон, и который постоянен при флуктуациях температуры. Зонная энергетическая диаграмма – это рисунок, на котором показаны энергетические зоны. Зонные энергетические диаграммы, которые характерны диэлектрикам, полупроводникам и проводникам, изображены на рис. 2.1.

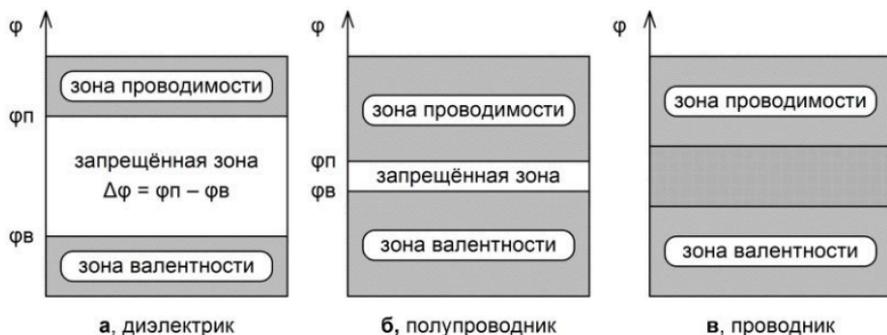


Рис. 2.1. Зонные энергетические диаграммы

На данной зонной диаграмме изображение над буквой (а) соответствует диэлектрикам, над буквой (б) – полупроводникам, а над буквой (в) – проводникам. По вертикальной оси отложена энергия электронов, а горизонтальная ось безразмерна. Между зонами проводимости и валентности диэлектриков большой незаполненный промежуток, и упорядоченное движение носителей заряда отсутствует. Между энергетическими зонами проводимости и валентности полупроводников расстояние не велико, и в зоне валентности допустимо появление дырок, а в зоне проводимости такого же числа электронов, что может обеспечить условия протекания тока. Между зонами проводимости и валентности расположена запрещённая зона. Энергетические зоны валентности и проводимости металлов

взаимно перекрываются. В результате передача даже незначительной энергии способна привести к протеканию тока.

2.2. Электронно-дырочный переход

2.2.1. Получение электронно-дырочного перехода

Электронно-дырочным (или p-n) переходом называют область на границе двух полупроводников, обладающих различными типами проводимости. Толщина электронно-дырочного перехода обычно достигает от 100 нм до 1 мкм. На границе полупроводников электронного и дырочного типа концентрации носителей заряда неодинаковы, в результате чего в электронно-дырочном переходе возникает электрическое поле. Электроны переходят из области электронного типа в дырочную область, а дырки, наоборот, из дырочной области мигрируют в область электронного типа, то есть начинает протекать диффузионный ток. Когда концентрация основных носителей заряда больше, чем неосновных, то наибольшим будет ток, образованный упорядоченным движением основных носителей. Нейтрализация носителей зарядов в областях противоположного типа носит название рекомбинации носителей заряда. Рекомбинация электронов в дырочной области приводит к появлению в ней большого количества неподвижных отрицательных ионов, а возникшее электрическое поле будет ускоряющим для неосновных носителей заряда, и тормозящим и отталкивающим назад основных носителей заряда, которые будут вынуждены возвратиться обратно в область электронного типа. Аналогичным образом, рекомбинация дырок в электронной области приводит к образованию в ней большого количества неподвижных положительных ионов. Поэтому выравнивания концентраций носителей зарядов не возникнет. Участок грани-

цы полупроводников между местом, где будет максимальная концентрация отрицательных ионов акцепторной примеси и местом, где будет максимальная концентрация положительных ионов донорной примеси и есть электронно-дырочный переход. Электронно-дырочные переходы, обладающие примерно одинаковой концентрацией носителей зарядов в областях дырочного и электронного типов называют симметричными. Практическое применение симметричных р-п переходов довольно узко, а более широко применяют несимметричные электронно-дырочные переходы. В них концентрации носителей зарядов обладают отличием как минимум на несколько порядков.

Электронно-дырочный переход не получают простым соприкосновением двух разнотипных полупроводниковых брусков, так как в месте их соприкосновения не исключено наличие жировых пятен, пыли, чрезвычайно трудноудаляемой воздушной прослойки и прочего. А вместо этого электронно-дырочные переходы создают по специальным технологиям: диффузии, сплавления, эпитаксии, ионного легирования и ионной имплантации и многим другим.

Суть диффузии состоит в проникновении атомов паров примесей ввиду теплового движения на поверхность и внутрь кристаллов полупроводников, нагретых примерно до $950\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, причём концентрация примесей наиболее высока на поверхности, а наиболее низка в глубине кристаллов.

Сплавление заключается в наложении таблетки легирующего вещества на кристалл полупроводника и разогревании их до такой температуры, при которой наступит взаимное сплавление легирующего материала и полупроводника. Образованный таким образом электронно-дырочный переход называют резким, т.е. таким, при котором участок перехода концентраций примесей соизмерим с диффузионной длиной.

Эпитаксия – это выращивание плёнки одного полупроводника на кристалле другого полупроводника. Кристалл полупроводника, на

который осуществляют наращивание, называют подложкой. Подложку выполняют из полупроводника с кристаллической решёткой, похожей на кристаллическую решётку наращиваемого полупроводника. Если выращиваемый полупроводник и полупроводник подложки – это химически одно и то же вещество, то процесс называют гомоэпитаксией, а если они различны – то гетероэпитаксией.

Процесс ионного легирования заключён во внедрении в кристалл полупроводника ионов примеси, которые были в вакууме разогнаны до определённой скорости и направлены на поверхность полупроводника.

Помимо рассмотренного электронно-дырочного перехода также выполняют электронно-электронные, дырочно-дырочные переходы, переходы металл-полупроводник и другие.

2.2.2. Прямое и обратное включения электронно-дырочных переходов

Подсоединим электронно-дырочный переход к внешнему источнику питания так, чтобы отрицательное напряжение последнего было приложено к области электронного типа, а положительное – к области дырочного типа проводимости. Внешнее поле позволяет преодолеть заряд примесей, которые отталкивают носителей заряда от перехода. Основные носители заряда подступают гораздо ближе к границе полупроводников, и становится меньше ширина электронно-дырочного перехода и высота потенциального барьера. Если увеличим напряжение, прикладываемое к электронно-дырочному переходу, возрастёт концентрация основных носителей зарядов и в области дырочного типа, и в области электронного, в результате чего значительно возрастёт протекающий через переход диффузионный ток, который существенно превысит дрейфовый ток. Основные носители заряда преодолевают электронно-дырочный переход и попадают из области электронного типа в область дырочного типа

проводимости, в которой они являются неосновными. Этот процесс называют инъекцией. Ставшие неосновными носители заряда рекомбинируют с основными носителями заряда этой области. Совершенно аналогично дырки из области дырочного типа преодолевают электронно-дырочный переход, инжектируются в область электронного типа проводимости и там рекомбинируют. Указанное включение электронно-дырочного перехода и ток, вызванный движением основных носителей заряда, называют прямым.

Теперь подключим электронно-дырочный переход к внешнему источнику питания так, чтобы положительное напряжение было приложено к области электронного типа, а отрицательное – к области дырочного типа. Внешнее поле ещё сильнее отталкивает носителей заряда от перехода, и возрастают и ширина электронно-дырочного перехода, и высота потенциального барьера. Прямой ток через электронно-дырочный переход не течёт. Электроны из области дырочного типа и дырки из области электронного типа будут под действием электрического поля направлены сквозь р-п переход в области тех типов проводимости, в которых они станут основными. Этот процесс носит название экстракции. Через электронно-дырочный переход протекает маленький дрейфовый ток, называемый обратным, вызванный движением неосновных носителей заряда. Обратный ток почти не зависит от приложенного к электронно-дырочному переходу напряжения до определённого предела, после которого он начнёт возрастать из-за генерации носителей заряда в области границы разнотипных полупроводников. При увеличении температуры и обратный ток, и прямой ток возрастают, причём обратный ток увеличивается гораздо быстрее прямого тока. При уменьшении температуры существенного снижения токов не происходит.

Согласно сказанному, сделаем важное заключение: рассмотренный идеальный электронно-дырочный переход в прямом включении

пропускает электрический ток, а в обратном включении не пропускает, т.е. обладает односторонней проводимостью.

2.2.3. Ёмкости и частотные свойства электронно-дырочных переходов

Основное влияние на возможность работы электронно-дырочного перехода на определённых частотах оказывают две ёмкости, которые называют диффузионной и барьерной.

Диффузионную ёмкость инициируют носители заряда, которые при прямом включении электронно-дырочного перехода в силу инжекции диффундируют через него и не успевают пройти рекомбинацию. Диффузионная ёмкость тем больше, чем существенней заряд, который перенесён через электронно-дырочный переход, и чем меньше падение напряжения на нём в прямом включении. Так как диффузионная ёмкость свойственна открытому состоянию перехода, который при этом обладает малым (в идеале нулевым) сопротивлением, она не оказывает значительного воздействия на частотные свойства.

Барьерной называют ёмкость, которая возникает при обратном включении электронно-дырочного перехода, когда практически все носители заряда находятся на границе раздела, а в нём самом отсутствуют. Барьерная ёмкость оказывает основное влияние на частотные свойства электронно-дырочного перехода, так как присуща его закрытому состоянию, обладающему высоким (в идеале бесконечным) сопротивлением. Из-за барьерной ёмкости электронно-дырочный переход на высокой частоте может потерять свойство односторонней проводимости. Чтобы этого избежать с барьерной ёмкостью борются конструктивными и технологическими методами, например, увеличивая протяжённость электронно-дырочного перехода и уменьшая его площадь, что характерно для точечных диодов.

2.2.4. Пробои электронно-дырочных переходов

Пробоем электронно-дырочного перехода называют явление очень быстрого роста обратного тока при незначительном повышении постоянного обратного напряжения. Выделяют три типа пробоев: зенеровский, лавинный и тепловой.

Зенеровский или по-другому туннельный пробой возникает при преодолении электронами недостаточно протяжённого потенциального барьера, в результате чего падение обратного напряжения на электронно-дырочном переходе почти неизменно при широком диапазоне флюктуаций обратного тока. Явление зенеровского пробоя положено в основу принципа действия полупроводниковых стабилитронов.

Под действием сильного электрического поля происходит разгон носителей заряда, и в области электронно-дырочного перехода имеет место такое их взаимодействие с атомами кристаллической решётки, что из-за этого имеет место образование новой пары дырки и электрона, те в свою очередь порождают ещё более новую пару и так далее. Такой неуправляемый процесс порождения носителей зарядов называют лавинным пробоем. При лавинном пробое электронно-дырочный переход заполнен носителями заряда и его дифференциальное сопротивление стремится к нулю.

Лавинный пробой и зенеровский пробой относят к электрическим пробоям. Электрические пробой обратимы. На поверхности кристалла полупроводника электрический пробой возникает прежде, чем в глубине. Тому причина в незначительных загрязнениях, деградациях материала и прочем. Поэтому выходящие на поверхность кристалла участки полупроводника для увеличения максимально допустимого обратного напряжения компонента пассивируют: вокруг них осуществляют углубление или напыление диэлектрического материала.

Тепловыделение в области электронно-дырочного перехода, пропорциональное обратному напряжению и обратному току, уве-

личивает температуру кристалла полупроводника и силу обратного тока, что приводит к ещё большему тепловыделению, ещё большему обратному току и более высокой температуре и так далее. В результате такого катастрофического перегрева получает развитие тепловой пробой, который разрушает электронно-дырочный переход и после остывания прежние свойства, например, односторонней проводимости, к нему уже не вернуться. Тепловой пробой возникает после электрического пробоя перехода.

На вольтамперных характеристиках [44, с. 82] электронно-дырочного перехода, показанных на рис. 2.2, лавинный пробой изображён на кривой (а), зенеровский пробой – на кривой (б), а тепловой пробой отражён в наличии участка отрицательного дифференциального сопротивления на кривой (в).

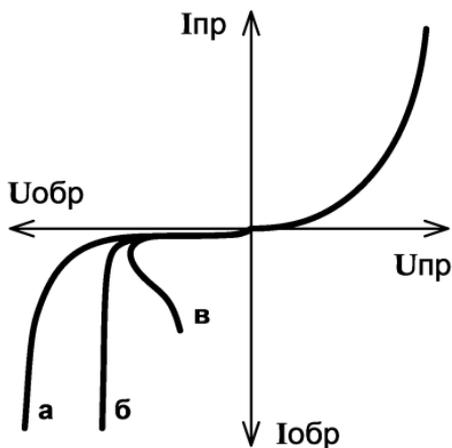


Рис. 2.2. ВАХ с участками пробоев

На данном рисунке пропорции по осям не соблюдены.

2.3. Переход и диод Шоттки: получение и включения в прямом и обратном направлении

Переход Шоттки возникает на границе металла, уровень Ферми которого находится в зоне проводимости, и полупроводника электронного типа проводимости, который имеет более низкую работу выхода, чем у металла. Для успешного функционирования перехода Шоттки приграничная область полупроводника должна быть бедна электронами, чтобы она обладала более низкой проводимостью, чем остальная часть полупроводникового кристалла. Электроны из приграничной области полупроводника поступают в металл с более высокой работой выхода и не могут уйти обратно. На покинутом электронами месте в полупроводнике остаются положительные некомпенсированные ионы. Между металлом и полупроводником возникнет электрическое поле, тормозящее и возвращающее обратно основные носители заряда полупроводника.

Подсоединим переход Шоттки к внешнему источнику питания так, чтобы отрицательное напряжение было приложено к металлу, а положительное – к полупроводнику. Внешнее поле, которое будет направлено в ту же сторону, что и внутренне поле перехода Шоттки, будет отталкивать электроны полупроводника вглубь от границы перехода. Для электронов металла внешнее поле будет ускоряющим, однако они не покинут металл с более высокой работой выхода, чем полупроводник. Дрейфовый обратный ток через переход Шоттки совершенно отсутствует, а описанное включение перехода называют обратным.

Подключим теперь переход Шоттки к внешнему источнику питания так, чтобы положительное напряжение было подано к металлу, а отрицательное – к полупроводнику. Внешнее поле будет направлено встречно внутреннему полю перехода Шоттки, и станет переносить электроны из полупроводника через переход в металл. В металле отсутствуют неосновные носители заряда, и инжекция не-

основных носителей заряда не возникает. Через переход Шоттки течёт прямой ток, а рассмотренное включение называют прямым.

Для изготовления переходов Шоттки в качестве полупроводника обычно используют кремний, а применяемые металлы и химические соединения – это золото, силицид платины, молибден и другие. Переход Шоттки не получить простым соприкосновением металла и полупроводника, а на металлическую пластину по технологиям эпитаксиального наращивания или напыления в вакууме наносят плёнку полупроводника.

Слой положительно заряженных ионов донорной примеси на границе полупроводника и металла с большей работой выхода называют переходом Шоттки в честь немецкого учёного Вальтера Германа Шоттки, который одним из первых физиков изучал контакты металлов и полупроводников. Вальтер Шоттки родился 23 июля 1886 года, а скончался 4 марта 1976 года.

Переходы Шоттки выступают основой диодов Шоттки. К достоинствам последних относят чрезвычайно малый обратный ток, который для отдельных диодов Шоттки может составлять единицы пикоампер, возможность работы компонентов отдельных марок на частотах до сотен гигагерц и даже выше. Некоторые мощные диоды Шоттки, которые используют в высокочастотных выпрямителях импульсных источников питания, допускают прямые токи в сотни ампер. Прямое падение напряжения на переходе Шоттки меньше, чем у типового электронно-дырочного перехода.

Основными недостатками диодов Шоттки выступают высокая стоимость используемых материалов и довольно низкое максимально допустимое обратное напряжение, которое обычно составляет всего лишь от 25 В до 150 В. Выдерживающие более высокие обратные напряжения диоды Шоттки (например, 400 В, 600 В), обычно получают последовательным соединением нескольких переходов Шоттки. От этого падение напряжения на сборке диодов Шоттки в прямом включении станет примерно таким же, или даже большим,

чем у аналогичного по некоторым параметрам диода с электронно-дырочным переходом.

2.4. Гетеропереходы

Гетеропереход – это переход, возникающий на границе химически различных полупроводниковых структур, у которых не одинакова ширина запрещённой зоны. На границе полупроводников, которые обладают одинаковыми типами проводимости, возникают изотипные гетеропереходы, а на границе полупроводников с отличными типами проводимостей – анизотипные. Важно, чтобы на границе кристаллических решёток полупроводников, образующих гетеропереход, не было дефектов кристаллической решётки, отсутствовали механические напряжения материалов. В области гетероперехода происходят изменения свойств веществ, образующих его, такие как смещения запрещённой и энергетических зон, изменение скорости, с которой распространяются носители заряда и прочее. Для получения гетеропереходов используют полупроводниковые пары AlAs и GaAs, AlSb и GaSb, GaAs и Ge, ZnSe и GaAs и другие. Используя наборы гетеропереходов, получают многослойные образования, которые называют гетероструктурами.

Полупроводниковые гетеропереходы нашли применение в особо сверхвысокочастотных транзисторах, диодах, светодиодах, лазерах и прочих компонентах.

2.5. Эффекты полупроводников

2.5.1. Эффект Ганна

Эффект Ганна, на принципе которого строят диоды Ганна, был открыт в 1963 году американцем Джоном Ганном. Диод Ганна не обладает электронно-дырочным переходом, а состоит из пластины электронного типа проводимости, выполненной из фосфида индия, арсенида галлия, антимонида галлия и др., к противоположным граням которой подсоединены электроды. Толщина полупроводниковой пластинки составляет от сотен нанометров до сотен микрометров. Концентрация донорных примесей, которые вносят в полупроводник, составляет обычно 10^{15} см⁻³. Удельное сопротивление не одинаково по протяжённости полупроводника, а максимальная концентрация примеси сформирована у граней пластины, к которым подсоединены контакты. Полупроводниковую пластину обычно выполняют неравномерного сечения сложной конфигурации, создавая на ней выступы и впадины. Работа и параметры диода Ганна напрямую зависят от распределения примесей в полупроводнике и его формы.

Для изучения эффекта Ганна обратим внимание на рис. 2.3, на котором представлена зависимость проводимости полупроводника i от напряжённости электрического поля E .

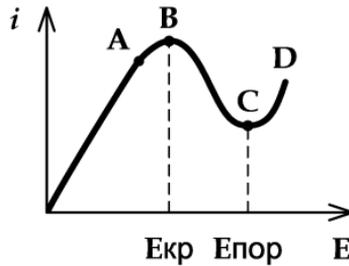


Рис. 2.3. Зависимость i от E для диода Ганна

Подадим напряжение от внешнего источника питания к граням полупроводника, предназначенным для этого. Пока напряжённость поля будет мала, концентрация носителей зарядов от неё зависеть не станет, что отражено на рисунке линейным нарастанием проводимости полупроводника на участке от начала координат до точки А. Последующее повышение напряжённости поля приводит к замедлению роста проводимости полупроводника, и в точке В, соответствующей критической напряжённости поля, она перестанет повышаться. Дальнейшее увеличение напряжённости поля вызывает повышенную интенсивность ударов электронов об атомы кристаллической решётки полупроводника, что приводит к уменьшению его дифференциальной проводимости на участке от В до С. Участок отрицательного дифференциального сопротивления имеет место лишь для переменных токов и напряжений. При увеличении напряжённости поля в связи с тем, что удельное сопротивление в объёме полупроводника несколько различно и волновые возмущения не постоянны, электроны с малой эффективной массой, называемые «быстрыми», отталкиваемые электрическим полем, начнут формировать и заполнять собой участок в сечении полупроводниковой пластины. Эффективная масса для разных электронов не одинакова, так как зависит от взаимодействия с кристаллической решёткой, кинетической энергии

электронов и пр. Чаще всего наибольшая неоднородность удельного сопротивления бывает у мест подключений металлических контактов к полупроводниковой пластине. Вакантные места, которые покинули электроны, образуют электростатический домен, обладающий неподвижными некомпенсированными ионами с объёмными положительными зарядами и возникающий в месте наибольшей напряжённости поля в полупроводнике. Подходя к домену, «быстрые» электроны увеличивают свою эффективную массу, и становятся «медленными». Электрическое поле вызывает движение носителей зарядов, и вслед за электронами происходит исключительно быстрое перемещение электростатического домена в сечении пластины полупроводника. При этом направление движения возможно сугубо от места отрицательного электрода (катода) к области положительного электрода (анода). При достижении электростатическим доменом области положительного электрода происходит рекомбинация и рассеивание домена, вызывающие протекание тока наибольшей амплитуды. Скорость, с которой электростатический домен перемещается по объёму арсенида галлия, составляет 10^5 (м/с), а для других полупроводников может быть даже больше. И тут же вблизи отрицательного электрода происходит формирование нового электростатического домена, и процесс повторяется. Постоянные формирования, движения и рассасывания электростатических доменов приводят к генерированию колебаний сверхвысоких частот.

Напряжённость поля, соответствующую прекращению уменьшения дифференциальной проводимости, называют пороговой. При дальнейшем увеличении и без того очень большой напряжённости поля снижение проводимости уже не возникает, а, наоборот, возрастание концентрации носителей зарядов инициирует её ускоренный подъём.

Так как электростатический домен занимает всё сечение полупроводника, стало возможно создать мощные диоды Ганна. Современные диоды Ганна генерируют колебания с частотами примерно от 1 ГГц до 150 ГГц и даже более. Максимальная мощность полученных колебаний достигает у маломощных компонентов 0,3 Вт, а у мощных специальных диодов Ганна была достигнута мощность в 2 кВт. Типовой КПД диодов Ганна лежит в пределах от 3% до 20%.

Информацию о диодах Ганна можно найти в книге [194, с. 202, 203].

2.5.2. Эффект поля

Соединим кристалл полупроводника и металл друг с другом и приложим к ним в обратном включении постоянное напряжение. При этом обратный дрейфовый ток не течёт, а на поверхности металла будет сосредоточен такой же по величине заряд, как заряд полупроводника. Важно то, что заряд полупроводника можно будет наблюдать не только на его поверхности, но и на некоторой глубине, то есть концентрация свободных носителей заряда будет максимальна на поверхности полупроводника и станет уменьшаться с глубиной проникновения в его толщу. Поверхностный слой полупроводника в данном случае именуют каналом. Если проводимость канала из-за наличия внешнего поля будет больше (обогащение канала) или меньше (обеднение канала), чем в среднем в кристалле, то это явление именуют эффектом поля [194, с. 248, 249]. Эффект поля лежит в основе принципа действия полевых транзисторов с индуцированным каналом.

2.5.3. Эффект Суля

Эффект Суля (или по-английски «Suhl effect») состоит в смещении магнитным полем траектории неосновных инжектированных носи-

телей заряда к одному из краёв полупроводника в результате действия силы Лоренца. Если прямоугольную пластину полупроводника с электронно-дырочным переходом положить горизонтально и к торцам подсоединить источник питания так, чтобы переход был в прямом включении, то неосновные носители заряда – дырки – будут отклоняться вверх. На поверхности полупроводника будет скопление неосновных носителей зарядов, концентрация которых ограничена рекомбинацией и миграцией внутрь полупроводниковой пластины по причине теплового движения. Работа магнитотранзисторов связана с эффектом Суля.

2.5.4. Эффекты Пельтье и Зеебека

Если в месте контакта двух специально подобранных разнородных материалов создать разность температур, то между этими материалами возникнет ЭДС. Это свойство носит название эффекта Зеебека, а обратное явление появления разности температур при протекании электрического тока именуют эффектом Пельтье. В качестве материалов могут выступать два металла, но при этом будет мала развиваемая ими термо-ЭДС. Чтобы получить большую величину термо-ЭДС, в качестве материалов используют пары полупроводников с электронным и дырочным типами проводимостей. Например, широко применяют пары кристаллов твёрдых растворов, обладающих электронным типом проводимости, $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ с парами кристаллов твёрдых растворов, имеющих дырочный тип проводимости, $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$. Так как термо-ЭДС от одного соединения таких пар довольно мала, на практике несколько аналогичных наборов полупроводниковых структур соединяют последовательно.

Поговорим об эффекте Зеебека. Если один участок материала будет нагрет больше, чем другой, то электроны вследствие теплового движения будут перемещаться в направлении к менее нагретому участку. При этом из-за диффузии одна область материала будет

перенасыщена электронами, а другая, наоборот, бедна ими, в результате чего между ними возникнет термо-ЭДС, и при подключении нагрузки потечёт электрический ток. Он будет противодействовать перераспределению электронов в материале.

Рассмотрим сущность эффекта Пельтье. Если через контакт специально отобранных полупроводников пропускать электрический ток, то в результате его действия, перемещаясь из одного полупроводника в другой, электроны, которые находились в более высокой энергетической зоне, попадают в полупроводник, в котором станут занимать более низкую энергетическую зону, а избыточная энергия перейдёт в тепло. Т.е. имевшие большую энергию электроны вынуждены отдать часть энергии, что вызовет тепловыделение. При этом температура той части системы, которую покидают электроны, уменьшается. А температура другой части, в которую они поступают, наоборот увеличивается. При активном отводе тепла от нагреваемого участка температура охлаждаемого участка станет ещё ниже.

Принцип действия элементов Пельтье основан на эффекте Пельтье, а элементов Зеебека, – на эффекте Зеебека. Элементы Зеебека применяют в качестве датчиков температуры. Некоторые элементы Пельтье позволяют охладить предназначенные для этого участки полупроводника до меньшей температуры, чем ноль градусов Цельсия. К достоинствам элементов Пельтье и Зеебека относят компактность, отсутствие механических частей и шума при функционировании, высокую надёжность. Недостаток – крайне низкий КПД компонентов.

2.5.5. Туннельный эффект

Туннельный эффект был открыт японцем Лео Эсаки (по-японски 江崎 玲於奈), который в 1973 году получил за него Нобелевскую премию, а практический образец туннельного диода был изготовлен ещё в 1958 году. Туннельный эффект, который относят к группе

квантовых эффектов, заложен в основу принципа действия туннельных диодов. Туннельный диод обладает очень тонким электронно-дырочным переходом, который образован вырожденными полупроводниками. Толщина электронно-дырочного перехода не должна превышать 10 нм. Роль полупроводника может играть кремний, антимонид галлия, арсенид галлия и др. Рассмотрим вольтамперную характеристику туннельного диода, изображённую на рис. 2.4.

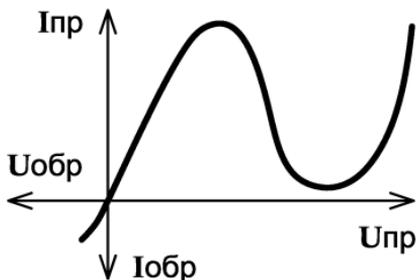


Рис. 2.4. ВАХ туннельного диода

При увеличении приложенного к диоду постоянного напряжения в прямом включении, прямой ток до определённой величины практически линейно возрастает.

При дальнейшем увеличении подведённого к диоду постоянного напряжения из-за высокой внутренней напряжённости поля, достигающей 10^8 В/м, происходит разгон электронов, которые в момент попадания в тонкий электронно-дырочный переход не успевают остановиться и прошивают его насквозь, подобно движению в туннеле, практически без уменьшения энергии. В электронно-дырочном переходе в результате квантовых эффектов [39, с. 130] имеет место снижение напряжённости поля и уменьшение прямого тока через туннельный диод почти вплоть до полного прекращения. Это указывает на отрицательное дифференциальное сопротивление [175, с. 73], которое равно приращению постоянного напряжения,

приложенному у р-п переходу, делённому на отрицательное приращение постоянного тока [175, с. 73]. Туннельным эффектом называют квантовый процесс преодоления частицами электронно-дырочного перехода по причине высокой напряжённости поля без существенного изменения энергии [39, с. 128; 194, с. 202]. А участок отрицательного дифференциального сопротивления позволяет осуществлять генерацию, преобразование или усиление сигналов сверхвысоких частот за счёт потребляемой от источника питания энергии. Действительно, малошумящие каскады с отдельными промышленно изготавливаемыми туннельными диодами усиливают сигналы с частотой примерно 80 ГГц, и даже несколько более высокой. Столь высокое быстродействие легко объяснить чрезвычайно быстрым преодолением электронами электронно-дырочного перехода [145, с. 264].

При последующем повышении приложенного к туннельному диоду постоянного прямого напряжения носители заряда диффундируют сквозь электронно-дырочный переход. Вследствие этого происходит повышение прямого тока при увеличении прямого напряжения, что не имеет отличий от прямой ветви вольтамперной характеристики обычного электронно-дырочного перехода.

При обратном включении туннельного диода дырки не испытывают трудностей в преодолении электронно-дырочного перехода и проникновения в область электронного типа, следовательно, туннельные диоды не обладают свойством односторонней проводимости.

2.5.6. Эффект Холла

Эффект Холла был выявлен в 1879 году Эдвином Гербертом Холлом [145, с. 37]. Эффект Холла, состоящий в отклонении электронов к одному из краёв пластинки и появлении между краями ЭДС, обнаружен в полупроводниках электронного типа проводимости, обязательно помещённых в магнитное поле, по которым протекает по-

стоянный электрический ток. Эта ЭДС, называемая ЭДС Холла, возникает вследствие воздействия на упорядоченно движущиеся электроны силы Лоренца, которая отклоняет их к одному из краёв пластинки, которая приобретает отрицательный заряд. Другой край пластинки заряжен положительно, так как станет богат положительными носителями заряда. Материалом полупроводника может выступать селенид ртути, кремний, арсенид индия и пр. Напряжение Холла, возникающее между краями пластины, не велико и обычно менее нескольких десятков милливольт. Поэтому для возможности беспрепятственной регистрации его необходимо усилить. Эффект Холла лежит в основе принципа действия датчиков Холла, которые применяют в бесконтактных измерителях магнитной индукции: магнитометрах, тесламетрах и др.

Были открыты и другие подобные эффекты. Например, был открыт эффект Нернста–Эттингсгаузена, состоящий в возникновении электрического поля в полупроводнике, в котором наличествует градиент температур и который находится в магнитном поле. Рассмотрение данных эффектов выходит за рамки настоящей книги.

3. Полупроводниковые диоды

3.1. Конструкция и основные параметры полупроводниковых диодов

3.1.1. Общие сведения о полупроводниковых диодах

Полупроводниковый диод – это обычно полупроводниковый нелинейный компонент с двумя выводами, обладающий свойством односторонней проводимости, и имеющий электронно-дырочный переход. В этом определении важно слово «обычно», так как некоторые разновидности диодов не обладают свойством односторонней проводимости (туннельные диоды) и не имеют электронно-дырочного перехода (диоды Ганна). Такие диоды, кстати, нами уже были рассмотрены.

Идеальный полупроводниковый диод допускает протекание бесконечно большого прямого тока и выдерживает бесконечно большое обратное напряжение. Это отражено на вольтамперной характеристике, изображённой на рис. 3.1.

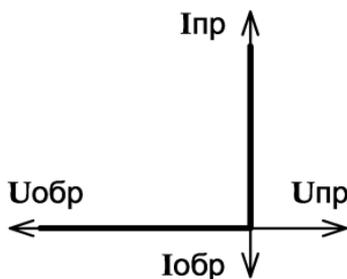


Рис. 3.1. ВАХ идеального диода

Идеальных диодов на практике не бывает. Реальный диод всегда имеет конечную величину обратного напряжения, после чего наступит

пит электрический пробой, и вполне определённый максимальный прямой ток, превышение которого вызовет тепловой пробой. Вольт-амперная характеристика реального диода дана на рис. 3.2.

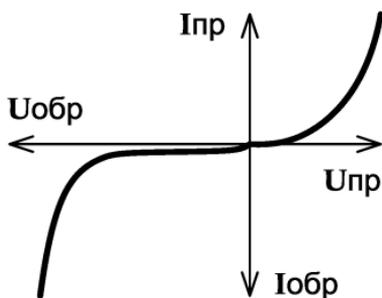


Рис. 3.2. ВАХ реального диода

Диоды, выполненные на основе кремния, имеют меньшую величину обратного тока и более высокую максимально допустимую температуру кристалла, чем германиевые диоды. Однако падение напряжения на кремниевых диодах в прямом включении примерно в два раза выше, чем на германиевых диодах.

Анодом диода называют вывод от той области электронно-дырочного перехода диода в прямом включении, к которому подсоединяют положительный полюс источника питания. А вывод от области, к которой подключают отрицательный полюс источника питания, именуют катодом.

КПД диодов может в отдельных случаях достигать 99%, т.е. обычно он весьма велик.

3.1.2. Конструкции и простейшие способы изготовления полупроводниковых диодов

Для получения простейшего точечного диода берут пластинку металла с прикреплённым к ней выводом и к ней приваривают кри-

сталл полупроводника электронного типа проводимости. Этот кристалл называют базой диода. Затем берут металлическую иглу с присоединённым к ней выводом, изготавливаемую, например, из вольфрама, золота, бериллиевой бронзы, на которую нанесён легирующий материал, и её острый кончик упирают в кристалл базы диода так, чтобы игла была подпружинена. В качестве легирующего материала часто используют алюминий и индий. Все части будущего диода помещены в корпус, который, например, может быть маленьким стеклянным баллоном, из которого откачан воздух. Далее осуществляют формовку, то есть местное нагревание участка между иглой и полупроводниковой пластиной для того, чтобы на небольшой площади их материалы друг в друга диффундировали. Для этого через диод в прямом и обратном направлениях пропускают короткие импульсы с силой тока около 1 А, что во много раз превышает максимальный постоянный ток изготавливаемого точечного диода. Материал акцепторной примеси, который находился на игле, и тот, из которого она состояла, диффундируют на небольшой почти полусферический участок в базу диода, образуя переход. Точечные диоды благодаря небольшой площади электронно-дырочного перехода обычно обладают малой ёмкостью, а, следовательно, могут работать на высокой частоте, не теряя свойства односторонней проводимости. Однако малая площадь перехода не позволяет пропускать через точечный диод большие прямые токи без разрушения компонента.

Для изготовления плоскостного диода берут базу диода электронного типа проводимости и кладут на неё полупроводниковую пластину, которая позже станет играть роль акцепторной примеси. Затем их нагревают примерно до 450 °С ... 550 °С в вакууме, отчего материал акцепторной примеси диффундирует в базу будущего диода. Полученный электронно-дырочный переход будет обладать большой площадью и существенной ёмкостью. Благодаря тому, что площадь плоскостного диода велика, через него можно пропускать

весьма большой ток в прямом включении, однако наибольшая частота, на которой такой диод может сохранять работоспособность, будет низкой.

В заключение нужно отметить, что существуют и многие другие конструкции, а также способы изготовления диодов.

3.1.3. Некоторые основные параметры полупроводниковых диодов

К основным параметрам диодов относят:

- максимально допустимый постоянный прямой ток, A ;
- максимально допустимый импульсный прямой ток, A ;
- максимально допустимое постоянное обратное напряжение, B ;
- максимально допустимое импульсное обратное напряжение, B ;
- обратный ток, протекающий через диод в обратном включении при приложенном к его выводам максимально допустимом постоянном напряжении, $мкА$;
- статическое сопротивление диода в прямом включении, равное отношению падения напряжения на диоде в прямом включении к силе прямого тока, $Ом$;
- статическое сопротивление диода в обратном включении, равное отношению величины обратного напряжения к силе обратного тока, $МОм$;
- динамическое сопротивление диода в прямом включении, составляющее отношение изменения падающего на диоде постоянного напряжения в прямом включении к величине изменения силы прямого тока, $Ом$;
- динамическое сопротивление диода в обратном включении, равное отношению изменения обратного напряжения к изменению величины обратного тока, $Ом$;
- полная ёмкость запёртого диода, $пФ$;

- максимально допустимая частота протекающего по диоду переменного тока, Гц, и др.

3.2. Выпрямительные диоды

Выпрямительным называют диод, который предназначен для получения однополярного пульсирующего напряжения путём выпрямления переменного напряжения. Полученное пульсирующее напряжение сглаживают, например, конденсатором, в итоге получая постоянное напряжение. Выпрямительные диоды изготавливают по технологии получения плоскостных диодов в связи с тем, что их обычно используют на низких частотах, а прямой ток через электронно-дырочный переход зачастую составляет многие амперы. Маломощные выпрямительные диоды способны успешно рассеивать выделяющееся в них тепло исключительно своим корпусом, в то время как мощные диоды иногда этого сделать не могут, по причине чего их монтируют на охладители. Выпрямительные диоды выпускают как дискретными компонентами, так и объединёнными в диодные сборки.

Если обратное напряжение, прикладываемое к выпрямительному диоду, будет больше максимально допустимого для конкретной марки компонентов, то для предупреждения развития пробоя несколько диодов соединяют последовательно. Сопротивление диодов в обратном включении весьма различно даже для компонентов одной марки и партии. Чтобы избежать превышения допустимого значения обратного напряжения на том диоде, сопротивление которого наиболее велико, каждый из последовательно соединённых диодов шунтируют высокоомным резистором. Это позволяет выровнять обратные напряжения на всех диодах.

Если прямой ток, протекающий через диод, будет больше максимально допустимого для конкретной марки диодов, то для предотвращения выхода из строя несколько диодов соединяют парал-

тельно. Сопротивление диодов даже одной марки и партии в прямом включении иногда имеет существенные различия. Чтобы избежать превышения допустимой силы прямого тока на том диоде, сопротивление которого наиболее низко, последовательно с каждым из диодов включают по низкоомному резистору. Это позволяет выровнять силу прямых токов, протекающих по всем диодам.

3.3. Импульсные диоды

Импульсными называют диоды, предназначенные для пропускания в прямом включении очень коротких импульсов, длительностью менее микросекунды, с большой амплитудой тока. При столь коротких импульсах основное влияние на работу диода будут оказывать барьерная ёмкость и длительность обратного восстановления, обусловленная скоростью рекомбинации носителей заряда. Барьерная ёмкость некоторых импульсных диодов может быть ниже 1 пФ. Импульсные диоды, функционирующие на частоте примерно 1 ГГц, часто обладают точечной конструкцией. Также импульсные диоды изготавливают планарной, меза–планарной, сплавной и сварной конструкций. Пусть через импульсный диод протекает электрический ток в прямом включении. Если резко изменим полярность приложенного напряжения, то диод мгновенно не перейдёт в закрытое состояние, а вначале существенно возрастёт обратный ток, обусловленный наличием на участке электронно–дырочного перехода повышенной концентрации неосновных носителей заряда. Затем обратный ток начинает снижаться почти по экспоненте ввиду рекомбинации неосновных носителей зарядов и их миграции через электронно–дырочный переход, по окончании чего обратный ток установится на определённом уровне.

Импульсные диоды применяют в электронных ключах, генераторах, модуляторах и формирователях импульсов и пр., причём длительность периода импульсов может быть даже меньше не-

скольких пикосекунд. Такие диоды используют, например, в демпферах и выходных выпрямителях импульсных источников питания, причём прямой ток через открытые диоды может достигать десятков ампер, а частота – сотен килогерц.

3.4. Варикапы

Барьерная ёмкость диодов, в противоположность диффузионной ёмкости, мало зависит от частоты сигнала и температуры электронно-дырочного перехода. Величина барьерной ёмкости зависит от зарядов ионов легирующего вещества. При обратном включении диода возрастает ширина потенциального барьера, отчего барьерная ёмкость снижается [39, с. 156]. Варикапом называют полупроводниковый диод, спроектированный так, чтобы была высока его добротность, а барьерная ёмкость была стабильна при флюктуациях частоты и температуры. Чем больше постоянное обратное напряжение, приложенное к варикапу, тем меньше его барьерная ёмкость. Важнейшая характеристика варикапов – вольт-фарадная – отражает зависимость барьерных ёмкостей варикапов от обратных напряжений. Наличие такой зависимости позволяет использовать варикапы в колебательных контурах в качестве перестраиваемой ёмкости.

Барьерную ёмкость варикапа отражает следующая формула:

$$C_B = \frac{S \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d \cdot \sqrt{1 - \frac{U}{\varphi_0}}}, \text{ Ф},$$

где S – площадь электронно-дырочного перехода, м^2 ;
 d – протяжённость электронно-дырочного перехода, м ;
 ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника;
 ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;
 U – напряжение, приложенное к варикапу, В ;

φ_0 – высота потенциального барьера.

Добротность варикапа допустимо вычислить согласно формуле:

$$Q = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F \cdot r \cdot C_{\text{в}}},$$

где F – частота сигнала, Гц;

r – сопротивление той области полупроводникового кристалла варикапа, в которой минимальна концентрация примесей, Ом;

C – барьерная ёмкость варикапа, Ф.

Коэффициент перекрытия по ёмкости варикапов, равный отношению максимальной ёмкости к минимальной ёмкости, достигает 3 ... 7 раз для компонентов с высокой начальной ёмкостью, и 20 ... 30 для некоторых специальных приборов. Часто для перестройки диапазонов многоконтурных приёмников необходимо несколько объединённых друг с другом определённым образом варикапов. Такие наборы из нескольких варикапов, заключённые в единый корпус, называют варикапными матрицами. Промышленность выпускает и дискретные варикапы, и варикапные матрицы. Варикапы широко используют для перестройки колебательных контуров диапазонов КВ и УКВ в радиовещательных и телевизионных приёмниках.

3.5. Стабилитроны и стабисторы

Полупроводниковыми стабилитронами называют плоскостные диоды, которые применяют для поддержания на неизменном уровне обратного постоянного напряжения, приложенного к запертому стабилитрону. При изучении пробоев электронно-дырочных переходов было отмечено, что при зенеровском и лавинном пробоях падающие на диодах обратные напряжения почти постоянны в широких диапазонах обратных токов. Зенеровский пробой присущ стабилитронам с низким напряжением пробоя, а лавинный пробой – стабилитронам с высоким напряжением пробоя. Так как во время указанных пробоев

ев в электронно-дырочных переходах выделяется тепло, которое увеличивает температуру кристаллов, применяют полупроводники, обладающие высокой температурной стабильностью, при использовании которых обратный ток будет мал. С другой стороны, указанные пробои возникают при довольно низких обратных напряжениях, ввиду чего рассеиваемая мощность полупроводниковых стабилитронов не велика [39, с. 149].

Стабилитроны изготавливают из кремния электронного типа проводимости, который легируют акцепторной примесью. Для этого в пластинку кремния обычно вплавляют алюминий, к материалам областей электронно-дырочного перехода подсоединяют выводы, всю систему помещают в корпус, который герметизируют. Корпуса стабилитронов обычно стеклянные, металлостеклянные или металлопластиковые.

Важным параметром стабилитронов выступает температурный коэффициент напряжения (ТКН) стабилизации, который отражён следующей формулой [169, с. 47]:

$$\text{ТКН} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta T \cdot U_{\text{ст}}} \cdot 100, \text{ \% / град},$$

где $\Delta U_{\text{ст}}$ – наибольшее изменение напряжения стабилизации, В;

ΔT – наибольшее изменение температуры, град;

$U_{\text{ст}}$ – номинальное напряжение стабилизации при номинальном обратном токе, В.

Стабилитронам с лавинным пробоем характерно обладание положительным ТКН, т.е. при фиксированном обратном токе с ростом температуры полупроводникового кристалла обратное напряжение возрастает. Стабилитронам с зенеровским пробоем свойственно наличие отрицательного ТКН, т.е. при стабильном обратном токе с ростом температуры кристалла полупроводника обратное напряжение уменьшается.

Вольтамперная характеристика стабилитрона в области прямого включения не имеет отличий от других диодов, а в области обратного включения лежит участок, на котором при значительном изменении обратного тока практически постоянно обратное напряжение. Это отражено на рис. 3.3, на котором изображена вольтамперная характеристика типового стабилитрона.

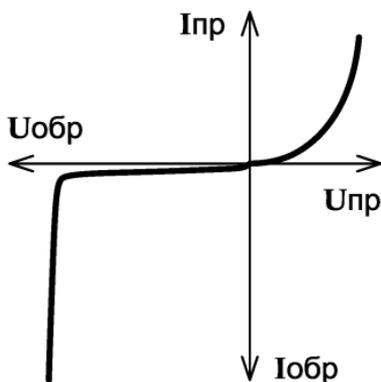


Рис. 3.3. ВАХ стабилитрона

Стабилитроны применяют для ограничения импульсов, с целью поддержания опорного напряжения на постоянном уровне в параметрических стабилизаторах, для защиты цепей от превышения напряжения и прочих целей.

Стабисторами называют диоды, которые применяют для поддержания на неизменном уровне прямого постоянного напряжения в прямом включении. Обычно в качестве полупроводника для изготовления стабисторов применяют селен. Стабисторы используют для стабилизации постоянного напряжения, величиной от долей до нескольких вольт. Для увеличения напряжения пробоя стабисторы часто включают последовательно. Стабисторам свойственна отрицательная величина ТКН, и при их последовательном соединении с

лавинными стабилитронами может быть достигнута некоторая независимость напряжения пробоя системы от температуры.

Время непрерывной работы отдельных марок кремниевых стабилитронов до выхода из строя превышает несколько десятков тысяч часов, а селеновых стабилитронов обычно не достигает и тысячи часов из-за деградации полупроводника.

3.6. Светодиоды

Светодиодом называют такой полупроводниковый компонент, в котором рекомбинацию носителей зарядов сопровождает испускание квантов некогерентного света. При протекании тока через светодиод в прямом включении электроны преодолевают электронно-дырочный переход и рекомбинируют, переходя на более низкие энергетические уровни и испуская кванты света. Для изготовления светодиодов пригодны далеко не всякие полупроводники, а только групп $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$, такие как арсенид галлия, фосфид индия и прочие. Подходящие полупроводники имеют достаточно широкую запрещённую зону, чтобы длина излучаемой волны лежала в заданной области спектра. К наиболее важным характеристикам светодиодов относят спектральную и яркостную характеристики. Спектральная характеристика – зависимость вырабатываемой мощности светового потока от длины волны. А яркостная характеристика – это зависимость мощности светового потока от силы тока, протекающего по светодиоду в прямом включении.

К достоинствам светодиодов относят механическую прочность, длительное время наработки на отказ, часто превышающее десять тысяч часов, низкое прямое напряжение, составляющее до нескольких вольт, малую стоимость, возможность функционирования в широком диапазоне температур. Технология изготовления светодиодов не подразумевает обязательного использования сильно токсичных веществ, что также относят к достоинствам.

Недостаток индикаторных светодиодов для аппаратуры широко-го потребления заключён в обычно невысоком КПД, составляющим от долей до нескольких процентов.

Светодиоды используют для индикации состояния аппаратуры, а мощные светодиоды применяют для освещения.

3.7. Полупроводниковые лазеры

Лазером называют квантовый генератор монохроматического излучения оптического диапазона волн. Рабочее тело лазеров может быть выполнено:

- из газа (на основе азота, аргона, гелия и неона, криптона, ксенона и прочего),
- на красителях (кумарине, родамине, гексацианине 3, крезиле фиолетовом и других),
- твердотельным (лазером, использующим александрит или титансапфир, рубиновым и прочим),
- на полупроводниках (лазеры с квантовыми ямами, лазеры с гетероструктурой на основе арсенида галлия, с отдельным удержанием и другие),
- либо тело может быть специфическим, и реализованным на перегретой плазме, на свободных электронах, на солитонах и подобных объектах.

Полупроводниковые лазеры используют, например, для производства лазерных диодов. Основой лазерного диода выступает специально подготовленный электронно-дырочный переход плоскостной конструкции, полученный в полупроводнике электронного типа проводимости, например, из арсенида галлия. Кристалл полупроводника обычно имеет размеры по длине, ширине и высоте менее $500 \times 400 \times 100$ мкм. Упрощённая конструкция лазерного диода без соблюдения пропорций показана на рис. 3.4.

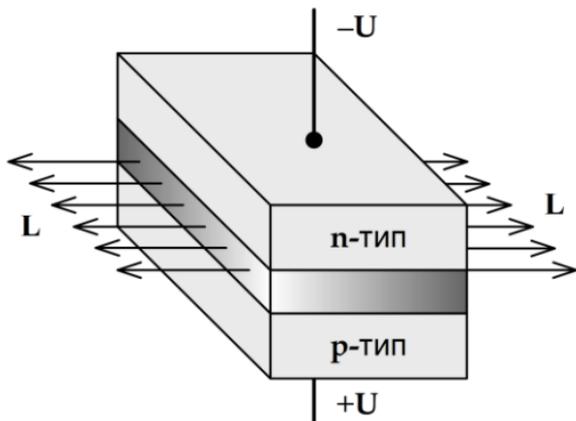


Рис. 3.4. Конструкция лазерного диода

Грани пластинок полупроводника, между которыми образован электронно-дырочный переход, образуют резонатор Фабри-Перо, и играют роль зеркал для попавших в него фотонов, которые будут отражены от нескольких сотен раз до нескольких тысяч раз, прежде чем его покинут. Изначально концентрация электронов на верхних энергетических уровнях изначально ниже концентрации электронов на нижних энергетических уровнях [39, с. 114]. Если подсоединим лазерный диод к внешнему источнику питания в прямом включении, то возникнет инжекция электронов в область дырочной проводимости и их рекомбинация на границе электронно-дырочного перехода, который обладает протяжённостью часто менее 2 мкм, сопровождаемая выделением квантов света – фотонов. Концентрация электронов на верхних энергетических уровнях возрастает и начинает превышать концентрацию электронов на нижних энергетических уровнях. Произойдёт множество отражений от резонатора, в течение которых индуцирующие фотоны инициируют ещё большее увеличение рекомбинации и породят новые индуцированные фотоны. Таким образом, фотоны образуют монохроматическое световое

излучение «L», которое через окно в корпусе покидает лазерный диод.

Следует заметить, что лазеры используют почти всецело для генерации, но не для усиления колебаний. Лазерные диоды нашли широкое применение в спектрографах, лазерных прицелах и дальномерах, их применяют в лазерных принтерах и в медицинских приборах для исследования сетчатки. Лазерные диоды входят неотъемлемой частью системы считывания, стирания и записи информации на лазерных дисках.

3.8. Фотодиоды

Фотодиодом называют фотогальванический приёмник с электронно-дырочным переходом, облучение которого светом вызывает увеличение силы обратного тока. Материалом полупроводника фотодиода обычно выступает кремний, сернистое серебро, сернистый таллий или арсенид галлия. Фотодиод устроен так же, как обычный плоскостной диод, а отличие состоит в прозрачном окне, которое организовано в корпусе фотодиода напротив областей электронного либо дырочного типов проводимостей в полупроводниковом кристалле. Таким образом, через это окно свет попадает внутрь фотодиода и облучает одну из областей электронно-дырочного перехода. Фотодиоды могут быть использованы в одном из двух включений: вентильном или фотодиодном [169, с. 92].

Рассмотрим фотодиодное включение компонента. Последовательно с фотодиодом включим нагрузочный резистор и источник питания, подсоединённый плюсом к катоду фотодиода, а минусом к аноду. Пока облучение окна отсутствует, через фотодиод протекает маленький обратный ток Φ_0 , который называют темновым током, силой от единиц до нескольких десятков микроампер. Это отражено на вольтамперной характеристике фотодиода, показанной на рисунке 3.5.

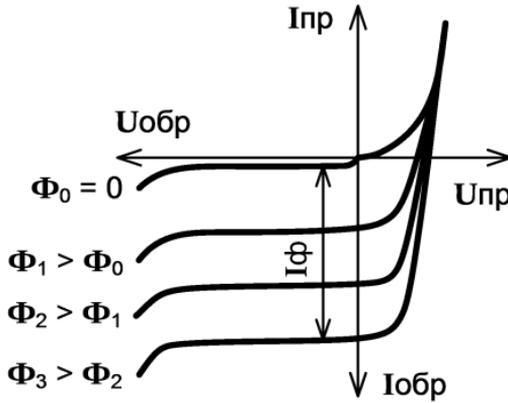


Рис. 3.5. ВАХ фотодиода

Облучим кристалл слабым световым потоком, к спектру которого будет чувствителен фотодиод, отчего возникнет генерация электронов и дырок, и обратный ток станет больше ($\Phi_1 > \Phi_0$). Ток, протекающий через нагрузочный резистор, возрастет. Если световой поток станет ещё значительнее, то соответственно возрастет и обратный ток фотодиода ($\Phi_2 > \Phi_1$). Пропускаемый по нагрузочному резистору ток станет ещё существенней. Очевидно, что сила тока, протекающего по резистору, и падение постоянного напряжения на нём зависят от величины светового потока.

В вентильном включении внешний источник питания не используют, а к выводам фотодиода подсоединяют нагрузочный резистор. Под действием светового потока возникает фотогенерация носителей заряда и фото-ЭДС, на выводах фотодиода появляется постоянное напряжение. Это напряжение подводят к нагрузочному резистору, через который течёт электрический ток.

Фотодиоды обладают продолжительным сроком наработки на отказ, высокой чувствительностью к регистрируемому излучению, обладают малыми массой и габаритами.

4. Биполярные транзисторы

4.1. Общие сведения о транзисторах

Транзисторами называют полупроводниковые приборы, которые располагают не менее чем тремя выводами и в определённых обстоятельствах могут усиливать мощность, преобразовывать сигнал, или генерировать колебания. Различных видов транзисторов много – это полевые (униполярные) и биполярные транзисторы, биполярные транзисторы с изолированным затвором и однопереходные (двухбазовые) транзисторы, фототранзисторы и другие.

Усилительные каскады, выполненные на транзисторах, требуют небольшого напряжения питания величиной всего в несколько вольт, а КПД может достигать нескольких десятков процентов. Транзисторы по сравнению с электронными лампами обладают большей экономичностью, низким энергопотреблением, длительным временем наработки на отказ, малой массой и габаритами, высокой механической прочностью. К недостаткам транзисторов следует отнести невысокую радиационную стойкость, невозможность работы при температуре полупроводникового кристалла из кремния значительно выше $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ и прочее.

Транзисторы классифицируют по материалу полупроводника, подразделяя на германиевые, кремниевые, из арсенида галлия и прочие.

Биполярные транзисторы, у которых две из трёх областей имеют дырочный тип проводимости, называют транзисторами с прямой проводимостью, или структуры p-n-p. А биполярные транзисторы, у которых две из трёх областей имеют электронный тип проводимости, называют транзисторами с обратной проводимостью, или структуры n-p-n.

Рассматриваемые приборы, которые не способны усиливать сигнал с частотой более 3 МГц, называют низкочастотными транзисторами. Приборы, которые могут усиливать сигнал с частотой более 3 МГц, но менее 30 МГц, называют среднечастотными транзисторами. А транзисторы, которые допускают усиление сигнала с частотой, превышающей 30 МГц, называют высокочастотными, а позволяющие работать на ещё большей частоте (выше 300 МГц) называют сверхвысокочастотными.

Если компоненты не могут обеспечить мощность рассеяния, превышающую 0,3 Вт, то такие транзисторы называют маломощными. Приборы, которые имеют рассеиваемую мощность более 0,3 Вт, но менее 3 Вт, называют транзисторами средней мощности. А транзисторы, мощность рассеяния которых превышает 3 Вт, называют мощными транзисторами.

4.2. Конструкция некоторых биполярных транзисторов

Для изготовления дискретного биполярного транзистора необходим полупроводник электронного или дырочного типов проводимости, именуемый, как и вывод от него, базой, который, например, методом сплавления или диффузии легируют акцепторными примесями так, чтобы по обе стороны от базы были выполнены зоны с противоположными типами проводимостей. Это отражено на упрощённой конструкции сплавного биполярного транзистора, приведённой на рис. 4.1.

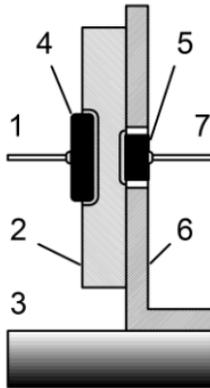


Рис. 4.1. Конструкция биполярного транзистора

На рисунке цифрами обозначены: 1 – коллектор; 2 – база транзистора, например, образованная кристаллом германия или кремния; 3 – основание компонента; 4, 5 – вплавленные в кристалл примеси, например, индия или алюминия; 6 – кристаллодержатель; 7 – эмиттер. Кристалл полупроводника, образующий базу транзистора, в данном случае механически прикреплен и электрически соединен с металлической пластинкой, приваренной к стенке компонента. Толщина базы обычно не превышает нескольких микрон. На рисунке видно, что эмиттерная область имеет меньшую площадь, чем коллекторная. Между базой и коллектором лежит коллекторный переход, а между базой и эмиттером – эмиттерный переход. В области базы транзистора концентрация носителей заряда чрезвычайно низка, а, следовательно, её проводимость очень мала. В области коллектора концентрация и проводимость намного больше, чем в области базы, а в области эмиттера несколько выше, чем в области коллектора. Таким образом, концентрации носителей зарядов в областях транзисторов существенно отличаются.

Усиление или генерация колебаний транзисторами связана с инжекцией носителей зарядов обоих типов. Те компоненты, в которых

перемещение носителей зарядов возникает по большей части за счёт диффузии, называют диффузионными транзисторами, а если за счёт дрейфа – то дрейфовыми транзисторами.

В диффузионных транзисторах неосновные носители заряда проходят область базы за счёт теплового движения. Чтобы диффузионный транзистор мог обладать высокой граничной частотой усиления, необходимо выполнить область базы как можно меньшей толщины, однако в результате этого её сопротивление будет велико. Если попробовать увеличить её проводимость благодаря легированию, то возрастёт ёмкость коллекторного перехода, что ухудшит частотные свойства транзистора.

В дрейфовых транзисторах создают такое неравномерное распределение примесей в области базы, чтобы концентрация примеси в зоне прилегания базы к эмиттеру была ориентировочно от 2-х до 4-х порядков выше, чем в зоне прилегания базы к коллектору. Благодаря этому неосновные носители заряда будут быстрее преодолевать базу под действием укоряющего поля коллекторного перехода, что позволяет дрейфовым транзисторам иметь более высокую граничную частоту усиления сигнала, чем диффузионным транзисторам. А сопротивление области базы мало даже при небольшой её толщине благодаря легированию места прилегания базы к эмиттеру. Некоторые дрейфовые транзисторы предназначены для усиления и генерации СВЧ сигналов и могут работать на частотах в несколько десятков гигагерц.

4.3. Принцип действия биполярных транзисторов

Изучим принцип усиления биполярного транзистора, для чего обратимся к рисунку 4.2, на котором изображено движение носителей заряда в транзисторе p-n-p структуры, включённом по схеме с об-

щей базой. На нём протяжённости областей отражены без соблюдения масштаба и реальных размеров.

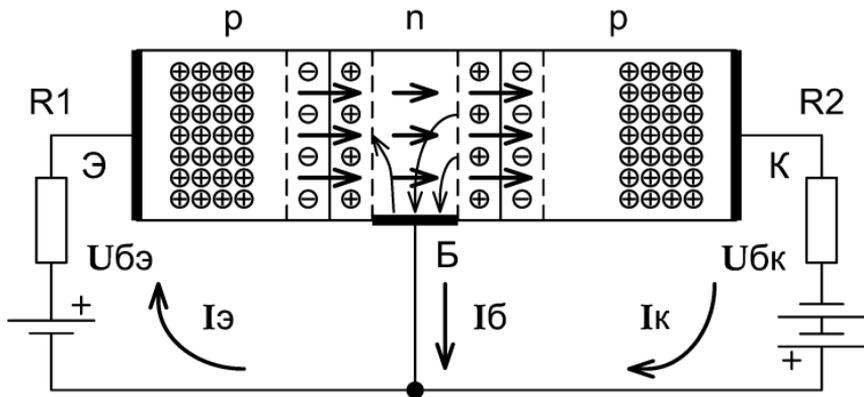


Рис. 4.2. Движение носителей заряда в транзисторе

На рисунке знаком \oplus показаны дырки, а знаком \ominus – электроны. В связи с тем, что в работе компонента участвуют и электроны, и дырки, такой транзистор именуют биполярным. Выводы база-эмиттер транзистора будем считать входом каскада, а выводы база-коллектор – его выходом.

Благодаря включению двух источников питания переход база-коллектор закрыт, а переход база-эмиттер открыт. Из-за этого по переходу база-эмиттер будет течь эмиттерный ток, порождённый движением преимущественно электронов. Он течёт по цепи от положительного полюса источника питания база-эмиттер, по резистору $R1$, от области эмиттера транзистора к области базы, а затем к отрицательному полюсу этого же источника питания. Резистор $R1$ символизирует внутреннее сопротивление источника сигнала. Направление протекания тока символически стрелками отражено на рисунке. Эффективность инжекции характеризует коэффициент инжекции. В данном случае он равен отношению тока эмиттера,

вызванного движением только основных носителей заряда, к полному току эмиттера, обусловленному миграцией и дырок, и электронов. Область базы обогащается инжектируемыми носителями заряда, которые в области эмиттера были основными, а в области базы стали неосновными. Поле коллекторного перехода является ускоряющим для попавших в область базы носителей зарядов, и это поле их втягивает в коллекторный переход. Происходит их рекомбинация с основными носителями заряда области базы. Однако она незначительна в связи с тем, что толщина области базы много меньше, чем двух других областей, и электроны почти беспрепятственно преодолевают область базы и оказываются в области коллектора, в которой они вновь станут основными носителями заряда. Успевшие рекомбинировать электроны вызывают протекание небольшого тока через вывод базы транзистора, который называют рекомбинационным. Рекомбинация некоторого количества носителей заряда в области базы происходит постоянно до тех пор, пока каскад не будет обесточен, так как электроны будут всё время поступать от положительного полюса источника питания база-эмиттер. Обогащение области коллектора носителями заряда, которые в ней будут основными, приводит к протеканию коллекторного тока транзистора. Он течёт по цепи от положительного полюса источника питания база-коллектор, по области базы, затем по области коллектора, по нагрузочному резистору R_2 , к отрицательному полюсу источника питания.

Очевидно, что даже незначительное изменение напряжения база-эмиттер вызывает существенно большее изменение напряжения база-коллектор и, отдавая небольшую мощность управляющего сигнала, поданного на базу транзистора, можно управлять многократно большей мощностью нагрузки. Следовательно, рассматриваемый каскад может осуществить усиление сигнала по напряжению. Ток эмиттера транзистора при любом варианте включения последнего равен сумме токов коллектора и базы.

Амплитуду тока коллектора транзистора можно вычислить по формуле:

$$I_k = I_{\varepsilon} \cdot h_{21б} + I_{кбо},$$

где I_{ε} – ток эмиттера, А;

$h_{21б}$ или α – дифференциальный коэффициент передачи тока, который поступает в коллектор из эмиттера. Он равен отношению изменения тока коллектора к изменению тока эмиттера при фиксированных значениях температуры, напряжения база-коллектор и прочего:

$$h_{21б} = \Delta I_k / \Delta I_{\varepsilon}.$$

$I_{кбо}$ – обратный ток коллектора транзистора, А.

Кроме того, ток коллектора транзистора допустимо найти согласно выражению:

$$I_k = I_b \cdot h_{21\varepsilon} + I_{к\varepsilonо},$$

где I_b – ток базы, А;

$h_{21\varepsilon}$ или β – это дифференциальный коэффициент передачи тока базы, соответствующий включению транзистора по схеме с общим эмиттером. Коэффициент $h_{21\varepsilon}$ равен отношению приращения тока коллектора к приращению тока базы: $h_{21\varepsilon} = \Delta I_k / \Delta I_b$;

$I_{к\varepsilonо}$ – обратный ток коллектора при включении транзистора по схеме с общим эмиттером, А.

Коэффициенты $h_{21\varepsilon}$ и $h_{21б}$ связаны друг с другом соотношением [175, с. 78; 197, с. 698]:

$$h_{21\varepsilon} = h_{21б} / (1 - h_{21б}).$$

Рассмотренный дифференциальный коэффициент передачи эмиттерного тока $h_{21б}$ относят к одному из основных параметров транзистора. Коэффициент передачи тока эмиттера в описанном каскаде близок к единице и $h_{21б}$ обычно составляет от 0,94 до 0,999. Это означает, что усилительный каскад с транзистором, включённым по схеме с общей базой, не даёт усиления по току. Коэффициент усиления сигнала по мощности равен произведению коэффициентов усиления сигнала по току и по напряжению. Следовательно,

данный каскад даёт чуть меньшее усиление по мощности, чем по напряжению.

Для усиления сигналов любые транзисторные каскады тратят энергии источников питания, к которым подключены, и при этом всегда теряют часть энергии, и мощности потерь вызывают тепловыделения в компонентах.

4.4. Схемы включения биполярных транзисторов

4.4.1. Схема включения транзистора с общим эмиттером

Между базой и эмиттером транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером, подсоединяют источник сигнала, а к коллектору – нагрузку. К эмиттеру транзистора подключают полюсы одинаковых знаков источников питания. Входным током каскада выступает ток базы транзистора, а выходным током – ток коллектора. Это показано на рис. 4.3, на примере включения в электрическую цепь биполярного p-n-p транзистора.

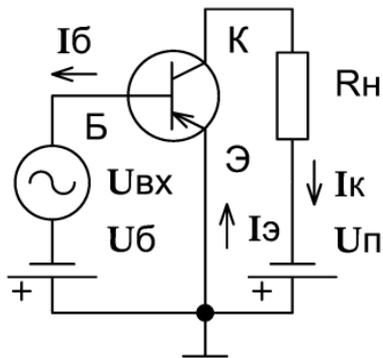


Рис. 4.3. Включение p-n-p транзистора по схеме с общим эмиттером

На практике обходятся одним источником питания, а не двумя. Направление протекания тока по выводам транзистора дано на рисунке. Включение n-p-n транзистора совершенно аналогично включению p-n-p транзистора, однако в данном случае придётся поменять полярность обоих источников питания.

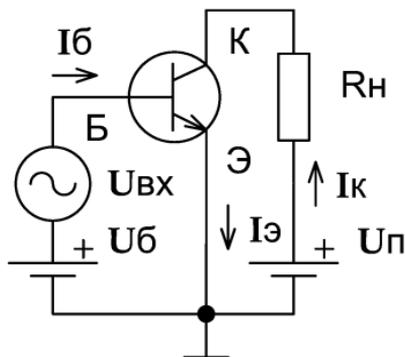


Рис. 4.4. Включение n-p-n транзистора по схеме с общим эмиттером

Коэффициент усиления каскада равен отношению тока коллектора к току базы и обычно может достигать от десятков до нескольких сотен. Транзистор, включённый по схеме с общим эмиттером, теоретически может дать максимальное усиление сигнала по мощности, относительно других вариантов включения транзистора. Входное сопротивление рассматриваемого каскада, равное отношению напряжения база-эмиттер к току базы, лежит в пределах от сотен до тысяч Ом. Это меньше, чем у каскада с транзистором, подсоединённым по схеме с общим коллектором. Выходной сигнал каскада с общим эмиттером обладает фазовым сдвигом в 180° относительно входного сигнала. Флюктуации температуры оказывают значительное влияние на режим работы транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером, и поэтому следует применять специальные цепи температурной стабилизации. В связи с тем, что сопротивление коллекторного перехода транзистора в рассмотренном

каскаде выше, чем в каскаде с общей базой, то необходимо больше времени на рекомбинацию носителей заряда, а, следовательно, каскад с общим эмиттером обладает худшим частотным свойством.

4.4.2. Схема включения транзистора с общим коллектором

К эмиттеру транзистора, включённого по схеме с общим коллектором, подсоединяют нагрузку, на базу подают входной сигнал. Входным током каскада является ток базы транзистора, а выходным током – ток эмиттера. Это отражено на рис. 4.5, на котором изображена схема включения биполярного р-п-р транзистора.

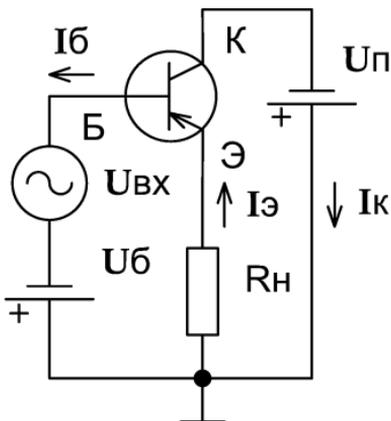


Рис. 4.5. Включение транзистора по схеме с общим коллектором
С нагрузочного резистора, включённого последовательно с выводом эмиттера, снимают выходной сигнал. Вход каскада обладает высоким сопротивлением, обычно от десятых долей мегаома до нескольких мегаом из-за того, что коллекторный переход транзистора заперт. А выходное сопротивление каскада – напротив, мало, что позволяет использовать такие каскады для согласования предшест-

вующего каскада с нагрузкой. Каскад с транзистором, включённым по схеме с общим коллектором, не усиливает напряжение, но усиливает ток (обычно в 10 ... 100 раз). Фаза входного напряжения сигнала, подаваемого на каскад, совпадает с фазой выходного напряжения, т.е. отсутствует его инверсия. Именно из-за сохранения фазы входного и выходного сигнала каскад с общим коллектором носит другое название – эмиттерного повторителя. Температурные и частотные свойства эмиттерного повторителя хуже, чем у каскада, в котором транзистор подключён по схеме с общей базой.

4.4.3. Схема включения транзистора с общей базой

В каскаде, собранном по схеме с общей базой, напряжение входного сигнала подают между эмиттером и базой транзистора, а выходное напряжение снимают с выводов коллектор-база. Включение транзистора р-п-р структуры по схеме с общей базой приведено на рис. 4.6.

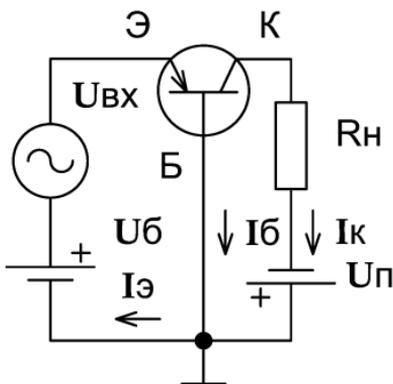


Рис. 4.6. Включение транзистора по схеме с общей базой

В данном случае эмиттерный переход компонента открыт и велика его проводимость. Входное сопротивление каскада невелико и обычно лежит в пределах от единиц до сотни Ом, что относят к не-

достатку описываемого включения транзистора. Кроме того, для функционирования каскада с транзистором, включённым по схеме с общей базой, необходимо два отдельных источника питания, а коэффициент усиления каскада по току меньше единицы. Коэффициент усиления каскада по напряжению часто достигает от десятков до нескольких сотен раз.

К достоинствам нужно отнести возможность функционирования каскада на существенно более высокой частоте по сравнению с двумя другими вариантами включения транзистора, и слабое влияние на работу каскада флюктуаций температуры. Именно поэтому каскады с транзисторами, включёнными по схеме с общей базой, часто используют для усиления высокочастотных сигналов.

4.5. Биполярные фототранзисторы

Фототранзистором называют транзистор, чувствительный к облучающему его световому потоку. Обычно дискретный фототранзистор по конструкции похож на дискретный транзистор, с тем отличием, что в герметичном корпусе фототранзистора есть окно, например, из стекла или прозрачной специальной пластмассы, через которое излучение попадает на область базы фототранзистора. Включение фототранзистора в электрическую цепь таково, что к эмиттеру подключают положительный полюс внешнего источника питания, к коллектору подсоединяют нагрузочный резистор, к которому в свою очередь подключают отрицательный полюс источника питания. При облучении области базы происходит генерация носителей зарядов. Наибольшая концентрация основных носителей заряда будет в базе, что приведёт к открытию фототранзистора, а неосновные носители заряда будут мигрировать в коллекторный переход. Следовательно, облучение фототранзистора приводит к увеличению тока его коллектора. Чем больше будет освещённость области базы, тем существенней станет ток коллектора фототранзистора.

Таким образом, фототранзистором можно управлять и как обычным биполярным транзистором, варьируя током базы, и как светочувствительным прибором. К важным параметрам фототранзистора относят темновой ток, ток при освещении и интегральную чувствительность. Темновой ток – это ток коллектора при отсутствии облучения. Ток при освещении – ток коллектора при наличии облучения. Интегральная чувствительность – это отношение силы тока коллектора у подключённого фототранзистора к величине светового потока [39, с. 202].

Фототранзисторы применяют в оптронах, устройствах автоматики и телеуправления, в приборах уличного освещения и пр.

4.6. Влияние частоты на усилительные свойства биполярных транзисторов

Известно, что чем выше частота сигнала, поступающего на вход транзисторного каскада, тем меньше коэффициент усиления по току. Основной вклад в снижение усилительных свойств нужно отнести к барьерной ёмкости и отставанию переменных токов коллектора от эмиттера на время, необходимое для диффузии носителей заряда в области базы [39, с. 191]. Кроме того, ёмкости между корпусом и выводами транзистора пагубно влияют на усилительные свойства прибора.

Коллекторный переход транзистора обладает высоким сопротивлением. Повышение частоты приводит к снижению реактивной ёмкости коллекторного перехода, что приводит к его существенному шунтированию и ухудшению усилительных свойств каскада [169, с. 64].

Носители заряда преодолевают область базы и рекомбинируют за небольшой конечный интервал времени, исчисляемый десятками наносекунд. Чем выше будет частота, тем существенней станет за-

паздывание носителей заряда. На постоянном токе сдвиг фаз между токами коллектора и эмиттера транзистора равен нулю, а полный ток базы минимален. На высокой частоте между переменными токами коллектора и эмиттера транзистора возникнет сдвиг фаз, которого не было на постоянном токе. При этом полный ток базы транзистора на высокой частоте много больше полного тока базы на низкой частоте и, тем более, на постоянном токе. Повышение тока базы для получения заданного фиксированного тока коллектора означает уменьшение коэффициента усиления транзистора по току.

Чтобы повысить граничную частоту усиления транзистора, необходимо выполнить область базы как можно меньшей толщины, повысить скорость прохождения через неё неосновных носителей зарядов, уменьшить ёмкость корпуса и выводов транзистора и прочее.

4.7. Влияние температуры на режимы работы биполярных транзисторов

Чтобы германиевый транзистор не вышел из строя, температура его кристалла должна быть меньше примерно $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, кремниевого транзистора – меньше $125 \dots 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, а арсенид-галлиевого транзистора – меньше $150 \dots 200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Введение легирующих добавок несколько корректирует максимально допустимую температуру кристалла, а некоторые специально сконструированные транзисторы выдерживают и более высокую температуру. Так, согласно справочным данным, кремниевый биполярный транзистор КТ921В был разработан для применения в геофизической аппаратуре при температуре корпуса компонента не более $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. При существенно более высокой температуре транзистора он испортится из-за необратимой перестройки кристаллической решётки. Нагрев биполярных транзисторов вызывает увеличения проводимости области базы и обратного тока коллектора. При повышении температуры корпуса транзистора

от 20 °С до 60 °С обратный ток коллектора обычно может возрасти до шести раз. Следовательно, флюктуации температуры оказывают очень существенное влияние на функционирование транзисторного каскада, вызывая значительные изменения режима его работы. Чтобы флюктуация температуры не привела, допустим, к возникновению автогенерации каскада, предназначенного для усиления, или другим вредным последствиям, необходимо применять цепи термостабилизации режимов работы транзисторов.

5. Полевые транзисторы

5.1. Общие сведения о полевых транзисторах

Полевым транзистором именуют такой компонент, через который под влиянием продольного электрического поля протекает ток, обусловленный движением носителей заряда сугубо одного типа. Так как принцип действия полевых транзисторов основан на перемещении основных носителей заряда одного типа проводимости, такие компоненты ещё называют униполярными.

Затвором называют вывод полевого транзистора, к которому подводят напряжение от устройства управления. Следует подчеркнуть, что управление полевыми транзисторами осуществляют напряжением, а биполярными транзисторами – током. Истоком именуют вывод, который обычно служит источником поступления в транзистор носителей заряда от устройства электропитания. Стоком называют вывод компонента, через который носители заряда покидают транзистор. Перемещение основных носителей заряда от истока к стоку происходит по области, которая носит название канала полевого транзистора. Каналы у полевых транзисторов могут быть как электронного, так и дырочного типов проводимостей. Носителями заряда в полевых транзисторах n-типа выступают электроны, а в приборах p-типа – дырки. Полевые транзисторы классифицируют на приборы с управляющим переходом и с изолированным затвором, причём последние подразделяют на транзисторы со встроенным каналом и приборы с индуцированным каналом.

К основным параметрам полевых транзисторов причисляют входное сопротивление, внутреннее сопротивление транзистора, также называемое выходным, крутизну стокзатворной характеристики, напряжение отсечки и другое. Входное сопротивление тран-

зистора – это отношение приращения напряжения затвор-исток и приращению тока затвора. Внутреннее сопротивление транзистора – это отношение приращения напряжения сток-исток к приращению тока стока при заданном напряжении затвор-исток. Крутизна стоко-затворной характеристики – это отношение приращения тока стока к приращению напряжения затвор-исток при фиксированном напряжении сток-исток.

5.2. Полевые транзисторы с управляющим переходом

5.2.1. Конструкция полевых транзисторов с управляющим переходом

Первый полевой транзистор с управляющим переходом теоретически были рассчитан Уильямом Шокли в 1952 году. Одна из разновидностей таких транзисторов – унитарон – представляет собой полупроводниковую пластину дырочного или электронного типов проводимостей. На её торцы наносят токопроводящие плёнки, к которым подключают выводы стока и истока, а широкие грани легируют для получения противоположного типа проводимости относительно проводимости пластины и подсоединяют к этим граням вывод затвора. Другая разновидность полевых транзисторов с управляющим переходом – текнетрон – может быть образован, например, стержнем из германия, к торцам которого подсоединяют выводы истока и стока, а вокруг стержня внесением индия выполняют кольцеобразный затвор [169, с. 67].

Упрощённая конструкция полевого транзистора с управляющим переходом и каналом р-типа проводимости изображена на рис. 5.1.

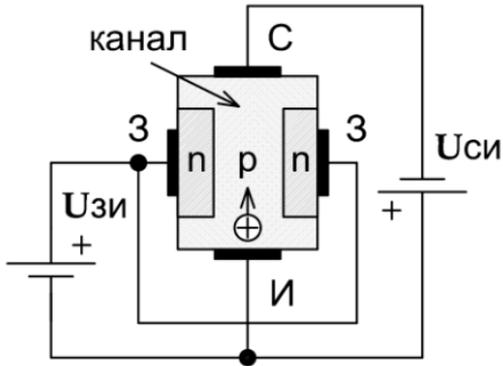


Рис. 5.1. Конструкция полевого транзистора с управляющим переходом и каналом р-типа

Из рисунка видно, что канал возникает между двумя р-п переходами. Конструкция компонентов с каналом п-типа не имеет отличий от конструкции полевых транзисторов с каналом р-типа, что видно на рис. 5.2.

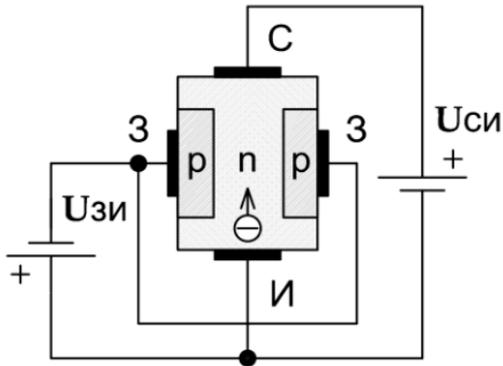


Рис. 5.2. Конструкция полевого транзистора с управляющим переходом и каналом п-типа.

Но в полевых транзисторах с каналом n-типа полупроводник, в котором возникает канал, обладает электронным типом проводимости, а области затвора имеют дырочную проводимость. Полевые транзисторы с каналом n-типа могут обладать лучшими частотными и температурными свойствами и образовывать шумы меньшей амплитуды, чем приборы с каналом p-типа.

5.2.2. Принцип действия полевых транзисторов с управляющим переходом

Принцип действия полевых транзисторов с управляющим переходом заключён в изменении площади сечения канала под воздействием поля, возникающего при подаче напряжения между затвором и истоком. Упрощённая структура полевого транзистора с управляющим переходом и каналом p-типа приведена на рис. 5.3.

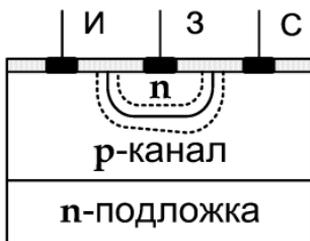


Рис. 5.3. Структура транзистора с управляющим переходом и каналом p-типа

Пока между затвором и истоком не подано напряжение управления, под воздействием внутреннего поля электронно-дырочных переходов они заперты, сечение канала наиболее велико, его сопротивление низко, и ток стока транзистора максимален. Напряжение затвор-исток, при котором ток стока наиболее велик, называют напряжением насыщения.

Если между затвором и истоком приложить небольшое напряжение, ещё немного закрывающее р-n переходы, то зоны, к которым подсоединён затвор, будут обеднены носителями заряда, размеры этих зон объёмного заряда возрастут, частично перекрывая сечение канала, сопротивление канала возрастёт, и сила тока стока станет меньше. Обеднённые носителями заряда области почти не проводят электрический ток, причём эти области неравномерны по длине пластины полупроводника. Так, у торца пластинки, к которому подключен вывод стока, обеднённые носителями заряда области будут наиболее существенно перекрывать канал, а у противоположного торца, к которому подсоединён вывод истока, снижение площади сечения канала будет наименьшим.

Если приложить ещё большее напряжение между затвором и истоком, то области, обеднённые носителями заряда, станут столь велики, что сечение канала может быть ими полностью перекрыто. При этом сопротивление канала будет наибольшим, а ток стока будет практически отсутствовать. Напряжение затвор-исток, соответствующее такому случаю, именуют напряжением отсечки.

К важнейшим характеристикам полевых транзисторов относят стокзатворную характеристику и семейство стоковых характеристик. Стокзатворная характеристика отражает зависимость силы тока стока от приложенного к выводам затвор-исток напряжения при фиксированном напряжении сток-исток. Это показано на рис. 5.4 для полевых транзисторов с управляющим переходом и каналами р-типа и n-типа проводимостей.

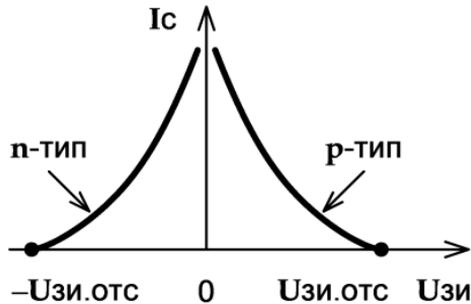


Рис. 5.4. Стокозатворные характеристики транзисторов с управляющим переходом

Семейство стоковых характеристик представляет зависимости токов стока от напряжений сток-исток при фиксированных стабильных напряжениях затвор-исток, что изображено на рис. 5.5.

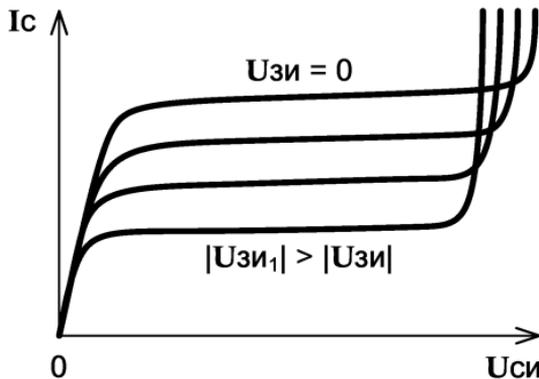


Рис. 5.5. Стоковая характеристика транзисторов с управляющим переходом

По достижении определённого значительного напряжения сток-исток развивается лавинный пробой области между затвором и сто-

ком. При этом идёт резкое увеличение тока стока, что можно видеть на стоковой характеристике.

Функционирование полевых транзисторов с управляющим переходом возможно сугубо путём обеднения канала носителями заряда. В связи с тем, что напряжение сигнала прикладывают к закрытому переходу, входное сопротивление каскада велико и для рассмотренных выше приборов может достигать 10^9 Ом.

5.3. Полевые транзисторы с изолированным затвором

Полевой транзистор с изолированным затвором потому носит такое название, что его затвор, выполненный из тонкого металлического покрытия, нанесён на диэлектрический слой, который отделяет затвор от канала. По этой причине полевые транзисторы с изолированным затвором имеют аббревиатуру МДП (металл – диэлектрик – полупроводник). Слой диэлектрика часто образуют двуокисью кремния. Такие полевые транзисторы носят аббревиатуру МОП (металл – оксид – полупроводник). Полевые транзисторы с изолированным затвором имеют большее входное сопротивление, достигающее 10^{15} Ом, чем полевые транзисторы с управляющим переходом.

5.3.1. Полевые транзисторы со встроенным каналом

Структура полевого транзистора со встроенным каналом n-типа проводимости дана на рис. 5.6.

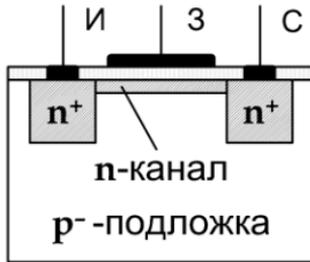


Рис. 5.6. Структура транзистора со встроенным каналом

Приложим от источника питания постоянное напряжение между выводами сток-исток. Пока напряжение затвор-исток отсутствует, канал обладает некоторым сопротивлением, по нему двигаются основные носители заряда, а, следовательно, протекает некоторый ток стока транзистора. Если к выводам затвор-исток транзистора с каналом n-типа подключить источник питания так, чтобы на затвор было подано напряжение положительной полярности, то неосновные носители заряда, присутствующие в подложке, будут втянуты электрическим полем в канал. Концентрация носителей заряда в канале возрастёт, его сопротивление станет меньше, а, значит, ток стока станет больше. Если подключить источник питания обратной полярностью так, чтобы на затвор было подано отрицательное напряжение относительно истока, то электроны, присутствующие в канале, под действием поля будут вытеснены в подложку. При этом концентрация носителей заряда в канале станет ниже, сопротивление канала возрастет, и ток стока станет меньше. Если запирающее напряжение затвор-исток будет столь велико, что практически все носители заряда будут оттеснены в подложку, то ток стока станет почти отсутствовать. Стокозатворные характеристики полевых транзисторов со встроенным каналом n-типа и p-типа проводимостей приведены на рис. 5.7.

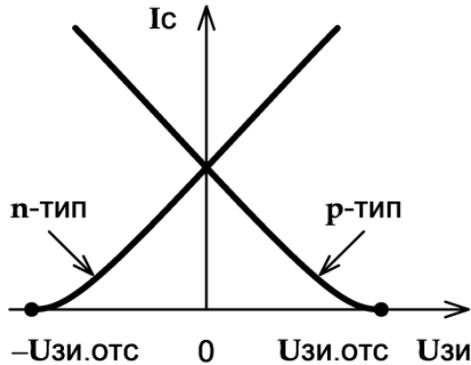


Рис. 5.7. Стокозатворные характеристики полевых транзисторов со встроенным каналом

Заклучим, что полевые транзисторы со встроенным каналом функционируют как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения канала.

5.3.2. Полевые транзисторы с индуцированным каналом

Структура полевого транзистора n-типа проводимости с индуцированным каналом представлена на рис. 5.8.

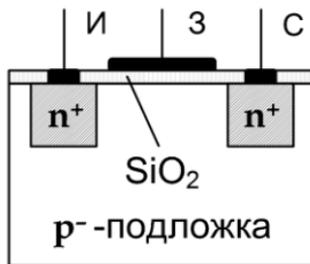


Рис. 5.8. Структура транзистора с индуцированным каналом

Когда напряжение затвор-исток полевого транзистора, изображённого на рисунке, отсутствует, либо к затвору приложено напряжение отрицательной полярности, канал не возникает и ток стока транзистора не течёт. Когда на затвор транзистора подано напряжение положительной полярности относительно истока, возникнет электрическое поле, втягивающее в область под затвором электроны, которые находились в подложке на правах неосновных носителей заряда. А дырки из канала полем будут отеснены в подложку, обладающую р-типом проводимости. Концентрация электронов в локальном участке полупроводника под затвором между стоком и истоком возрастает относительно концентрации дырок, то есть имеет место смена типа проводимости и возникает, или как говорят, индуцируется, канал. В результате происходит движение носителей заряда по каналу, и течёт ток стока. Стокозатворные характеристики полевых транзисторов с индуцированным каналом р-типа и n-типа проводимостей даны на рис. 5.9.

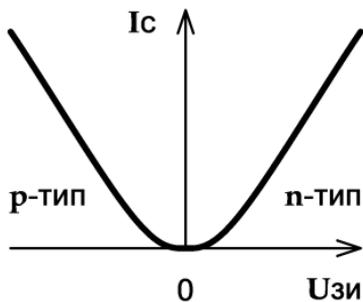


Рис. 5.9. Стокозатворные характеристики полевых транзисторов с индуцированным каналом

Сделаем вывод, что полевые транзисторы с индуцированным каналом функционируют сугубо в режиме обогащения канала носителями заряда.

5.4. Режимы работы полевых транзисторов

5.4.1. Динамический режим работы транзистора

Динамическим режимом работы называют такой режим, в котором к транзистору, который усиливает входной сигнал, подключена нагрузка. Такой нагрузкой может служить резистор R_c , подсоединённый последовательно со стоком полевого транзистора, включённого по схеме с общим истоком, что показано на рис. 5.10.

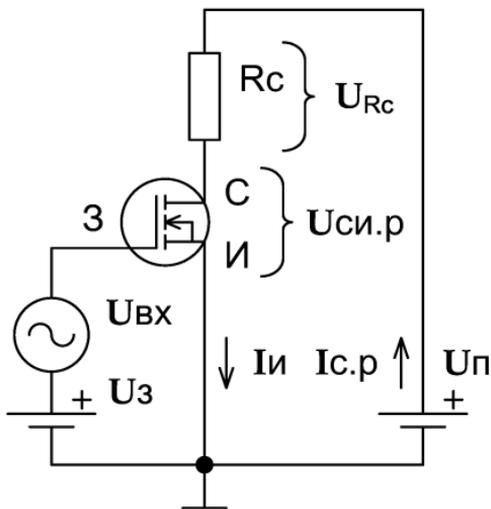


Рис. 5.10. Транзистор в динамическом режиме работы

Постоянное напряжение питания каскада U_p составляет сумму падений напряжений на выводах сток-исток транзистора и на резисторе R_c , то есть $U_p = U_{Rc} + U_{си.р}$. В тоже время, согласно закону Ома, падение напряжения на нагрузочном резисторе R_c равно произведению протекающего по нему тока $I_{с.р}$ на его сопротивление: $U_{Rc} = I_{с.р} \cdot R_c$. Согласно сказанному, напряжение питания

каскада составляет: $U_{п} = U_{си.p} + I_{с.p} \cdot R_{с}$. Последнее выражение можно переписать относительно напряжения сток-исток транзистора, и в этом случае получим линейную формулу для выходной цепи $U_{си.p} = U_{п} - I_{с.p} \cdot R_{с}$, которую именуют уравнением динамического режима.

На выходных статических характеристиках транзистора для получения представления о режимах работы каскада строят динамическую характеристику, имеющую форму линии. Рассмотрим рисунок 5.11, на котором изображена такая динамическая характеристика усилительного каскада.

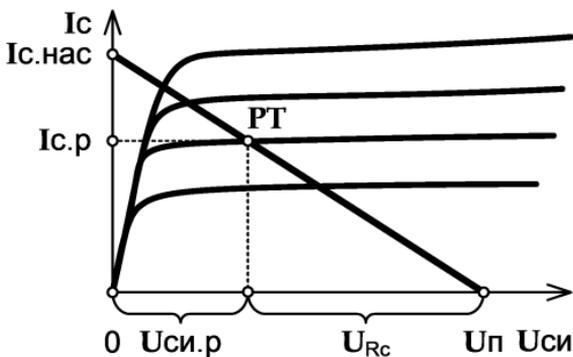


Рис. 5.11. Динамическая характеристика

Чтобы провести эту линию, которую ещё называют нагрузочной прямой, необходимо знать две координаты точек, соответствующих напряжению питания каскада и току стока в режиме насыщения. Эта нагрузочная прямая пересекает семейство выходных статических характеристик, а точка пересечения, которую называют рабочей, соответствует определённому напряжению затвор-исток. Зная положение рабочей точки, можно вычислить некоторые ранее не известные токи и напряжения в конкретном устройстве.

5.4.2. Ключевой режим работы транзистора

Ключевым называют такой режим работы транзистора, при котором он может быть либо полностью открыт, либо полностью закрыт, а промежуточное состояние, при котором компонент частично открыт, в идеале отсутствует. Мощность, которая выделяется в транзисторе, в статическом режиме равна произведению тока, протекающего через выводы сток-исток, и напряжения, приложенного между этими выводами.

В идеальном случае, когда транзистор открыт, т.е. в режиме насыщения, его сопротивление между выводами сток-исток стремится к нулю. Мощность потерь в открытом состоянии представляет произведение равного нулю напряжения на определённую величину тока. Таким образом, рассеиваемая мощность равна нулю.

В идеале, когда транзистор закрыт, т.е. в режиме отсечки, его сопротивление между выводами сток-исток стремится к бесконечности. Мощность потерь в закрытом состоянии есть произведение определённой величины напряжения на равное нулю значение тока. Следовательно, мощность потерь равна нулю.

Выходит, что в ключевом режиме, в идеальном случае, мощность потерь транзистора равна нулю. На практике, естественно, когда транзистор открыт, присутствует некоторое небольшое сопротивление сток-исток, а падение постоянного напряжения между этими выводами называют напряжением насыщения. Когда транзистор закрыт, по выводам сток-исток протекает ток небольшой величины. Таким образом, мощность потерь в транзисторе в статическом режиме мала. Однако в динамическом режиме, когда транзистор открывается или закрывается, его рабочая точка форсирует линейную область, в которой ток через транзистор может условно составлять половину максимального тока стока, а напряжение сток-исток может достигать половины от максимальной величины. Таким образом, в динамическом режиме в транзисторе выделяется огромная мощность потерь, которая свела бы на нет все замечатель-

ные качества ключевого режима, но к счастью длительность нахождения транзистора в динамическом режиме много меньше длительности пребывания в статическом режиме. В результате этого КПД реального транзисторного каскада, работающего в ключевом режиме, может быть очень высок и составлять до 93% – 98%.

Работающие в ключевом режиме транзисторы широко применяются в силовых преобразовательных установках, импульсных источниках электропитания, в выходных каскадах некоторых передатчиков и пр.

6. Биполярные транзисторы с изолированными затворами

6.1. Общие сведения о БТИЗ

Биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ) – по-английски «insulated gate bipolar transistor» или сокращённо IGBT – это компонент, управление которым, как полевым транзистором, осуществляют напряжением, а протекание тока по силовым выводам коллектора и эмиттера обусловлено, как у биполярного транзистора, движением носителей зарядов обоих типов. В едином технологическом цикле в полупроводнике организуют структуры мощного биполярного р-п-р транзистора, которым управляет МОП-транзистор малой мощности, имеющий n-канал. Выводы БТИЗ носят названия затвора, коллектора и эмиттера.

Достоинства: возможность коммутации токов в тысячи ампер и допустимость прикладывания постоянного напряжения коллектор-эмиттер в несколько киловольт к запертому транзистору. Если напряжение коллектор-эмиттер запертого БТИЗ превышает приблизительно 600В, то падающее на выводах коллектор-эмиттер открытого БТИЗ напряжение насыщения обычно меньше по сравнению с полевыми транзисторами той же ценовой группы.

Недостатки: даже наименее инерционные БТИЗ предназначены для функционирования на много более низкой частоте, нежели полевые транзисторы, причём чем выше частота, тем ниже максимально допустимая амплитуда тока коллектора транзистора. При этом БТИЗ по частотным свойствам подразделяют на группы. При изготовлении БТИЗ помимо необходимого биполярного р-п-р транзистора возникает ещё и паразитный биполярный п-р-п транзистор,

и они совместно образуют структуру тиристора. Это отражено на эквивалентной схеме БТИЗ, изображённой на рис. 6.1, где компонент VT2 – это паразитный транзистор.

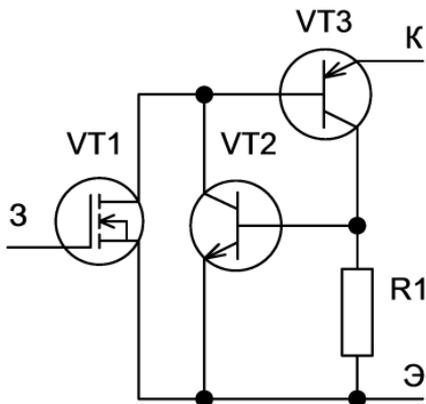


Рис. 6.1. Эквивалентная схема БТИЗ

При высокой скорости переключения компонента или при протекании по выводам коллектор-эмиттер короткого импульса тока большой амплитуды и прочего структура тиристора в БТИЗ может самопроизвольно перейти в открытое состояние. При этом БТИЗ теряет управляемость, и транзистор, как и устройство, в котором он работал, могут выйти из строя.

Прикладывая отпирающее напряжение к выводам затвор-эмиттер, БТИЗ из отсечки переводят в состояние насыщения, сопротивление коллектор-эмиттер падает, и по этим выводам течёт ток нагрузки. Если напряжение затвор-эмиттер отсутствует, то транзистор имеет состояние отсечки, в котором ток через выводы коллектор-эмиттер практически отсутствует. Таким образом, БТИЗ – это полностью управляемые компоненты. Современные силовые модули БТИЗ выдерживают прямой ток коллектора силой до 1,8 кА, напряжение коллектор-эмиттер в закрытом состоянии до 4,5 кВ. БТИЗ

обычно используют в качестве электронных ключей в импульсных преобразователях, например, инверторных сварочных аппаратов, в системах управления электродвигателями и т.д.

Дополнительную информацию о БТИЗ можно почерпнуть в литературе [44, с. 579 – 582].

6.2. Конструкция и принцип действия БТИЗ

Простейшая структура БТИЗ планарного исполнения отражена на рис. 6.2.

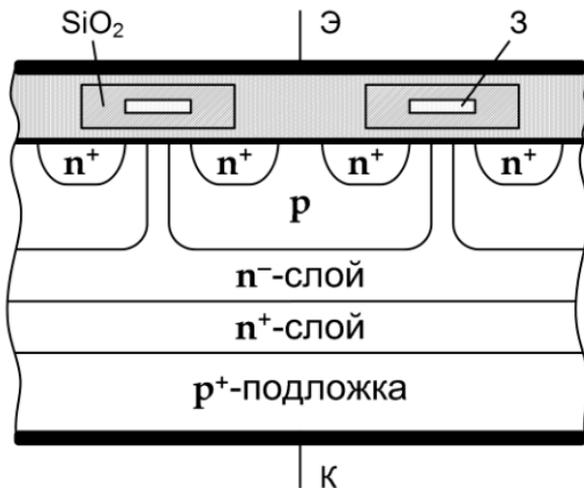


Рис. 6.2. Структура БТИЗ

Из рисунка видно, что на металлическом основании, к которому присоединён вывод коллектора, расположена подложка p^+ , а на ней находятся два n -слоя. Эти слои понижают коэффициент усиления p - p - r структуры мощного биполярного транзистора. Ближайший к подложке n^+ -слой необходим для снижения вероятности самопроизвольного отпираания тиристорной структуры. Более удалённый

от подложки n^- -слой претворяют в жизнь эпитаксиальным наращиванием или другими способами. Подложка p^+ играет роль эмиттера биполярного p - n - p транзистора, область n^- -слоя – его базы, а область p -типа, к которой подключают вывод эмиттера БТИЗ, – его коллектора. Над n^- -слоем расположена p -область, которая выполняет функцию канала управляющего МОП-транзистора, затвор которого выполнен из поликристаллического кремния и изолирован от полупроводника эмиттерной области слоем оксида SiO_2 . В этой канальной p -области размещены p^+ -зоны, которые выступают в качестве стока МОП-транзистора, а его истоком служит n^- -область. Затвор структуры МОП-транзистора соединён с выводом затвора БТИЗ.

Если на затвор БТИЗ относительно эмиттера подать напряжение положительной полярности, отпирающее компонент, то это приведёт вначале к открыванию под воздействием электрического поля структуры МОП-транзистора и инжекции электронов в её канал. В результате возникает инжекция носителей заряда в n^- -слой, служащий базой структуры биполярного p - n - p транзистора, которая переходит в состояние насыщения. Таким образом, вначале происходит отпирание структуры МОП-транзистора, а лишь затем структуры биполярного p - n - p транзистора. Спротивление коллектор-эмиттер открытого БТИЗ имеет очень малую величину, а по выводу коллектора компонента течёт ток нагрузки.

Если убрать поданное ранее отпирающее напряжение на выводы затвор-эмиттер БТИЗ, то канал в структуре МОП-транзистора исчезает, в n^- -слое происходит снижение концентрации носителей зарядов ввиду рекомбинации. Рекомбинация – процесс не мгновенный; пока она идет, транзистор не закрыт. Лишь по завершении рекомбинации БТИЗ переходит в состояние отсечки.

6.3. Основные параметры БТИЗ

К наиболее важным параметрам IGBT относят следующее:

- Длительность включения и выключения транзистора, мкс.
- Ёмкости затвор-эмиттер, коллектор-эмиттер и затвор-коллектор при заданном напряжении коллектор-эмиттер, нФ.
- Заряд затвора транзистора, нКл.
- Максимально допустимая температура нагрева кристалла транзистора, °С.
- Максимальная мощность рассеяния, Вт.
- Напряжение насыщения, т.е. напряжение между выводами коллектор-эмиттер открытого транзистора, В.
- Предельно допустимый импульсный ток коллектора при температуре 25 °С, А.
- Предельно допустимый постоянный ток коллектора при температуре 25 °С, А.
- Предельная скорость нарастания напряжения, не приводящая к самопроизвольному открыванию транзистора, dU / dt .
- Тепловое сопротивление переход-корпус, °С / Вт.
- Энергии включения, выключения и переключения, мДж.

7. Тиристоры

7.1. Общая информация о тиристорах

Тиристорами называют переключаемые полупроводниковые компоненты, имеющие четыре и более слоя и три и более чередующихся электронно-дырочных перехода. В качестве полупроводника обычно применяют кремний. К группе тиристоров относят динисторы, тринисторы, запираемые тиристоры, симисторы. У всех тиристоров на вольтамперной характеристике присутствует участок отрицательного дифференциального сопротивления. Тиристоры в основном производят по технологии диффузии.

Амплитуда максимального тока некоторых тиристоров может достигать десятков тысяч ампер, а напряжение анод-катод – нескольких киловольт. После включения между выводами анод-катод тиристоров присутствует остаточное напряжение величиной обычно от 1,2 В до 2,5 В.

7.2. Динисторы

Динистором, или, по-другому, диодным тиристором, называют переключаемый компонент с двумя выводами, который переходит в открытое состояние при превышении определённого напряжения, которое прикладывают между его выводами. Динисторы содержат три электронно-дырочных перехода. Схематичное изображение структуры динистора дано на рис. 7.1.

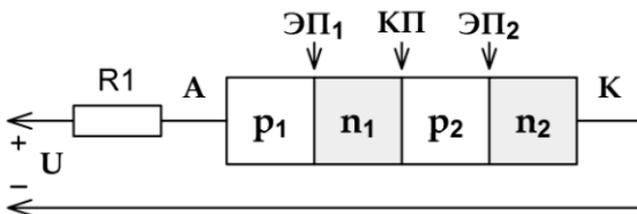


Рис. 7.1. Структура диодистора

Вывод от внешней зоны n_2 называют катодом, а от зоны p_1 – анодом. Зоны n_1 и p_2 носят название баз диодистора. Переход между зонами p_1 , n_1 и p_2 , n_2 именуют эмиттерным, а между зонами n_1 и p_2 – коллекторным переходом.

Если от источника питания к аноду диодистора приложим небольшое отрицательное напряжение, а к катоду положительное напряжение, то центральный коллекторный переход будет открыт, а крайние эмиттерные переходы станут закрыты. Зоны n_1 и p_2 не могут преодолеть, поступающие из анода и катода основные носители зарядов, а, следовательно, они не достигнут базы диодистора. В результате через диодистор течёт небольшой обратный ток, обусловленный неосновными носителями заряда, и диодистор закрыт. Если к аноду диодистора приложим очень большое отрицательное напряжение, а к катоду – высокое положительное напряжение, то произойдёт лавинный пробой, что видно на вольтамперной характеристике диодистора, показанной на рис. 7.2.

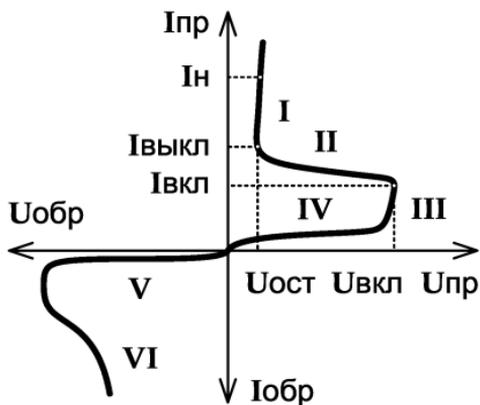


Рис. 7.2. ВАХ динистора

На рисунке обозначено:

I – участок открытого состояния динистора, на котором его проводимость высока;

II – участок отрицательного сопротивления;

III – участок пробоя коллекторного перехода;

IV – участок в прямом включении, на котором динистор заперт, и приложенное к его выводам напряжение меньше, чем необходимо для возникновения пробоя;

V – участок обратного включения динистора;

VI – участок лавинного пробоя.

Если от источника питания к аноду динистора приложим небольшое положительное напряжение, а к катоду незначительное отрицательное напряжение, то коллекторный переход будет закрыт, а эмиттерные переходы станут открыты. Носители зарядов поступают из области катода n_2 в зону p_2 (электроны), а из области анода p_1 в зону n_1 (дырки). В указанных зонах баз носители заряда уже станут неосновными, и в результате в этих зонах возникает рекомбинация носителей зарядов, и из-за неё концентрации свободных

носителей зарядов станут меньше. Поле коллекторного перехода будет ускоряющим для ставших неосновными носителей заряда, которые ввиду инжекции его преодолевают и оказываются в зонах, где они вновь будут основными. В областях p_1 и n_2 эти носители зарядов снова станут неосновными и вновь рекомбинируют. По причине рекомбинаций носителей зарядов проводимость динистора на участке IV мала и протекающий через него обратный ток также мал.

Если начать увеличивать постоянное напряжение, прикладываемое к динистору в прямом включении, то возрастает ширина коллекторного перехода и скорость носителей заряда, и становятся меньше интенсивности рекомбинаций, а прямой ток через динистор медленно возрастает. Чем больше будет прямое напряжение, тем интенсивнее станет ударная ионизация, порождающая новые носители заряда, что при определённом напряжении включения приведёт к лавинному пробоему коллекторного перехода. Пробой сопровождается резким увеличением проводимости динистора в прямом включении. Динистор открывается, и на нём будет падать небольшое остаточное напряжение.

Динисторы применяют в регуляторах и переключателях, чувствительных к изменениям напряжений.

7.3. Тринисторы

Тринистором, или, иначе, триодным тиристором, называют переключательный компонент с тремя электронно-дырочными переходами, и тремя выводами – анодом, катодом и управляющим электродом. Тринисторы обладают аналогичной динисторам структурой, а отличие состоит в наличии управляющего электрода – дополнительного вывода, подключённого к одной из баз. Если через управляющий электрод тринистора пропустить отпирающий ток, то тринистор перейдёт в открытое состояние. В зависимости от того, к какой именно из баз будет подсоединён управляющий электрод,

можно организовать включение тринистора при приложении отпирающего напряжения между управляющим электродом и либо анодом, либо катодом. Вольтамперная характеристика тринистора похожа на вольтамперную характеристику динистора. Однако отпирание тринистора обычно происходит при существенно более низком прямом напряжении, чем необходимо динистору, и к открыванию тринисторной структуры приводит протекание тока через управляющий электрод. Чем больше ток управляющего электрода, тем при более низком прямом напряжении тринистор перейдёт в открытое состояние, что отражено на вольтамперной характеристике тринистора, изображённой на рис. 7.3.

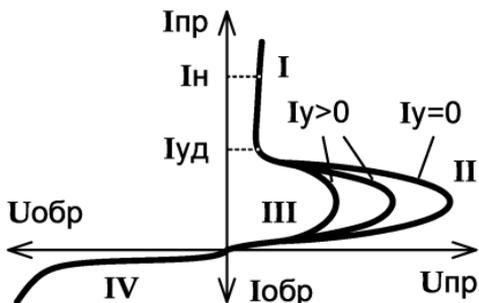


Рис. 7.3. ВАХ тринистора

На рисунке обозначено:

I – участок, на котором тринистор открыт;

II – участки отрицательного сопротивления и пробоя коллекторного перехода;

III – участок запертого состояния тринистора в прямом включении;

IV – участок обратного включения динистора.

Когда через управляющий электрод протекает отпирающий ток, возрастает скорость носителей заряда, которые инжектируются через коллекторный переход, что инициирует принудительное отпирание тринистора. После включения незапираемый тринистор

не реагирует на изменение силы тока управляющего электрода. Чтобы закрыть тринистор, необходимо уменьшить силу тока, протекающего по аноду и катоду, ниже тока удержания, либо поменять полярность напряжения, приложенного между анодом и катодом. Если управляющий электрод тринистора обесточен, то тринистор функционирует совершенно так же, как динистор [169, с. 78]. В незапираемых тринисторах управляющий электрод занимает небольшой участок кристалла полупроводника, ориентировочно в несколько процентов.

Тринисторы широко применяют в регуляторах мощности, контакторах, ключевых преобразователях и инверторах и пр. Некоторое ограничение на внедрение тринисторов накладывает их частичная управляемость.

7.4. Запираемые тиристоры

Запираемые тиристоры, в отличие от тринисторов, которые были рассмотрены ранее, – это полностью управляемые компоненты, и под воздействием тока управляющего электрода они могут переходить из закрытого состояния в открытое состояние, и наоборот. Чтобы выключить запираемый тиристор, нужно пропустить через управляющий электрод ток противоположной полярности, чем полярность, вызывавшая отпирание компонента. Для закрывания изначально открытого запираемого тиристора необходимо уменьшить сумму коэффициентов передачи эмиттерных токов ниже единицы и обеднить базы носителями зарядов, для чего управляющий электрод должен быть распределён по полупроводниковому кристаллу. Для этого управляющий электрод запираемого тиристора, как и катод, выполняют из множества однотипных ячеек, распределённых определённым образом по площади кристалла. Важным параметром рассматриваемых тиристоров выступает коэффициент запираения, кото-

рый равен отношению тока анода к необходимому для выключения компонента обратному току управляющего электрода.

Запираемые тиристоры обычно используют в преобразовательной технике в качестве электронных ключей.

7.5. Симисторы

Симисторы, в отличие от обычных тиристоров, проводят ток анод-катод при протекании тока по управляющему электроду, как в прямом направлении, так и в обратном. В результате этого их вольтамперная характеристика симметрична, что отражено на рис. 7.4.

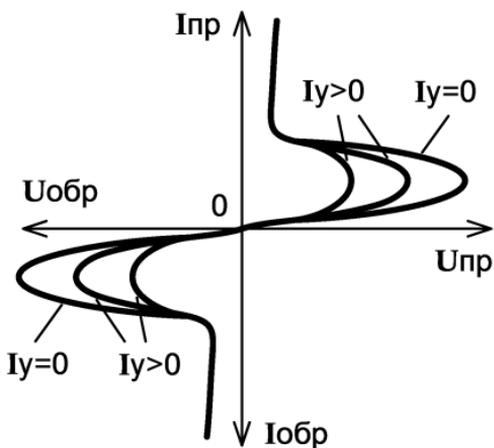


Рис. 7.4. ВАХ симистора

Таким образом, на вольтамперной характеристике каждого симистора присутствуют два участка отрицательного дифференциального сопротивления.

Структура симистора содержит пять слоёв, что показано на рис. 7.5.

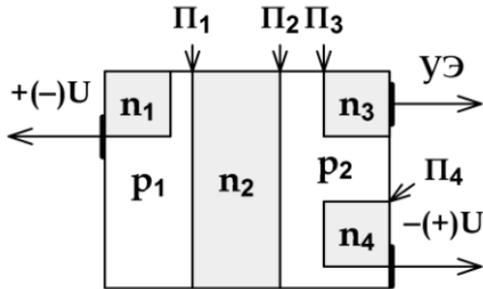


Рис. 7.5. Структура симистора

К управляющему электроду, который отведён от зоны n_3 , подсоединим вывод отрицательного напряжения, полученного от источника питания, относительно вывода от зон p_2, n_4 , в результате чего электроны из зоны n_3 инжектируют в зону p_2 . Кроме того, приложим напряжение от источника питания положительным полюсом к зонам p_1, n_1 , а отрицательным полюсом к зонам p_2, n_4 . Переходы Π_1 и Π_4 открыты, и играют роль эмиттерных переходов, а переход Π_2 закрыт и исполняет обязанности коллекторного перехода, и через симистор по выводам анод-катод протекает ток.

Теперь поменяем полярность и приложим напряжение отрицательным полюсом к зонам p_1, n_1 , а положительным полюсом к зонам p_2, n_4 . Переходы Π_1 и Π_4 закрыты, и переход Π_1 выполняет функции коллекторного перехода, а переход Π_2 открыт и служит коллекторным переходом, и через симистор и в этом случае по выводам анод-катод течёт ток.

Симисторы нашли широкое применение в устройствах регулирования скорости вращения электродвигателей, в системах освещения, в электронагревателях, в преобразовательных установках.

7.6. Фототиристоры

Фототиристором называют специальный тиристор, в корпусе которого (в случае дискретного исполнения) предусмотрено окно, при облучении которого световым потоком тиристор переходит в открытое состояние. При облучении всего полупроводникового кристалла, либо только участка между катодом и управляющим электродом тиристора под действием фотонов возникает фотогенерация носителей заряда, и чем интенсивнее будет световой поток, тем больше станет ток, протекающий по тиристоры. При достаточной освещённости ток через выводы анод-катод тиристора лавинообразно возрастает, что вызывает открывание тиристора. Длительность включения фототиристоров может достигать несколько микросекунд. Следует отметить, что спектр света, которым облучают полупроводниковую структуру, должен быть согласован с определённой длиной волны, к облучению которой фототиристор максимально чувствителен. Материалом фототиристоров, как и типовых тиристоров, обычно выступает кремний. Редко в качестве основного материала маломощных быстродействующих тиристоров выступает арсенид галлия.

Некоторые фототиристоры позволяют коммутировать токи силой до сотен ампер при напряжениях анод-катод в десятки киловольт и обеспечивают гальваническую развязку системы управления и исполнительной цепи. В результате между устройством управления и фототиристором не нужно включать дорогой, ненадёжный и крупногабаритный высоковольтный трансформатор, который был бы необходим для гальванической развязки обычного тиристора, включённого в цепь с высоким напряжением относительно земли.

7.7. Основные параметры тиристоров

К некоторым важнейшим параметрам тиристоров относят следующее:

- Амплитуда повторяющегося импульсного напряжения, которое прикладывают к закрытому тиристор, В.
- Длительность включения, т.е. такой отрезок времени, за который тиристор переходит в открытое состояние под действием импульса тока, протекающего по управляющему электроду, мс.
- Критическая скорость нарастания напряжения на закрытом тиристоре, т.е. значение такой максимальной скорости нарастания напряжения, которое не приведёт к отпирианию тиристора, dU/dt .
- Напряжение включения, т.е. такое напряжение, приложенное к диностору, при котором он переходит в открытое состояние, В.
- Напряжение переключения, т.е. приложенное к тиристоры напряжение во время переключения, В.
- Неповторяющийся ударный ток тиристора в открытом состоянии, т.е. предельно допустимый ток через открытый тиристор, который не вызовет выход компонента из строя при кратковременном воздействии, по завершении которого сила тока станет много меньше, А.
- Постоянный обратный ток, протекающий по выводам анод-катод тиристора в закрытом состоянии, мА.
- Предельно допустимая амплитуда импульсов тока, протекающего через выводы анод-катод открытого тиристора, А.
- Предельно допустимый постоянный ток через выводы анод-катод открытого тиристора, А.
- Ток запириания, т.е. такой ток, протекающий по управляющему электроду, который инициирует переход тиристора из открытого состояния в закрытое состояние, А.
- Ток удержания, т.е. минимальный ток такой силы, под действием которого тиристор не переходит в закрытое состояние, А.

8. Вакуумные и ионные компоненты

8.1. Общие сведения об электровакуумных приборах

Электровакуумные лампы были исторически первыми электронными приборами, которые позволяли вырабатывать, преобразовывать и усиливать сигналы.

Усилительной или генераторной электровакуумной лампой, называют компонент, протекание тока через который обусловлено движением заряженных частиц в вакууме, управление которым может быть организовано путём создания на их пути электрических полей. Работа электровакуумных ламп основана на явлении эмиссии, т.е. на вылете из материала в вакуум электронов. Различают термоэлектронную, автоэлектронную, фотоэлектронную и вторичную эмиссии. Термоэлектронная эмиссия состоит в покидании внешнего слоя раскалённого металла электронами. Автоэлектронная эмиссия заключена в испускании электронов из материала в сильном электрическом поле. Фотоэлектронная эмиссия обусловлена облучением вещества светом, причём спектр может быть видимым, ультрафиолетовым, инфракрасным и др. Вторичная эмиссия заключена в выбивании вторичных электронов из материала, который бомбардируют первичные частицы – электроны или ионы.

В настоящее время электронные лампы активно используют в тех специальных приборах и установках, где не могут работать полупроводниковые приборы – в условиях высокой радиации, очень широкого диапазона рабочих температур, при высокой вероятности появления мощных электромагнитных импульсов и другого. Некоторые электронные лампы, устанавливаемые в выходных усили-

тельных каскадах передатчиков, развивают мощность в 500 кВт и более.

8.2. Электровакуумные диоды

8.2.1. Конструкция и принцип действия электровакуумных диодов

Электровакуумным диодом называют электронную лампу, имеющую два основных электрода – анод и катод, обладающую свойством односторонней проводимости. Катод – это электрод, который раскалён до такой степени, что его поверхность покидают электроны и устремляются к аноду. Анод – это электрод, к которому внутри лампы прилетают заряженные частицы. Анод имеет чаще всего положительный потенциал. Для увеличения эффективности желательно отводить тепло от анода. Анод и катод электровакуумного диода помещают в баллон, который обычно выполняют из стекла или металла, с откачанным воздухом, причём вакуум составляет обычно от 10^{-3} Па до 10^{-8} Па.

Различают катоды двух разновидностей: с косвенным и с непосредственным накалом. Катод непосредственного, или, иначе, прямого накала, непосредственно подключаемый к источнику питания обычно постоянного тока, выполняют из проволоки с высокой температурой плавления, изготовленной обычно из молибдена, вольфрама и других металлов и сплавов. Эту проволоку внутри баллона размещают так, чтобы расстояние от любой её точки до поверхности катода было примерно одинаковым, и закрепляют на специальных держателях, именуемых траверсами. Масса катода непосредственного накала не велика и при попытке питания переменным током может возникнуть ситуация, при которой его пульсации будут при-

водить к циклическому изменению температуры катода, и, следовательно, паразитной флюктуации прямого тока, что недопустимо.

Катод косвенного накала, чаще всего изготавливаемый из никеля, имеет форму полого цилиндра. Внутри такого трубчатого катода размещена нить накала, изолированная термостойким веществом, например, Al_2O_3 . Масса катода косвенного накала больше, чем катода непосредственного накала, и пульсации тока в цепи накала не приведут к существенным флюктуациям его температуры. Поэтому катод косвенного накала допускает подключение нити накала к источнику питания переменного тока.

Подключим соответствующий источник питания к нити накала, к аноду подсоединим нагрузку и рассмотрим принцип действия электровакуумного диода. В прямом включении к катоду прикладывают напряжение отрицательной полярности, а к аноду – положительной. В лампе возникает электрическое поле, которое будет ускоряющим для электронов, пребывающих на поверхности катода, что принуждает их покинуть катод и лететь к аноду. В результате в цепи течёт прямой ток от анода к катоду.

В обратном включении к катоду подводят напряжение положительной полярности, а к аноду – отрицательной. Возникающее электрическое поле будет тормозящим для электронов катода, и заставляет электроны не покидать катод. Поэтому обратный ток не течёт.

8.2.2. Основные параметры и анодная характеристика электровакуумных диодов

Зависимость тока анода от напряжения анод-катод при фиксированной температуре катода или стабильном напряжении накала, называемая анодной характеристикой, выступает в качестве важнейшего показателя электровакуумных диодов. Типовая, резко нелинейная анодная характеристика электровакуумного диода дана на рис. 8.1.

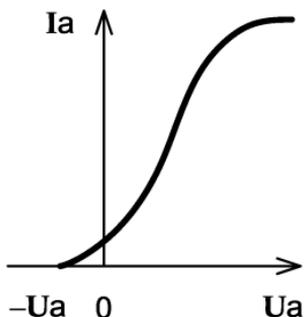


Рис. 8.1. Анодная характеристика электровакуумного диода

На ней можно выделить три участка. На отрицательном участке имеет место незначительное повышение тока анода в связи с тем, что электроны обладают достаточной энергией для того, чтобы покинуть разогретый катод. Затем, при увеличении анодного напряжения U_a , ток анода I_a возрастает по выражению $I_a = k \cdot U_a^{3/2}$, где k – это коэффициент, соответствующий конструкции и габаритам катода и анода. Затем, при большом напряжении анода, на анодной характеристике можно различить участок насыщения, когда сила тока анода замедляет рост из-за того, что почти все электроны покидают поверхность катода и устремляются к аноду.

Располагая анодной характеристикой и выбрав на ней почти линейный участок, можно определить крутизну характеристики электровакуумного диода как отношение приращения тока анода к приращению анодного напряжения (мА / В):

$$S = \Delta I_a / \Delta U_a.$$

Внутренним сопротивлением именуют отношение приращения анодного напряжения к приращению тока анода, Ом:

$$R_v = \Delta U_a / \Delta I_a = 1 / S.$$

Также важным параметром электровакуумных диодов следует считать максимально допустимое обратное напряжение, при кото-

ром не наступает пробой, зависящее от расстояния между электродами и их конфигурации.

Наибольшая мощность рассеяния – это максимальная мощность, не приводящая к выходу из строя электровакуумного прибора, которая может быть выделена на аноде. Её находят как произведение максимального анодного тока на максимальное анодное напряжение, Вт:

$$P_{a.\text{макс}} = I_{a.\text{макс}} \cdot U_{a.\text{макс}}$$

8.3. Триоды

8.3.1. Конструкция и принцип действия триодов

Триодом называют электронную лампу, в баллоне которой размещены три электрода: анод, катод, и сетка, причём сетка, расположенная между анодом и катодом, установлена гораздо ближе к катоду, чем к аноду. Сетка осуществляет функцию управляющего электрода. Её обычно изготавливают из вольфрамовой, никелевой или молибденовой проволоки, свитой в спираль вокруг катода. Между сеткой и катодом прикладывают напряжение, регулирующее движение электронов от катода к аноду, чем достигают управления триодом. Изучим, как это происходит, предположив, что к аноду триода подключена нагрузка, соединённая с положительным полюсом источника питания, а катод подключён с его отрицательному полюсу.

Если напряжение сетка-катод отсутствует, то ускоряющее электрическое поле анода устремляет электроны от катода к аноду сквозь сетку и по нагрузке протекает некоторый ток анода, на который наличие сетки не влияет.

Если на сетку будет подано небольшое напряжение положительной полярности относительно катода, то ускоряющее электрическое поле сетки будет совпадать с полем анода, что вызывает увеличение потока электронов, а, значит, и тока анода. Незначительную часть вылетевших с поверхности катода электронов задерживает сетка, что приводит к протеканию небольшого тока в цепи сетка-катод. Если отпирающее напряжение сетка-катод будет достаточно велико, то при дальнейшем увеличении этого напряжения почти все электроны, которые только могут быть источены в единицу времени катодом, участвуют в образовании всё медленнее растущего тока анода. Соответствующий этому случаю наибольший ток анода называют током насыщения.

Если к сетке будет приложено небольшое напряжение отрицательной полярности относительно катода, то тормозящее электрическое поле сетки будет противодействовать ускоряющему полю анода, что приводит к уменьшению потока электронов и снижению тока анода. При достаточно существенном запирающем напряжении сетка-катод, испускаемые катодом электроны будут оттеснены сильным тормозящим полем обратно к катоду, из-за чего ток анода будет отсутствовать. Напряжение сетка-катод, которое вызывает прекращение протекания тока анода, называют напряжением отсечки.

8.3.2. Основные характеристики и параметры триодов

Основными характеристиками триодов выступают семейства анодно-сеточных и анодных характеристик, получаемые при неизменном напряжении накала.

Анодно-сеточная характеристика – это зависимость анодного тока от напряжения, приложенного между сеткой и катодом при фиксированном анодном напряжении. Обычная анодно-сеточная характеристика триода показана на рис. 8.2.

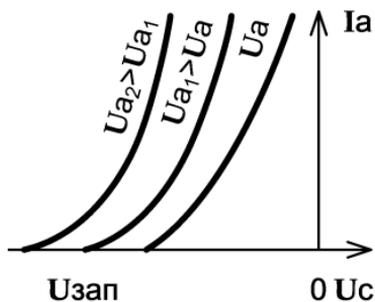


Рис. 8.2. Анодно-сеточная характеристика

Анодной характеристикой, снимаемой при фиксированном напряжении сетка-катод, называют зависимость анодного тока от анодного напряжения. Типовая анодная характеристика триода изображена на рис. 8.3.

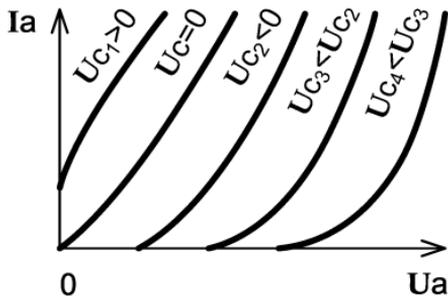


Рис. 8.3. Анодная характеристика

Важнейшими параметрами триодов выступают: внутреннее сопротивление, коэффициент усиления, проницаемость, крутизна характеристики, максимально допустимые мощность, анодные напряжение и ток, и прочее.

Внутреннее сопротивление триода – это отношение приращения анодного напряжения к приращению анодного тока при фиксированном напряжении сетка-катод (Ом):

$$R_v = \Delta U_a / \Delta I_a.$$

Обычно внутреннее сопротивление триодов лежит в пределах от десятых долей килоома до десятых долей мегома.

Коэффициент усиления триода – это отношение приращения напряжения анод-катод к приращению напряжения сетка-катод при неизменном анодном токе:

$$\mu = -\Delta U_a / \Delta U_c.$$

Коэффициент усиления зависит от расположения сетки в баллоне триода, и не зря она расположена значительно ближе к катоду, чем к аноду. Для обеспечения протекания определённого анодного тока необходимо приложить много меньшее напряжение сетка-катод, нежели напряжение анод-катод, что, собственно, и отражает величина коэффициента усиления. Обычно коэффициент усиления триодов мал и не превышает нескольких десятков, что относят к одному из крупных недостатков этих компонентов.

Проницаемостью называют обратный коэффициенту усиления параметр, то есть отношение приращений напряжений сетка-катод и анод-катод при фиксированном анодном токе:

$$D = -\Delta U_c / \Delta U_a = 1 / \mu.$$

Крутизна анодно-сеточной характеристики – это отношение приращения анодного тока к приращению напряжения сетка-катод при фиксированном напряжении анод-катод (мА / В):

$$S = \Delta I_a / \Delta U_c.$$

Следует отметить, что произведение внутреннего сопротивления, крутизны анодно-сеточной характеристики и проницаемости триода всегда строго равно единице:

$$R_v \cdot S \cdot D = (\Delta U_a / \Delta I_a) \cdot (\Delta I_a / \Delta U_c) \cdot (\Delta U_c / \Delta U_a) = R_v \cdot S / \mu = 1.$$

Другими словами, $\mu = R_v \cdot S$, что называют «основным уравнением» или «внутренним уравнением» компонента.

Электроды и выводы от них изолированы друг от друга, подобно конденсатору, слоем стекла баллона и вакуумом, в результате чего между всеми электродами триода присутствуют паразитные ёмкости. Ёмкость сетка-катод именуют входной, так как управляющее напряжение подают как раз между сеткой и катодом. Выходной сигнал получают между анодом и катодом, что стало причиной соответствующего обозначения выходной ёмкости. Между входом и выходом присутствует третья – самая пагубная паразитная ёмкость сетка-анод – называемая проходной.

Входная и выходная ёмкости шунтируют сигнал на высокой частоте, что снижает частотные свойства триодов, а проходная ёмкость может инициировать положительную обратную связь с выхода на вход, которая способна привести к автогенерации.

8.4. Тетроды

8.4.1. О тетрадах и влиянии экранирующих сеток на их параметры

Итак, к наиболее значительным недостаткам электровакуумных триодов относят низкий коэффициент усиления и относительно высокую проходную ёмкость, обычно достигающую нескольких единиц пикофарад. Чтобы минимизировать указанные недостатки, были разработаны лампы с двумя сетками – тетроды.

Тетродом называют электровакуумный компонент, который состоит из катода, экранирующей сетки, которую закрепляют в промежутке между управляющей сеткой и анодом. К выводу второй, экранирующей сетки, прикладывают постоянное напряжение положительной полярности, обычно составляющее 0,3 ... 0,8 от величины анодного напряжения. Напряжение экранирующей сетки не

должно иметь значительную переменную составляющую, и поэтому его часто снимают с выхода сглаживающего фильтра. На упрощённой принципиальной схеме рис. 8.4 показан усилительный каскад, выполненный на одном тетроде.

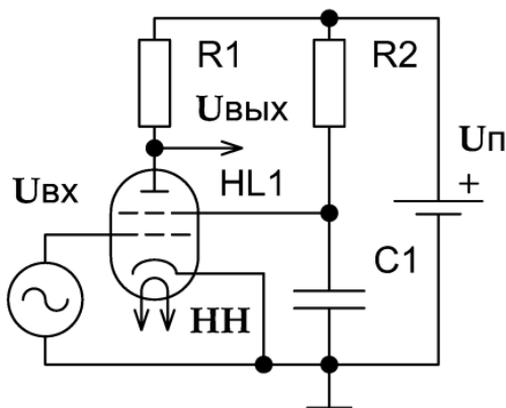


Рис. 8.4. Тетрод в усилительном каскаде

На рисунке обозначение R1 имеет нагрузка тетрода, которая включена в анодную цепь. По резистору R2 течёт постоянный ток экранирующей сетки, и на нём падает избыток напряжения. Конденсатор C1 шунтирует вывод экранирующей сетки, замыкая на общий провод переменную составляющую напряжения.

Экранирующая анод сетка более густа, нежели управляющая сетка, и минимизирует ускоряющее поле анода настолько, что даже при анодном напряжении в сотни вольт и отсутствии сеточного напряжения анодный ток тетрода не течёт. В результате флюктуации анодного напряжения, приводящие к изменениям поля экранированного анода, практически не оказывают воздействия на силу анодного тока. Экранирующая сетка приводит к увеличению коэффициента усиления лампы до многих сотен, повышению входного сопротивления и вызывает многократное снижение проходной ём-

кости, которая для микромощных тетродов достигает тысячных долей пикофарада, а для мощных – десятых долей пикофарада. Эти достоинства могли бы номинировать тетроды на звание замечательных электронных ламп, однако исключительно важный недостаток – динатронный эффект – объясняет крайне редкое применение тетродов рассмотренной конструкции в электронных усилителях. Также недостатком выступает необходимость применения двух и более компонентов в цепи питания экранирующей сетки.

8.4.2. Динатронный эффект

На рис. 8.5 отражена зависимость токов анода и второй экранирующей сетки тетродов от величины анодного напряжения.

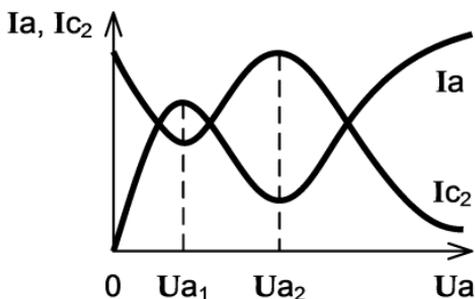


Рис. 8.5. Зависимости $I_a = f(U_a)$ и $I_{c_2} = f(U_a)$

Если анодное напряжение отсутствует, то электроны, получаемые в результате эмиссии, достигают экранной сетки и отдают ей свою энергию, вызывая протекание по ней тока наибольшей силы. Так как анод экранирован второй сеткой, то электроны не долетают до анода и анодный ток минимален.

Если подать некоторое напряжение анод-катод, то поле анода, устремляющее электроны к аноду, вызовет увеличение анодного тока и уменьшение тока экранной сетки. Если ещё увеличить посто-

янное напряжение анод-катод U_{a1} , которое будет меньше постоянного напряжения экранирующей сетки, то электроны, бомбардирующие анод, инициируют вторичную эмиссию, причём вторичные электроны летят к экранирующей сетке, как к электроду, обладающему наиболее высоким потенциалом. Вторичные электроны, покидающие анод, приводят к снижению его тока и росту тока экранирующей сетки. Это явление, вызванное вторичной эмиссией и порождающее значительные искажения сигнала, называют динаatronным эффектом, что графически отражено на рисунке в появлении впадины. При дальнейшем увеличении постоянного напряжения анод-катод U_{a2} , потенциал анода превысит потенциал экранирующей сетки, и вторичные электроны не станут покидать область анода, что приведёт к росту анодного тока и снижению тока экранирующей сетки.

Борьбу с динаatronным эффектом сводят либо к введению ещё одной – антидинаatronной сетки, соединённой с катодом, что реализовано в пентодах, либо к созданию узких лучей высокоплотных потоков электронов, направленных к аноду от катода, что организовано в лучевых тетрадах.

8.5. Лучевые тетроды

Лучевым тетродом называют такую разновидность тетрода, у которой в баллон лампы введены электрически подключённые к катоду образующие лучи пластины, напоминающие П-образные жёсткие лепестки, а число витков, шаг укладки и расположение экранирующей сетки такие же, как у управляющей сетки. На рис. 8.6 схематично изображено упрощённое устройство лучевого тетрода.

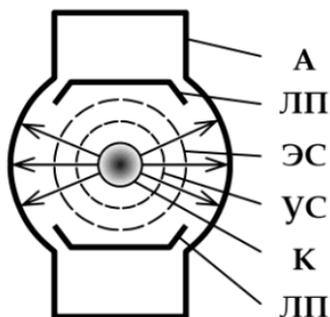


Рис. 8.6. Конструкция лучевого тетрода

На рисунке взаимное положение электродов дано без соблюдения пропорций, а буквами обозначено:

А – анод лампы;

К – катод тетрода;

УС – управляющая сетка;

ЭС – экранирующая сетка;

ЛП – образующие лучи пластины.

Благодаря указанному выше расположению сеток, электроны, отклоняемые управляющей сеткой, огибают витки экранирующей сетки, каждый из которых делит надвое поток электронов. Благодаря образующим лучи пластинам происходит смыкание потока электронов в узкие лучи, которые в результате попадания на поверхность анода образуют весомый отрицательный пространственный заряд, не позволяющий вторичным электронам покинуть область анода и лететь к экранирующей сетке. В результате принятых конструктивных мер динаatronный эффект почти отсутствует.

8.6. Пентоды

Пентодом именуют электронную лампу, в которой размещён катод, управляющая сетка, антидинатронная сетка, расположенная между анодом и экранирующей сеткой. Антидинатронную сетку часто электрически подключают к катоду, т.е. к общему проводу каскада, иногда прямо внутри электровакуумного прибора. Её обычно выполняют из проволоки, уложенной в редкую спираль. Так как анод обладает большим потенциалом по сравнению с антидинатронной сеткой, возникает электрическое поле, направленное от анода к антидинатронной сетке. Вторичные электроны, покинувшие анод и летящие к экранирующей сетке, под действием тормозящего электрического поля будут отеснены обратно к аноду, а, значит, в пентодах динатронный эффект совершенно отсутствует.

Наличие трёх сеток на пути потока электронов приводит к повышению КПД и возрастанию коэффициента усиления ламп обычно до нескольких тысяч, увеличению входного сопротивления до многих мегом. Кроме того, проходная ёмкость пентодов составляет от десятитысячных долей пикофарادا для микромощных приборов и до тысячных долей для мощных компонентов, что позволило значительно улучшить частотные свойства этих электронных ламп.

К наиболее существенному недостатку пентодов следует отнести повышенное выходное сопротивление, что затрудняет согласование каскада с нагрузкой.

8.7. Лампы бегущей волны

Лампа бегущей волны – это электровакуумный компонент, чья работа основана на преобразовании и передаче бегущей волне, распространение которой происходит с той же фазовой скоростью и в ту же сторону, что электроны в потоке, части энергии от этого потока. Лампы бегущей волны по направлению магнитного поля относи-

тельно траектории потока электронов подразделяют на устройства типа «М» и типа «О». В приборах типа «М» магнитное поле перпендикулярно потоку частиц, то есть электроны летят в скрещённых полях, а в компонентах типа «О» магнитное поле устремлено по пути распространения электронов [194, с. 109]. Упрощённая конструкция лампы бегущей волны типа «О» изображена на рис. 8.7.

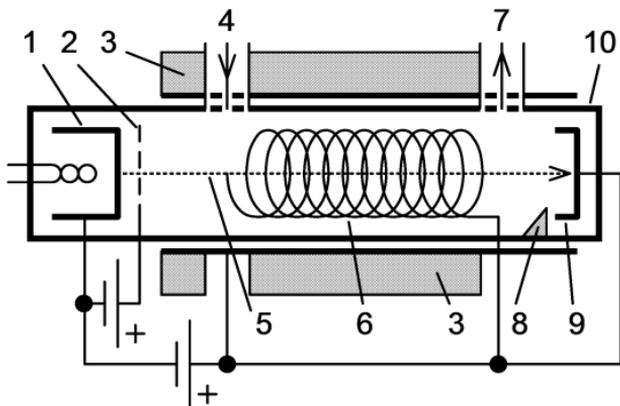


Рис. 8.7. Устройство лампы бегущей волны

На рисунке цифрами обозначено: 1 – катод, 2 – ускоряющий электрод, 3 – соленоид, 4 – вход, 5 – электронный поток, 6 – замедляющая система, 7 – выход, 8 – поглотитель, 9 – коллектор, 10 – баллон лампы.

Нить накала подключают к источнику питания накала, отчего катод косвенного накала испускает электроны, которые, летя к коллектору электронов, приобретают повышенную скорость благодаря действию ускоряющего электрода и поступают в замедляющую систему. Помимо разогнанных электронов, на вход спиралевидной замедляющей системы через согласующее устройство поступает подлежащий усилению СВЧ сигнал. Замедляющая система осуществляет торможение электронов, а постоянное магнитное поле внешнего

коаксиального соленоида реализует фокусировку потока электронов. Под действием тормозящего поля электроны теряют энергию, передаваемую бегущей волне, которая обладает такой же фазовой скоростью, как и скорость движения электронов, и распространение которой происходит в ту же сторону, что и направление потока электронов. Затем электроны попадают в коллектор, а усиленный СВЧ сигнал поступает на выход. Для предотвращения возвращения существенной части электронов, преодолевших замедляющую систему, обратно на вход лампы и возникновения самовозбуждения, недалеко от коллектора помещают поглотитель.

Лампы бегущей волны активно используют в СВЧ установках для усиления, преобразования и выработки сигналов. К важному преимуществу ламп бегущей волны следует отнести возможность функционирования в широкой полосе СВЧ. Промышленность выпускает лампы бегущей волны с непрерывной выходной мощностью от нескольких ватт до десятков киловатт.

8.8. Лампы обратной волны

Лампа обратной волны, или карсинотрон – это генераторный электровакуумный прибор, чей принцип действия состоит в видоизменении и передаче обратной волне, распространение которой происходит с той же фазовой скоростью, что электроны в потоке, части энергии потока. Простейшее устройство лампы обратной волны типа «О» дано на рис. 8.8.

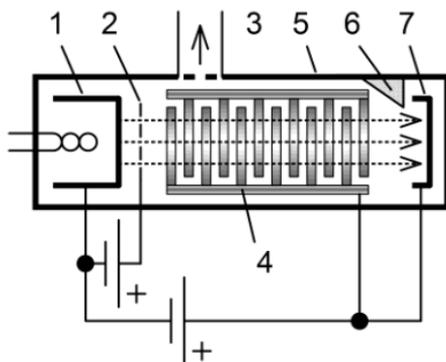


Рис. 8.8. Конструкция лампы обратной волны

На рисунке отмечено: 1 – катод, 2 – ускоряющий электрод, 3 – выход энергии, 4 – замедляющая система, 5 – баллон лампы, 6 – поглотитель, 7 – коллектор.

Покинувшие катод в результате эмиссии электроны благодаря действию ускоряющего электрода приобретают высокую скорость и влетают в замедляющую систему, обладающую периодическим строением. В замедляющей системе электроны передают часть энергии электромагнитному полю и утрачивают прежнюю скорость, причём достигают синхронизма обратной волны этого поля и потока электронов. Поток электронов, кроме того, выполняет функцию положительной обратной связи, благодаря чему в лампах обратной волны происходит автогенерация. Поглотитель, играющий роль согласованной нагрузки и потребителя прямых волн, необходим для предотвращения возврата весомой части электронов обратно к катоду, т.е. для предупреждения образования второй, уже паразитной, петли положительной обратной связи. Движение энергии направлено от коллектора к катоду, то есть в противоположную сторону относительно направления потока электронов, и напряжённость СВЧ поля у катода лампы будет наибольшей [194, с. 111]. Именно поэто-

му коаксиальный или волноводный выход лампы обратной волны расположен в непосредственной близости от катода.

Лампы обратной волны применяют всецело в качестве генераторов СВЧ сигналов. Непрерывная мощность, которую отдают в согласованную нагрузку специальные лампы обратной волны, составляет от долей ватта до десятков киловатт.

8.9. Пролётные клистроны

Клистрон – это электронная лампа, принцип действия которой заключён в модуляции электронов, образующих поток, по скоростям, с разделением их на группы, и передаче их энергий электромагнитной волне. Типовая конструкция пролётного клистрона с двумя резонаторами представлена на рис. 8.9.

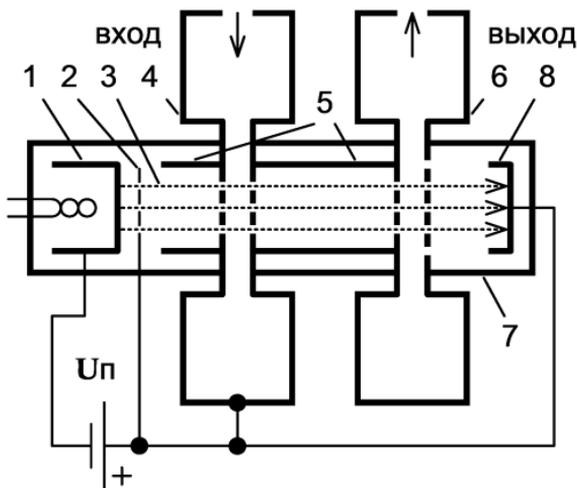


Рис. 8.9. Устройство пролётного клистрона

На рисунке обозначено: 1 – катод, 2 – ускоряющий электрод, 3 – электронный поток, 4 – входной резонатор, 5 – пролётная труба

дрейфа, 6 – выходной объёмный резонатор, 7 – баллон лампы, 8 – коллектор.

Упрощённо рассмотрим принцип действия двухрезонаторного пролётного клистрона, во входной резонатор которого поступает подлежащий усилению СВЧ сигнал с малой амплитудой. После подачи напряжения на нить накала и разогрева катода с его поверхности происходит эмиссия электронов. Поле ускоряющего электрода инициирует более быстрое движение потока электронов, которые влетают в зазор входного резонатора. Для группирования электронов необходимо, чтобы во входном резонаторе между сетками происходило образование переменного электрического поля. При этом часть электронов в один полупериод теряет скорость, а другая часть за второй полупериод, наоборот, её увеличивает. Затем электроны, после кратковременного пребывания во входном резонаторе и модуляции по скоростям, поступают в пролётную трубу. В ней на электроны не действуют электрические поля [194, с. 107], а имеет место модуляция по плотностям, в результате чего происходят сплочения электронов в группы. Из пролётной трубы сгруппированные электроны попадают в выходной резонатор и, преодолевая его сетки, передают его электромагнитному полю весомую часть запасённой кинетической энергии. Второй резонатор отдаёт СВЧ сигнал нагрузке, а потерявшие часть энергии отработанные электроны поглощает коллектор. При этом для передачи наибольшей энергии должны совпадать резонансная частота выходного резонатора и частота сгруппированных электронов потока. Электромагнитная волна, отдаваемая в нагрузку, будет обладать такой же частотой, но много большей амплитудой, чем СВЧ сигнал, поступающий во входной резонатор.

Типовой КПД двухрезонаторных пролётных клистронов – менее 20%, а для повышения КПД необходимо применять многорезонаторные клистроны. Клистроны используют в устройствах усиления, и, реже, генерации СВЧ сигналов. Основное достоинство пролётных

клизотронов состоит в высокой стабильности частоты выходного СВЧ сигнала. Именно поэтому их применяют в когерентных системах для космических исследований. Мощность, отдаваемая в согласованную нагрузку, отдельными разновидностями пролётных клизотронов в непрерывном режиме достигает сотен киловатт, а в импульсном – десятков мегаватт.

8.10. Магнетроны

Магнетроном называют помещённую в постоянное магнитное поле генераторную электровакуумную лампу на скрещённых электрических и магнитных полях, в которых летящие по циклоиде электроны, получаемые в результате эмиссии, отдают при замедлении движения энергию СВЧ полю. Типовое устройство магнетрона с резонаторами щель-отверстие приведено на рис. 8.10.

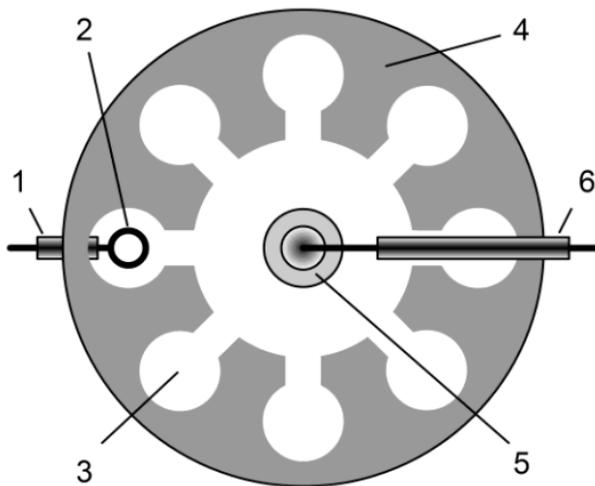


Рис. 8.10. Конструкция магнетрона

На рисунке обозначено: 1 – выход СВЧ сигнала, 2 – металлическая петля связи, 3 – один из полых резонаторов, 4 – анодный блок, 5 – катод косвенного накала и размещённая внутри него нить накала (её выводы условно не показаны), 6 – вывод катода. Анодный блок может быть выполнен из меди, тантала, молибдена или никеля. Нить накала часто изготавливают из вольфрама, а катод трубчатой формы – из никеля.

Принцип действия магнетрона указанной конструкции таков. В результате нагрева катода нитью накала с его цилиндрической поверхности происходит эмиссия электронов, которые устремлены к анодному блоку. Если бы автогенерация отсутствовала, то благодаря постоянному магнитному полю, образованному сильным магнитом или электромагнитом, электроны летели бы по спиралевидным циклоидальным траекториям от катода к аноду. Из-за наличия некоторых неоднородностей в распределении потока электронов и других факторов возникает электромагнитная волна, которая взаимодействует с электронами потока. Эффективность взаимодействия увеличивает единая колебательная система, образованная резонаторами анодного блока. Если электроны тормозит электромагнитная волна, они передают ей свою энергию, а сами будут поглощены анодным блоком, причём взаимодействие происходит длительно – от эмиссии электронов до их попадания на поверхность анода. А если, наоборот, электромагнитная волна будет оказывать на электроны ускоряющее действие, то траектория их полёта будет отклонена к катоду. Бомбардировка катода вернувшимися электронами может привести к вторичной эмиссии. Параметры возникающих СВЧ колебаний зависят от напряжённости поля, от постоянного напряжения анод-катод и прочих факторов [194, с. 112]. В случае соблюдения условия синхронизма между скоростями потока электронов и электромагнитной волны электроны длительное время отдают ей свою энергию. Следовательно, эффективность такого режима работы магнетрона будет велика. При этом тормозящее СВЧ

поле вынуждает электроны образовывать группы, называемые «спицами», и вращать эти сгущения вокруг катода. Чтобы все резонаторы вырабатывали согласованные колебания, их соединяют друг с другом определённым образом отрезками металлической проволоки, которые именуют «связками», или изготавливают резонаторы различных чередующихся конфигураций.

Магнетроны используют в качестве генераторов СВЧ колебаний. КПД некоторых специальных магнетронов весьма велик, хотя и не превышает 80% для самых экономичных приборов. Выходная мощность магнетронов в непрерывном режиме может достигать многих сотен киловатт, а в импульсном – десятков, или даже сотен мегаватт. Разновидностей и модификаций магнетронов довольно много – это амплитроны, гелитроны, дематроны, инжектроны, карматроны, митроны, стабилотроны, спиратроны, турбатроны и другие. При необходимости пытливым читателем можно найти сведения о них в специальной литературе.

8.11. Мазеры

Мазером называют рукотворный квантовый генератор, который вырабатывает или усиливает когерентные радиоволны СВЧ диапазона. Первый мазер на аммиаке, формирующий радиоволны сантиметрового диапазона, был создан в 1954 году. Под воздействием накачки атомы вещества приобретают возбуждённое состояние. При этом они получают избыток энергии и переходят на более высокий энергетический уровень. Под воздействием индуцирующего излучения высвобождение нескольких квантов энергии приводит к лавинообразному переходу атомов вещества на более низкий энергетический уровень и массовому испусканию индуцированных квантов энергии. Затем процесс повторяется. В мазерах, в отличие от лазеров, переход атомов на более низкий энергетический уровень в резонансной системе, охваченной положительной обратной связью,

сопровождается генерацией радиоволн, а не светового излучения. Частота генерируемых радиоволн чрезвычайно стабильна, что позволяет использовать мазеры в качестве атомных часов. Некоторые специальные модификации мазеров позволяют усиливать сигналы с малым уровнем шумов.

Первые мазеры были разработаны в 1953 – 1954 годах Александром Михайловичем Прохоровым совместно с его аспирантом Николаем Геннадиевичем Басовым в СССР и независимо от них Чарльзом Хардом Таунсом из Массачусетского технологического института совместно с аспирантами Колумбийского университета в США. Всем троим в 1964 году вручили Нобелевскую премию в области физики.

8.12. Тиратроны

Тиратроны – это газоразрядные электронные лампы, имеющие три вывода – анод, катод и управляющую сетку, используемые в качестве управляемых разрядников. Баллоны тиратронов с холодным катодом заполняют смесью газов – неона и аргона. Между анодом и катодом монтируют управляющую сетку. В баллоне тиратрона электроды управляющей сетки и катода располагают на таком расстоянии, чтобы разряд происходил при подаче на управляющую сетку меньшего напряжения, чем напряжение, приложенное к выводам анод-катод. Анод обычно имеет форму стержня большого сечения, который пронизывает баллон тиратрона и выступает наружу. Управляющая сетка имеет вид диска, а катод – цилиндра. При приложении импульса отпирающего напряжения между управляющей сеткой и катодом, в этом участке баллона тиратрона возникает ионизация газа. Благодаря этому промежуток между анодом и катодом будет наполнен ионами и электронами, из-за чего от анода к катоду течёт электрический ток. Для перевода тиратрона в открытое состояние по управляющей сетке протекает ток, многократно мень-

ший тока через выводы анод-катод. Вокруг управляющей сетки после перехода тиратрона в открытое состояние возникает облако положительно заряженных ионов, которые блокируют действие поданного на сетку сигнала. После включения тиратрона управлять анодным током невозможно, а чтобы выключить тиратрон, необходимо снять напряжение, приложенное к выводам анод-катод, или уменьшить его ниже определённого предела [39, с. 85]. После выключения газ в тиратроне возвращается в исходное состояние, после чего компонент вновь готов к работе.

Маломощные тиратроны ныне не используют в бытовой аппаратуре, а в специальной аппаратуре, которую эксплуатируют в условиях высокой радиации, применяют особые лампы, подобные тиратронам, с глубоким вакуумом в колбах. Мощные тиратроны, допускающие ток анода ориентировочно 5 кА ... 15 кА и напряжения анод-катод 25 кВ ... 75 кВ применяют для подачи импульсов на магнетроны, модуляторы и пр. Такие тиратроны до сих пор не вытеснены IGBT, и тем более MOSFET, из-за того, что сложно и очень дорого создавать полупроводниковые кристаллы, выдерживающие столь высокие напряжения и большие токи. Для многократной коммутации токов анодов силой 50 кА ... 500 кА и напряжений анод-катод 50 кВ ... 200 кВ используют тригатроны.

8.13. Крайтроны и спрайтроны

Крайтроны – это ионные (газоразрядные) малогабаритные электронные лампы с холодным катодом, которые применяют в качестве управляемых разрядников, имеющие четыре вывода – анод, катод, управляющую сетку и вывод предварительного зажигания (по-английски keep-alive). Стеклоянные, металлостеклянные или металлокерамические корпуса крайтронов заполняют газом (обычно криптон) под низким давлением примерно от 50 до 1000 кН / м². Конструкция крайтронов похожа на конструкцию тиратронов, а

особенность заключена в наличии электрода предварительного зажигания, который размещают рядом с катодом. На вывод предварительного зажигания всё время подают постоянное напряжение, величиной примерно от 0,4 кВ до 5 кВ, для начальной ионизации промежутка между этим выводом и катодом крайтрона. При этом ток через вывод предварительного зажигания не велик и составляет ориентировочно от 50 мкА (для крайтронов KN-2, KN-6, KN-6B, KN-9) до 0,3 мА (для крайтрона KN-22). Между выводами анод-катод крайтрона прикладывают постоянное напряжение примерно от 200 В до нескольких киловольт. Ток через электроды анод-катод не потечёт до тех пор, пока на сетку не будет подан отпирающий сигнал, который приводит к триггерному включению крайтрона, а управлять величиной тока анода, меняя величину отпирающего напряжения, не выйдет. При подаче отпирающего напряжения, которое получают, например, со специального импульсного трансформатора, величиной примерно 750 В крайтрон чрезвычайно быстро – обычно менее чем за 30 нс – переходит в открытое состояние, что гораздо быстрее (на 3 ... 5 порядков), чем тиратроны, и это легко объяснить наличием предварительной ионизации. Увеличив отпирающее напряжение сетки примерно до 2 кВ (если это разрешено техническими характеристиками), получим меньшую длительность включения крайтрона, которая может составить ориентировочно 5 нс. Максимальный ток анод-катод крайтронов марки KN-6 достигает 3 кА, а крайтронов марки KN-22 – лишь 100 А. Крайтроны обычно коммутируют нагрузку с частотой до 50 Гц, а для увеличения максимально допустимой частоты применяют многоотсекковые крайтроны. Чтобы выключить крайтрон, необходимо либо уменьшить напряжение между анодом и катодом ниже определённого уровня, либо полностью снять это напряжение. Внутри некоторых крайтронов (для аппаратуры военного назначения), между электродами предварительного зажигания и катодами, закрепляют радиоактивный материал, обычно Ni-63, который служит для дополнитель-

ной ионизации, что увеличивает и без того очень высокую надёжность крайтронов. Часто этот радиоактивный материал (источник β -излучения) монтируют прямо на нерабочий участок электрода предварительного зажигания. Однако число циклов включений и отключений таких крайтронов обычно не велико и составляет всего несколько сотен (крайтроны в системах детонации ядерных зарядов срабатывают лишь один раз). В то же время число циклов включений и отключений крайтронов, используемых в копировальных аппаратах, может составлять до 10^7 раз. Крайтроны используют в системах детонации ядерного оружия (это их изначальное применение), для включения мощных оптических излучателей, а также в некоторых ракетах и пр. Крайтроны в импульсе способны коммутировать мощность до 7 МВт и даже больше. Современные полупроводниковые приборы – MOSFET и, особенно, IGBT не могут так же быстро, как крайтроны, коммутировать столь большую мощность.

К достоинствам крайтронов причисляют:

- высокое быстродействие,
- чрезвычайно скорую готовность к работе (в течение длительности времени обычно менее 5 нс),
- отсутствие необходимости подогрева,
- простоту конструкции,
- малые массу и габариты,
- возможность работы в очень широких диапазонах температур и вибраций и прочее.

К недостаткам крайтронов нужно отнести, прежде всего, вероятность самопроизвольного срабатывания в условиях высокой радиации.

В условиях высокой проникающей радиации успешно работают спрайтроны, которые похожи на крайтроны, но в отличие от них не имеют выводов предварительного зажигания. При производстве из спрайтронов тщательно откачивают воздух, получая глубокий вакуум, что также относим к отличиям. Расстояние между анодом и

катодом в колбе должно быть больше, чем необходимо для возникновения разряда и самопроизвольного включения спрайтрона. Напряжение, которое подают на сетку спрайтрона, более высоко, чем необходимо для включения крайтрона. Подав напряжение на сетку спрайтрона, его переводят в открытое состояние: возникают свободные электроны и между анодом и катодом возникает электрическая дуга, отчего материалы электродов частично испаряются и вещества, из которых они состоят, участвуют в поддержании спрайтрона включённым. Спрайтроны используют для детонации ядерных боезарядов в условиях высокой радиации. В данной области полупроводниковые приборы не могут представлять сколь либо существенную альтернативу спрайтронам, так как не только проигрывают в быстродействии при коммутации мощности в несколько мегаватт, но и в условиях радиации чрезвычайно быстро выходят из строя.

9. Введение в микроэлектронику

9.1. Интегральные микросхемы

Микроэлектроника – это одно из направлений электроники, которое призвано создать миниатюрную высоконадёжную аппаратуру с малой потребляемой мощностью, низкой стоимостью и прочим.

Интегральной микросхемой, или сокращённо ИМС, называют монолитное изделие, предназначенное для исполнения функций заданного каскада или целой системы, компоненты которого соединены между собой определённым образом, и которые нельзя отделить один от другого демонтажными операциями. Различают аналоговые микросхемы, которые непрерывно отслеживают и воздействуют на сигнал, и цифровые микросхемы, которые дискретно преобразуют и обрабатывают информацию. Микросхемы классифицируют по степени интеграции, которая равна логарифму от числа деталей n , размещённых в одной ИМС: $k = \ln n$. По методу получения различают три вида ИМС: плёночные, полупроводниковые и гибридные.

В плёночных ИМС детали и соединения осуществляют путём получения плёнок малой толщины с различными свойствами, выполненных на подложке из не проводящего электрический ток материала. Плёночные микросхемы разделяют на две группы: на тонкоплёночные с толщиной плёнки менее 1 мкм и толстоплёночные с большей толщиной, часто составляющей порядка 20 мкм. Различие тонкоплёночных и толстоплёночных ИМС заключено не только в количественной толщине плёнок, но прежде всего в технологии их нанесения.

В полупроводниковых ИМС детали и соединения образованы специальными технологическими методами в кристалле полупро-

водника. Совмещённой называют такую полупроводниковую ИМС, в которой одна часть деталей выполнена методом тонкоплёночной, а другая часть – методом полупроводниковой технологии.

В гибридных ИМС, сокращённо называемых ГИС, резисторы и некоторые другие пассивные компоненты получают на диэлектрической подложке методом тонкоплёночной технологии, а дискретные бескорпусные активные компоненты располагают рядом на подложке и соединяют проволокой с контактными площадками.

9.2. Плёночные микросхемы

Подложки плёночных микросхем, которые изготавливают из сапфира, ситаллов, керамик и прочего, всегда обладают прямоугольной конфигурацией и толщиной порядка от 0,2 мм до 1 мм. Подложки не должны вступать в химические реакции с материалами плёнок, обязаны обладать низкой степенью шероховатости поверхности, должны обладать высоким электрическим сопротивлением. Нанесение плёнок на подложку осуществляют через трафарет, называемый маской. Выполнение плёночных конденсаторов и особенно катушек индуктивности по очень весомым причинам не рекомендуют, однако в отдельных случаях без них всё же не обойтись.

Толстоплёночные контактные площадки выполняют, например, вжиганием паст, содержащих алюминий, медь, тантал или в редких случаях золото. Чтобы улучшить адгезию металлических покрытий к подложке, на ней сначала формируют промежуточный слой никеля, который обладает лучшей адгезией, чем другие металлы, а уже на этот слой наносят требуемый материал.

Плёночные резисторы, которые выполняют нанесением на подложку паст, содержащих никель, керметы, тантал, хром и т.д. со связующим веществом, имеют прямоугольную конфигурацию. С целью повышения сопротивления резистора его выполняют в виде соединённых друг с другом многочисленных элементарных одина-

ковых участков Г-образной или П-образной конфигурации, которые повторяют до тех пор, пока не будет получено необходимое сопротивление, что показано на рис. 9.1.



Рис. 9.1. Плёночный резистор

Обычно сопротивление такого плёночного резистора может составлять от 0,05 кОм до 50 кОм [145, с. 325], а получить много большее или много меньшее сопротивление затруднительно.

Плёночные конденсаторы имеют многослойную структуру и в общем случае образованы двумя электропроводящими плёнками, между которыми выполняют слой диэлектрической плёнки. Обкладки плёночных конденсаторов изготавливают из электропроводящих плёнок, содержащих алюминий, тантал, серебро, медь и подобные материалы. Диэлектрическую плёнку обычно получают из различных оксидов: окиси тантала, трёхсернистой сурьмы, двуокиси кремния, монооксида германия и пр. Ёмкость плёночных конденсаторов обычно составляет от 10 пФ до 20 нФ.

Плёночные катушки индуктивности имеют спиралевидную форму, что изображено на рис. 9.2, и образованы нанесением токопроводящих плёнок на поверхность подложки.

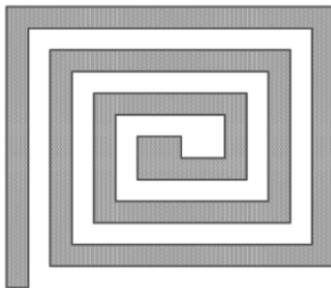


Рис. 9.2. Плёночная катушка индуктивности

Индуктивность таких плёночных катушек не превышает 10 мкГн [145, с. 326].

Изготовление активных компонентов наложением плёнок вызывает большие трудности.

9.3. Гибридные интегральные микросхемы

Обычно на диэлектрической подложке ГИС создают сугубо пассивные детали, например, постоянные резисторы. Активные дискретные компоненты, разработанные для использования в ГИС, не имеют корпусов, а для защиты от пагубного воздействия окружающей среды их покрывают капельками лака или компаунда. Транспортировку активных компонентов осуществляют в специальных контейнерах. Контактные площадки, созданные на подложке ГИС, необходимы для обеспечения взаимных соединений плёночных деталей, а также для подключений тонких проводников, которые осуществляют электрические контакты между тонкоплёночными и внешними дискретными компонентами. Активные компоненты, которые подключают к контактным площадкам, выполняют с жёсткими или с гибкими выводами. Детали с жёсткими выводами наиболее удобны для автоматической сборки ГИС, однако разработка таких изделий

связана с определёнными трудностями. Конденсаторы с ёмкостью более 20 нФ и катушки индуктивности обычно не выполняют на подложке ГИС, а задействуют как навесные компоненты. В больших ГИС – сокращённо БГИС – в качестве внешних деталей применяют бескорпусные полупроводниковые микросхемы [150, с. 18]. Соединение компонентов ГИС с выводами корпуса осуществляют пайкой, микросваркой и т.п.

9.4. Полупроводниковые микросхемы

Подложки полупроводниковых микросхем обычно выполняют из монокристаллического кремния р-типа. Изготовление электронно-дырочных переходов полупроводниковых ИМС осуществляют обычно посредством эпитаксиального наращивания или способом диффузионно-планарной технологии. Планарная технология подразумевает создание деталей и электрических соединений в подложке в одной плоскости [145, с. 329]. Эпитаксиальное наращивание заключается в напылении разогретого полупроводника на некоторые участки поверхности подложки. Диффузионная технология состоит в проникновении разогретых газообразных примесей в отведённые для этого участки подложки. В результате возникают многослойные образования, каждый слой которых обладает заданным типом проводимости. Резисторы, конденсаторы и прочие пассивные компоненты полупроводниковых ИМС обладают много большими габаритами, чем активные компоненты, такие как транзисторы. С целью минимизации размеров диоды в полупроводниковых ИМС предпочитают заменять транзисторами в диодном включении.

10. Устройства отображения информации

10.1. Индикаторы

Для воспроизведения мнемонических символов, букв и цифр используют буквенно-цифровые индикаторы. Единичным называют индикатор, который отражает один символ или одну цифру. Одно-разрядным называют индикатор, у которого выводы всех излучателей света не соединены друг с другом и выведены из корпуса для подключения к устройству управления. Сегментным называют индикатор, состоящий из нескольких излучателей, в котором отображение одного знака или символа обеспечивает один источник света. Матричным называют индикатор, внутри которого выводы излучателей света объединены определённым образом в матрицу, а подавая питание на определённую строку и столбец, инициируют свечение заданной ячейки. К важнейшим параметрам индикаторов относят угол обзора, число цветов, яркость, разрешение по горизонтали и вертикали, контрастность, потребляемую мощность, время отклика и прочее.

10.1.1. Светодиодные индикаторы

Светодиодные индикаторы выполняют из ряда размещённых определённым образом отдельных светодиодов. Подавая питание на некоторые полупроводниковые кристаллы светодиодных структур индикатора, получают излучение нужных светодиодов. Оно попадает непосредственно на прозрачный участок корпуса индикатора, или сначала на отражатели, свечение которых имеет вид знака или сим-

вола. Для питания светодиодных индикаторов необходимо постоянное напряжение от 1,6 до 3,5 В. Чтобы получить нужный цвет свечения, применяют светодиоды, генерирующие свет с необходимой длиной волны, или прежде чем выпустить из корпуса излучённый свет, пропускают через светофильтр.

Достоинства светодиодных индикаторов состоят в чёткой форме символов и знаков, в низком напряжении питания, в небольшой потребляемой мощности.

Недостаток заключён в малой яркости и довольно большом потребляемом токе.

10.1.2. Жидкокристаллические индикаторы

Жидкие кристаллы – это вещества, молекулы которых обладают высокой подвижностью, и склонны к упорядоченной ориентации в электрическом поле. Удельное сопротивление жидких кристаллов велико и достигает от 10^6 до 10^{11} Ом. При комнатной температуре в отсутствие электрического поля ориентация молекул жидких кристаллов хаотична, ввиду чего вещество не прозрачно. При возникновении электрического поля происходит упорядочивание молекул, и в результате вещество становится оптически прозрачно.

Схематичное изображение в разрезе жидкокристаллического индикатора (или LED), работающего на отражение, дано на рис. 10.1.

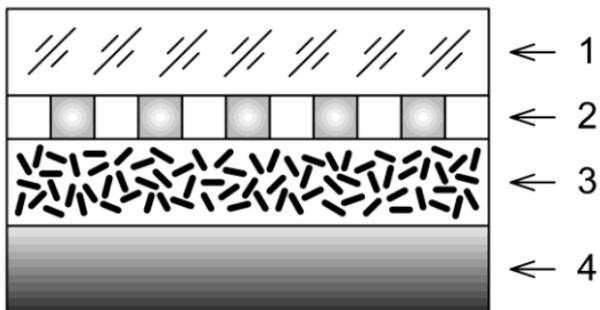


Рис. 10.1. Упрощённая конструкция жидкокристаллического индикатора

На рисунке цифрами обозначено:

- 1 – стекло или подобный прозрачный материал;
- 2 – плёнки прозрачных электродов, образующих матрицу;
- 3 – жидкие кристаллы;
- 4 – металлическая поверхность.

Прозрачный электрод изготавливают в форме цифр или символов, в соответствии с тем, какое изображение желают получить. Между токопроводящими плёнками нужных в данный момент прозрачных электродов и металлическим основанием подсоединяют генератор, вырабатывающий переменное напряжение амплитудой от 2 до 15 В и частотой от десятков до тысяч герц.

Достоинства жидкокристаллических индикаторов заключено в чрезвычайно низком энергопотреблении и невысоком питающем напряжении.

Недостатки состоят в малом времени наработки на отказ, в обязательном наличии источника внешнего освещения.

10.2. Общие сведения об электронно-лучевых трубках

Электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ) называют вакуумную электронную лампу, в которой поток электронов концентрируют в луч, направленный в сторону экрана. Обычно концентрацию (фокусировку) электронов в луч осуществляют либо воздействием электрического поля, либо магнитного поля. К разновидностям ЭЛТ относят: электромагнитные, электростатические, запоминающие, индикаторные трубки, кинескопы и прочие. ЭЛТ с электростатической фокусировкой используют в осциллографах в качестве устройства отображения осциллограмм.

Рассмотрим принцип действия электростатической электронно-лучевой трубки. Упрощённое устройство и подключение электронно-лучевой трубки с электростатическим управлением дано на рис. 10.2.

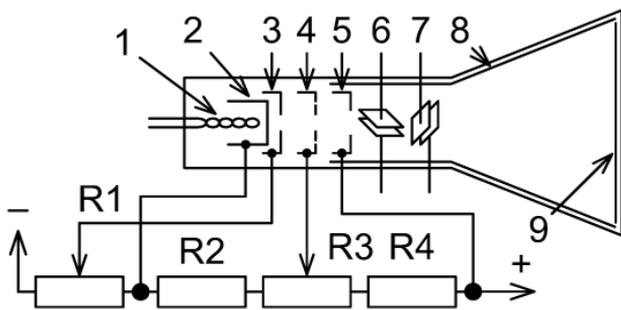


Рис. 10.2. Электронно-лучевая трубка

На рисунке цифрами отмечено: 1 – нить накала; 2 – катод; 3 – модулятор; 4 и 5 – первый и второй аноды; 6 и 7 – пластины отклонения луча вдоль осей Y и X; 8 – аквадаг; 9 – экран трубки. Резистор R1 служит для коррекции яркости изображения, а резистор R3 – для регулировки его фокуса.

Электронно-лучевая трубка состоит из трёх важнейших частей – электронной пушки, системы отклонения луча и экрана.

Электронная пушка включает нить накала, разогревающую никелевый катод, испускающий в результате эмиссии электроны, которые собирает в луч модулятор, состоящий из металлического цилиндра с маленьким отверстием в центре одного из торцов.

Чтобы разогнать электроны до необходимой скорости, используют систему из двух анодов. На второй анод подают много большее напряжение (от единиц до десятков киловольт), чем на первый анод (сотни вольт). Кроме увеличения скорости потока электронов, аноды осуществляют некоторую его фокусировку, действуя как электростатическая линза. Затем электронный луч проходит между пластинами вертикального и горизонтального отклонения луча. Если приложить постоянное напряжение к одной из систем платин, то поток электронов будет смещён в сторону той пластины, к которой был подсоединён положительный полюс питания.

Внутреннюю поверхность экрана, выполненного из стекла, покрывают люминофором, т.е. веществом, попадая в которое электроны выбивают кванты света. Аквадагом именуют электропроводящее покрытие графитом поверхности колбы ЭЛТ, которое электрически подсоединяют ко второму аноду с целью поглощения вторичных электронов, которые возникают при достижении электронным лучом люминофора.

В ЭЛТ с электромагнитным управлением электронный поток фокусируют не пластины горизонтального и вертикального отклонения луча, а фокусирующая и отклоняющая катушки, которые надевают на колбу трубки, порождающие взаимно перпендикулярные магнитные потоки. Аноды при электромагнитном управлении лучом служат исключительно для его ускорения.

В настоящее время электронно-лучевые трубки практически полностью вытеснены из бытовой аппаратуры. Однако их продолжают использовать в специальной аппаратуре, например, которая

должна работать в условиях радиации, а также это могут быть радиолокаторы, системы наблюдения за промышленными роботами и др.

10.3. Жидкокристаллические дисплеи и панели

10.3.1. Общие сведения о жидкокристаллических дисплеях

Жидкокристаллические (LCD) дисплеи обладают таким же свето-клапанным принципом действия, как и рассмотренные выше жидкокристаллические индикаторы. Они могут работать либо на отражение, либо на просвет. Жидкие кристаллы можно отнести к одному из трёх видов: смектическим, нематическим или холестерическим.

Смектические жидкие кристаллы формируют слои, в которых молекулы имеют упорядоченное положение.

Нематические жидкие кристаллы обладают хаотичным расположением молекул и непрозрачным для проходящего света дисплеем лишь до тех пор, пока молекулы не будут помещены в электрическое поле. Нематические жидкие кристаллы нашли широкое применение в одноцветных индикаторах и чёрно-белых дисплеях.

Холестерические жидкие кристаллы под воздействием электрического поля формируют слои, в которых молекулы смещены на один и тот же угол в пространстве. Это обстоятельство позволяет при наличии источника белого света получать цветное изображение на экране дисплея. Таким образом, в цветных жидкокристаллических дисплеях применяют холестерические жидкие кристаллы.

По причине того, что жидкие кристаллы не генерируют фотоны, для регистрации изображения необходим внешний источник освещения. Его располагают либо за жидкокристаллическим дисплеем, либо перед ним, и тогда обычно можно полагать, что он работает на

просвет, либо сбоку дисплея, и в этом случае иногда допустимо считать, что дисплей работает на отражение. Если по конструктивным соображениям источник света размещён сбоку от дисплея, то благодаря системе зеркал излучение попадает на его рабочую зону.

10.3.2. Электролюминесцентная подсветка жидкокристаллических дисплеев

Электролюминесцентную подсветку жидкокристаллических дисплеев обеспечивают электролюминесцентные лампы (EL), свет которых попадает на полупрозрачный отражатель, а затем на противоположную от стороны обзора пользователем сторону дисплея. Для питания электролюминесцентной лампы необходим источник питания, вырабатывающий переменное напряжение частотой в районе 400 Гц и величиной обычно от 80В до 100В. При этом через лампу протекает ток примерно от десятка до нескольких десятков миллиампер. Следовательно, электролюминесцентная подсветка экономична и рекомендована для портативных устройств. Достоинства электролюминесцентной подсветки: равномерное освещение дисплея, высокая долговечность (время эксплуатации не менее 3000 ... 5000 часов), толщина конструкции от 1,5 мм, типовой диапазон рабочих температур от 0 до 50 °С. Недостатки: чем выше яркость электролюминесцентных ламп подсветки, тем меньше время их работы на отказ. А стоимость ламп весьма высока. Для питания электролюминесцентной лампы от низковольтного источника питания, например, аккумулятора или батареи, необходим импульсный преобразователь.

10.3.3. Светодиодная подсветка жидкокристаллических дисплеев

Светодиодную подсветку жидкокристаллических дисплеев обеспечивают наборы светодиодов (LED), излучение которых поступает на специальное устройство, проводящее и рассеивающее свет. Поступающий с него свет облучает заднюю сторону дисплея. Если необходим тонкий профиль устройства, то светодиоды крепят сбоку, а их излучение поступает к участкам дисплея по световоду. В случае большого дисплея такой способ плох появлением затемнённых участков. Чтобы этого не произошло, светодиоды размещают в виде матрицы с оборотной стороны дисплея, однако это приводит к невозможности получения сверхтонкого профиля. Для питания светодиодной подсветки берут питание от источника постоянного тока напряжением 5 В, а светодиоды включают через ограничивающие силу тока постоянные резисторы. Обычно постоянное напряжение, падающее на светодиодах подсветки, составляет 4,2 В. А сила тока лежит в пределах от 30 мА до 300 мА в зависимости от диагонали экрана. Достоинства светодиодной подсветки: низкое напряжение питания светодиодов, время наработки на отказ более 100000 часов. Недостатки: меньшая экономичность и на 2 ... 3 мм большая высота профиля, чем для устройств электролюминесцентной подсветки.

10.3.4. Время отклика жидкокристаллических дисплеев и влияние температуры на их работу

Время отклика – это длительность времени, за которое при подаче питания на пиксель он успевает поменять текущий цвет на нужный цвет, допустим, в случае монохроматического дисплея, чёрный цвет на белый цвет, или белый на чёрный. Чем более коротким будет время отклика, тем лучше, т.к. тем меньше станут искажения при быстрой смене изображений.

При температуре свыше примерно $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит необратимая деградация жидких кристаллов, приводящая к невозможности получения изображения. При температуре ниже ориентировочно $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ жидкие кристаллы перманентно уменьшают подвижность и от этого время отклика существенно возрастает. После увеличения температуры до уровня комнатной время отклика жидкокристаллического дисплея возрастает незначительно. Таким образом, даже после повышения температуры жидкокристаллический дисплей начнёт искажать изображения, на которых будут быстрые смены кадров.

Следовательно, для сохранения эксплуатационных качеств нельзя допускать переохлаждение и недопустимое повышение температуры жидкокристаллических дисплеев и индикаторов.

10.4. Плазменные панели

Плазменной панелью называют устройство, которое преобразует видеосигнал в изображение на экране, синтез которого обусловлен свечением люминофора под действием ионизации разреженного газа, вызванной холодной плазмой. Пиксель цветной плазменной панели состоит из трёх герметичных отсеков. Каждый отсек заполнен инертным газом и покрыт специальным флюоресцирующим люминофором. В каждый отсек подведены электроды, при приложении к которым переменного напряжения прямоугольной формы амплитудой в несколько киловольт происходит ионизация инертного газа и возникает плазменный разряд. При электрическом пробое газа напряжение между электродами существенно уменьшается до $100\text{ В} \dots 250\text{ В}$. Плазма порождает ультрафиолетовое излучение, подпадающее на люминофор, которым покрыта стенка отсека, и вызывает его свечение в видимом спектре. Свечение люминофоров в каждом пикселе плазменной панели возможно красного, синего и зелёного цветов. Шины питания и шины от электродов в отсеках,

образуют прямоугольную сетку, а пиксели расположены в её перекрестиях. Выводы с той стороны отсеков, которую будет обозревать пользователь, должны быть прозрачными. Чтобы токопроводящие шины были не заметны пользователю, их выполняют из почти прозрачной медно-хромовой или оловянно-хромовой плёнки, нанесённой на стеклянную плиту [104].

Достоинства плазменных панелей: угол обзора до 170° , яркость до $3000 \text{ кд} / \text{м}^2$, контрастность до $30000:1$, диагональ до 500 дюймов, почти на порядок ниже вероятность возникновения брака во время изготовления по сравнению с электронно-лучевыми трубками, а также незначительное мерцание изображения [104]. В течение первых нескольких лет эксплуатации плазменные панели обычно обладают более точной цветопередачей, чем жидкокристаллические дисплеи, но меньшей, чем у дисплеев с электронно-лучевыми трубками. Время отклика плазменной матрицы меньше, чем у жидкокристаллической матрицы. Плазменные матрицы, в отличие от электронно-лучевых трубок, не чувствительны к наличию магнитных полей, например, порождённых магнитными системами динамических головок акустических систем.

Недостатки: большая потребляемая мощность, выгорание люминофора после нескольких лет непрерывной эксплуатации, невозможность выполнения пикселей меньше $0,2 \times 0,2 \times 0,1 \text{ мм}$ из-за неустойчивого возникновения плазмы [104]. Время отклика плазменной матрицы больше, чем у электронно-лучевой трубки.

10.5. Органические светодиодные дисплеи

Органические светодиодные устройства (OLED) выполняют на основе многослойных токопроводящих люминесцирующих сопряжённых полимеров, например, полифениленвинилена. На прозрачной подложке расположен анод, выполненный из $\text{In}_4\text{Sn}_3\text{O}_{12}$ обычно методом золь-гель технологии, к которому подсоединяют положи-

тельный полюс источника питания. Отрицательный полюс источника питания подключают к катоду, изготовленному из алюминия. Между анодом и катодом располагают эмиссионный материал. Между катодом и эмиссионным материалом возникают слои инжекции электронов и переноса электронов. Между анодом и эмиссионным материалом будут расположены слои переноса дырок и инжекции дырок. Протекание тока обусловлено движениями дырок из анода и электронов из катода в эмиссионный слой, где происходит рекомбинация, сопровождаемая эмиссией фотонов. Органические светодиоды объединяют в группы – пиксели, в которых излучения эмиссионных слоёв попадают на светофильтры красного, синего и зелёного цветов. При обратном включении источника питания не возникает выделения фотонов в эмиссионном слое.

Выводы органических светодиодов могут быть составлены в прямоугольную сетку, подавая напряжения на строки и столбцы которой, инициируют свечение требуемых пикселей. Дисплеи, организованные по такому принципу, называют пассивными. Диагональ пассивных дисплеев обычно не превышает 10 дюймов. В активных дисплеях каждый органический светодиод соединён с соответствующим транзистором, расположенным рядом с ним, и управление транзистором требует затрат небольшой мощности. Диагональ активных дисплеев может достигать десятков дюймов, однако стоимость изготовления активных дисплеев выше, чем пассивных. Таким образом, получают элементарные органические светодиоды, объединяя которые получают органические светодиодные дисплеи.

Достоинства: отсутствие необходимости подсветки, угол обзора в 180° , весьма точная цветопередача, малые масса и габариты. Также допустимо изготовление гибких дисплеев и дисплеев с толщиной всего в несколько миллиметров.

Недостатки: деградация пикселей при прямом попадании солнечного света, выход из строя люминофоров синего цвета через примерно тысячу часов непрерывной работы.

10.6. Дисплеи на углеродных нанотрубках

Углеродной нанотрубкой именуют образование, имеющее длину от нескольких десятков нанометров до нескольких десятков миллиметров, похожее на полую трубу радиусом примерно в несколько нанометров, у которой стенки сформированы углеродом и обладают толщиной всего в один атом. Углеродные молекулы нанотрубок, имеющие сферическую форму, называют фуллеренами, а имеющие форму длинных трубок, концы которых имеют окончание в виде гладких полусфер, именуют тубеленами.

В вакууме, когда тубелены, длиной около десятка нанометров, с острыми, а не полусферическими, концами будут помещены в электрическое поле, на них возможно возникновение автоэлектронной эмиссии. Нанотрубки размещают на подложке, выполненной обычно из кварца или кремния, в вакууме под давлением $1,32 \cdot 10^{-10}$ атм. Плотность тока эмиссии катодов достигает $4 \text{ мА} / \text{см}^2$. Нанотрубки размещают в виде матрицы. Излучение нанотрубок попадает на три люминофора, которые начинают светиться красным, синим и зелёным. Этот свет с видимым глазом человека спектром проникает через прозрачную, чаще всего стеклянную пластину, который и воспринимает пользователь.

Выполненные таким образом цветные панели и дисплеи на углеродных нанотрубках обладают высокой механической прочностью, высокой яркостью вплоть до $8000 \text{ кд} / \text{м}^2$, углом обзора до 160° , высоким быстродействием и возможностью непрерывной работы в течение многих тысяч часов [194, с. 156]. Нанотрубки, кроме того, применяют для изготовления светодиодов, транзисторов, процессоров, прозрачных электродов, люминесцентных ламп и прочих, которые могут работать в условиях радиации. Теоретически возможно создание компонентов на нанотрубках, выдерживающих нагрев до

температуры примерно в 1000 °С. Дополнительную информацию о нанотрубках смотрите в литературе [200].

10.7. Сенсорные экраны и классификация их типов

Сенсорным экраном называют устройство, монтируемое на обозреваемую пользователем поверхность дисплея, чувствительное к прикосновениям. При поднесении пальца, указки, электронного пера и т.п. к выбранному изображению на поверхности дисплея, специальный контроллер считывает координаты точки прикосновения, и отправляет эти сведения на последующую обработку. Отслеживание места касания может быть реализовано согласно ёмкостной, резистивной, инфракрасной, тензометрической, на ПАВ, или электромагнитной технологиям. Сокращение «ПАВ» означает поверхностные акустические волны.

Сенсорный экран, выполненный по ёмкостной технологии, состоит из стеклянной пластины, на которую сзади нанесена прямоугольная сетка из прозрачных токопроводящих электродов, к краям которой подсоединяют генераторы переменных напряжений. При прикосновении к определённой точке сенсорного экрана в её окрестности возрастает ёмкость, увеличиваются переменные токи утечки, сила которых пропорциональна расстояниям до краёв пластин. Измеряя силы токов, вычисляют положение точки прикосновения к сенсорному экрану. Достоинства: малое время отклика, составляющее обычно от 3 мс до 20 мс, число нажатий до выхода экрана из строя может превышать сотни миллионов, высокая механическая прочность. Недостаток: не реагирует на прикосновение непроводящим ток предметом.

Сенсорный экран, выполненный по резистивной технологии, имеет жёсткую пластину, покрытую резистивным веществом, перед

которой располагают пластиковую мембрану, также покрытую резистивным веществом. Материалом пластины обычно выступает стекло или полиэстер. Между пластиной и мембраной размещают изолирующие гранулы. К краям пластины и мембраны подключают внешние источники питания. При нажатии на резистивный экран мембрана продавливает слой изоляции, что приводит к её соприкосновению с пластиной. Токи, потребляемые от генераторов, будут пропорциональны расстояниям до точки прикосновения. Резистивные покрытия и мембраны и пластины необходимы для отслеживания положения точки и по горизонтали, и по вертикали. Достоинства: низкая стоимость, чувствительность экрана к прикосновениям и проводящим, и диэлектрическим предметом. Недостатки: число нажатий до разрушения обычно на порядок меньше, чем у сенсорных экранов по ёмкостной технологии, а также ниже механическая прочность.

В сенсорном экране, выполненном по инфракрасной технологии, сетка инфракрасных волн образована инфракрасными светодиодами, размещёнными с одной стороны экрана по вертикали и горизонтали, и принимаемая фототранзисторами, установленными с другой стороны экрана. Если любой непрозрачный для инфракрасных волн предмет будет поднесён достаточно близко к сенсорному экрану, и поглотит или отразит падающее на фототранзистор излучение, то система отреагирует и определит координаты точки прикосновения. Достоинства: чувствительность экрана к прикосновениям любым предметом, задерживающим инфракрасное излучение. Недостатки технологии: большое время отклика, высокая стоимость, возможность использования лишь для плоских дисплеев, низкая разрешающая способность.

Сенсорный экран, выполненный по технологии ПАВ, обладает стеклянной плитой, по которой пропускают от источников к приёмникам колебаний поверхностно-акустические волны с частотой в несколько мегагерц. Источники и приёмники ПАВ – это пьезоэлек-

трическими преобразователями, выполняемые обычно в виде плёнок сульфида кадмия, установленные по краям экрана. Излучённые поверхностно-акустические волны достигают противоположной стороны экрана и отражаются обратно, где попадают на датчики. Если осуществить прикосновение к экрану, то поверхностно-акустические волны будут частично поглощены и преломлены, что регистрируют датчики. Полученную информацию сравнивают с заранее записанной информацией о всевозможных распространениях волн и на этой основе формируют сигнал не только о положении точки касания в пространстве, но и силы, с которой оно было произведено. Достоинства: наработка на отказ сенсорного экрана на основе ПАВ обычно в несколько раз превышает наработку на отказ экрана по резистивной технологии. Недостатки: высокая стоимость, низкая разрешающая способность, ограниченная стоимостью изделия, чувствительность к механическим колебаниям, получение ошибочной информации при воздействии вибраций.

10.8. Голографические системы

Голографической называют систему, в которой представление определённой оптической информации обеспечено интерференцией двух волн: отражённой от объекта и когерентной с ней волны. Источником когерентного излучения служит специальный лазер. Волну, которая отражена от объекта, называют объектной или предметной, а когерентную волну называют опорной. При наложении объектной и опорной волн на определённых участках происходит пространственное сложение их амплитуд с учётом фаз. В этих участках пространства интенсивности амплитуд, которые имеют световые волны, могут лежать в диапазоне от их взаимной разности до их взаимной суммы. Все участки пространства, на которых появляются интерференции, образуют интерференционную картину. Если в месте образования интерференционной картины поместить плоскую

фотопластинку, то изображение, возникающее на этой пластинке, называют голограммой.

Голограммы позволяют полностью воссоздать изображение исходного объекта, так как содержат информацию и об амплитудах, и о фазах волн; в том числе они могут дать изображение обратной стороны наблюдаемого объекта.

11. Аналоговые устройства

11.1. Усилители сигналов и их классификация

Электронным усилителем называют аппарат, на вход которого подают сигнал малой мощности, а на выходе, за счёт потребления энергии от электропитающего устройства, получают точно такой же сигнал, но большей мощности. Наименьшую функционально законченную цепь, которая может усиливать сигнал, называют усилительным каскадом. Активными компонентами, благодаря которым происходит усиление сигналов каскадов, выступают транзисторы, электронные лампы, туннельные диоды и прочее.

По области применения в аппаратуре усилители подразделяют на измерительные, микрофонные, предварительные и другие [167, с. 94]. По частотному диапазону подлежащих усилению сигналов их классифицируют на усилители низкой частоты (УНЧ), высокой частоты (УВЧ), постоянного тока (УПТ), на широкополосные и избирательные усилители. УНЧ могут усиливать сигналы с частотой примерно от 10 Гц до 100 кГц, УВЧ – от 100 кГц до 100 МГц. УПТ предназначены для усиления сигналов в полосе частот от постоянного тока до 100 кГц. УПТ используют в устройствах автоматического регулирования, приборах связи, в операционных усилителях и т.п. Широкополосные усилители, которые подразделяют на видеоуси-

лители и импульсные усилители, могут усиливать сигналы с частотой, лежащей в диапазоне примерно от 50 Гц до 6 МГц. Избирательные усилители необходимы для увеличения амплитуды сигналов при сохранении их формы (если это нужно) лишь в определённой узкой полосе частот. Для этого в такие устройства вводят избирательные цепи, такие как системы резонансных контуров, пьезоэлектрические или электромеханические фильтры и пр. Избирательные усилители используют в большинстве радиоприёмников и телевизоров.

11.2. Основные параметры и характеристики усилителей

11.2.1. Основные параметры усилителей

К важнейшим параметрам усилителей относят коэффициент усиления, полосу пропускания, входное и выходное сопротивления, выходную мощность, коэффициент нелинейных искажений, КПД, уровень собственных шумов и другое.

Коэффициентом усиления по напряжению называют отношение амплитуды переменного выходного напряжения к амплитуде переменного входного напряжения усиливаемого сигнала: $K_U = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$. Коэффициентом усиления по току именуют отношение силы тока нагрузки к входному току: $K_I = \Delta I_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вх}}$. А коэффициентом усиления по мощности называют отношение мощности, отдаваемой в нагрузку, к вызвавшей её мощности входного сигнала: $K_P = R_{\text{вых}} / R_{\text{вх}}$. Если тракт усилителя многокаскадный, то суммарный коэффициент усиления всего тракта составляет произведение коэффициентов усиления его отдельных каскадов.

Если при фиксированной амплитуде входного сигнала изменять частоту сигнала, подаваемого на вход УНЧ, то можно заметить, что на определённых очень высоких и очень низких частотах коэффициенты усиления аппарата по напряжению понижаются. А в диапазоне между этими частотами коэффициент усиления практически неизменен. Полоса пропускания усилителя – это такой диапазон усиливаемых частот, в котором выходное напряжение, которое подводят к нагрузке, падает менее чем на 0,707 от наибольшего значения.

Для нормальной работы усилителя его входное сопротивление должно быть много выше выходного сопротивления источника сигнала, а выходное сопротивление усилителя должно быть много меньше, чем сопротивление нагрузки. Если имеет место прямо противоположное – входное сопротивление меньше, чем выходное сопротивление источника сигнала, или выходное сопротивление усилителя меньше сопротивления нагрузки, то их необходимо согласовать. Согласование – это осуществление операций, направленных на обеспечение возможности передачи наибольшей энергии от её источника к потребителю с минимумом потерь и искажений. Типовой приём согласования входа транзисторного усилителя с низким сопротивлением и выхода источника сигнала с высоким сопротивлением состоит в установке между ними транзисторного каскада на биполярном или полевом транзисторах, которые включены по схемам с общим коллектором или общим стоком. Известно, что такие каскады обладают высоким входным и низким выходным сопротивлениями.

Номинальная выходная мощность усилителя – это наибольшая мощность, которую он может отдать с нагрузку без превышения заданного значения коэффициента нелинейных искажений. Выходную мощность обычно находят согласно выражению:

$$P_{ном} = U_{вых}^2 / R_n,$$

где R_n – сопротивление нагрузки, Ом;

а $U_{вых}$ – напряжение на выходе усилителя, В.

Нелинейные искажения – это искажения, в результате которых на выходе возникают новые гармоники, которые отсутствовали в исходном сигнале. Количественно эти искажения представляют в виде выраженного в процентах коэффициента гармоник, или коэффициента нелинейных искажений, который находят по следующей формуле:

$$K_{ни} = 100\% \cdot \sqrt{(U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2)} / U_1,$$

где U_1 – амплитуда напряжения первой гармоники, В;

U_2 – амплитуда напряжения второй гармоники, В;

U_3 – амплитуда напряжения третьей гармоники, В;

U_4 – амплитуда напряжения четвертой гармоники, В;

U_n – амплитуда напряжения n-ной гармоники, В.

КПД усилителя, выражаемый в процентах, допустимо вычислить согласно выражению:

$$\eta = (P_{вых} / P_{п}) \cdot 100, \%$$

где $P_{вых}$ – выходная мощность усилителя, Вт;

$P_{п}$ – мощность, которую потребляет усилитель от источника питания, Вт.

Возникающие в выходном сигнале усилителя шумы выделяют в три группы:

- шумы компонентов, усиливающих сигнал,
- тепловые шумы, связанные с повышением температуры резисторов, стабилитронов и других деталей,
- шумы, обусловленные пульсациями в питающем напряжении.

11.2.2. Важнейшие характеристики усилителей

К основным характеристикам усилителей причисляют амплитудную, амплитудно-частотную (АЧХ) и фазовую характеристики.

Амплитудной характеристикой называют зависимость амплитуды переменного напряжения, снятого с выхода устройства, от амплитуды напряжения, поданного на его вход. Вместо амплитудных

напряжений можно оперировать среднеквадратическими напряжениями. Амплитудная характеристика усилителя показана на рис. 11.1.

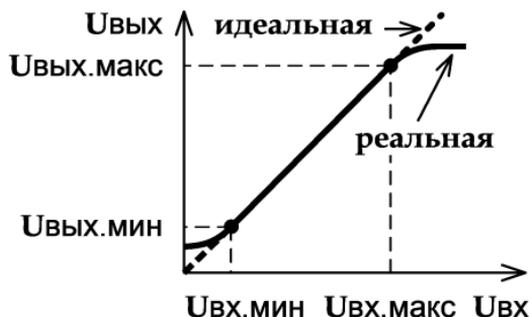


Рис. 11.1. Амплитудная характеристика

Зная амплитудную характеристику, можно найти динамический диапазон усилителя. Он равен двадцати логарифмам отношения максимального входного напряжения к минимальному входному напряжению, при условии, что эти напряжения соответствуют линейному участку амплитудной характеристики:

$$D = 20 \lg (U_{\text{вх.макс}} / U_{\text{вх.мин}}), \text{ (дБ)}.$$

Амплитудно-частотной характеристикой, которую получают при фиксированном входном напряжении, именуют зависимость напряжения, снимаемого с выхода аппарата, от частоты сигнала, что отражено на рис. 11.2.

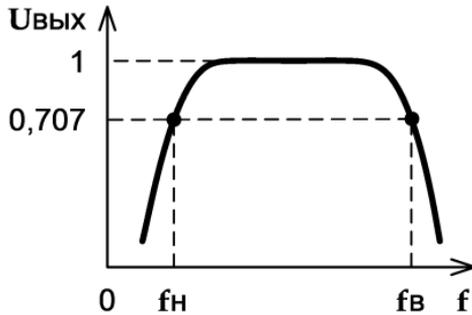


Рис. 11.2. Амплитудно-частотная характеристика

Располагая амплитудно-частотной характеристикой, можно установить полосу пропускания усилителя. Бывает, что удобно использовать зависимость коэффициента усиления устройства от частоты сигнала, получаемую при неизменном входном напряжении. Часто для удобства график АЧХ строят в логарифмическом масштабе.

Фазовой характеристикой называют зависимость от частоты фазового сдвига, возникающего между сигналом, поступающим на вход, и сигналом, получаемым на выходе. Фазовая характеристика усилителя для области низких частот дана на рис. 11.3.

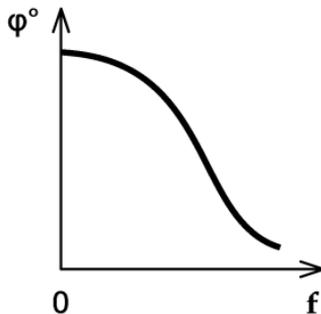


Рис. 11.3. Фазовая характеристика

Обладая фазовой характеристикой, можно установить, возникнет или нет на определённой частоте самовозбуждение в усилителе.

11.3. Работа простейшего усилителя на различных частотах

Принципиальная схема простейшего усилительного каскада с резисторно-ёмкостными связями, выполненного на одном биполярном p - r - n транзисторе, приведена на рис. 11.4.

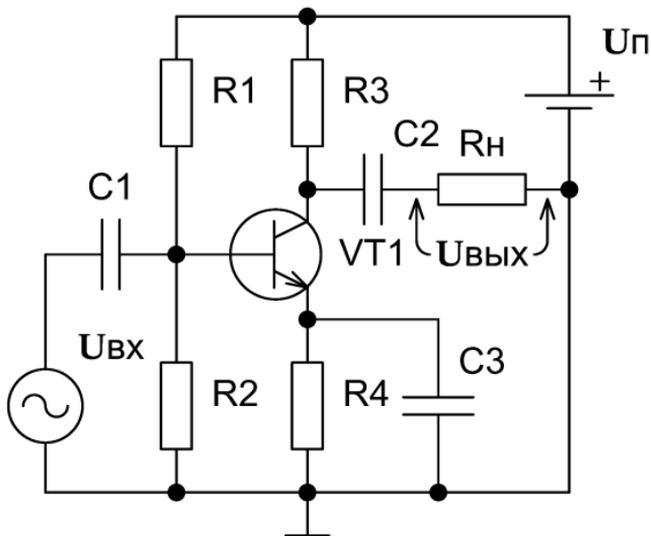


Рис. 11.4. Схема усилительного каскада

Резисторы $R1$ и $R2$ образуют делитель постоянного напряжения, подводимого к базе транзистора $VT1$. Компонент $Rн$ – это нагрузка каскада, обладающая сопротивлением, а также паразитными параметрами: индуктивностью и ёмкостью. Паразитная ёмкость нагрузки включает ёмкость монтажа и входную ёмкость очередного кас-

када, подсоединённого к рассматриваемому каскаду. Конденсаторы $C1$ и $C2$ необходимы для обеспечения протекания переменного тока, но преграждения пути протекания постоянного тока.

Если на вход каскада подан сигнал низкой частоты, то паразитное ёмкостное сопротивление нагрузки велико и нет его существенного влияния на работу устройства. Включённые последовательно с источником сигналов конденсаторы $C1$ и $C2$ обладают высокими ёмкостными сопротивлениями, и на них падает существенная часть сигнала, что объясняет снижение усилительных свойств устройства на низкой частоте.

При поступлении на вход каскада сигналов со средними частотами, ёмкостные сопротивления конденсаторов $C1$ и $C2$ низки, и они не оказывают значительного воздействия на функционирование устройства. Паразитное ёмкостное сопротивление нагрузки на средних частотах меньше, чем на низких частотах, но не настолько мало, чтобы играть существенную роль в работе каскада. В результате на средних частотах усиление сигнала устройством наиболее велико.

Если на вход каскада попадает сигнал высокой частоты, то конденсаторы $C1$ и $C2$ обладают очень низкими ёмкостными сопротивлениями, и они практически не препятствуют сигналу. Однако паразитное ёмкостное сопротивление нагрузки весьма мало и оно значительно шунтирует выход каскада, что вызывает снижение усилительных свойств на высокой частоте.

11.4. Выходные усилительные каскады

11.4.1. Однотактный трансформаторный каскад

Упрощённая принципиальная схема простейшего однотактного усилительного каскада с МДП-транзистором n -типа, включённым по схеме с общим истоком, приведена на рис. 11.5.

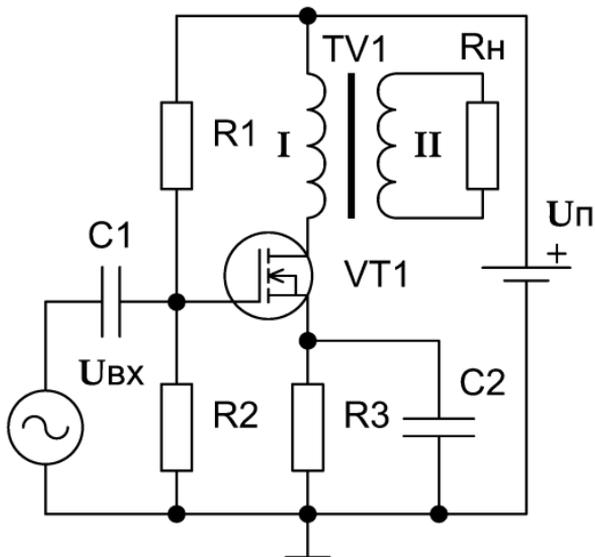


Рис. 11.5. Однотактный усилительный каскад

Как видно из рисунка, первичная обмотка трансформатора TV1 подключена к стоку транзистора VT1, а с вторичной обмотки сигнал подают на нагрузку. Трансформатор даёт возможность получить наилучшее согласование каскада с нагрузкой, а также обеспечить их гальваническую развязку. Транзистор VT1 перейдёт в открытое состояние, если между его затвором и истоком приложить напряжение таким образом, чтобы напряжение положительной полярности было подано на затвор. Ток течёт по цепи от плюса источника питания, по обмотке трансформатора TV1, через канал транзистора, к отрицательному полюсу источника питания. Однотактные трансформаторные каскады в основном предназначены для работы с маломощной нагрузкой.

При резком прекращении протекания тока по первичной обмотке трансформатора, на её выводах возникает импульс обратного на-

пряжения, чрезмерная амплитуда которого может вызвать, например, выход из строя транзистора. Кроме того, возникнет затухающий колебательный процесс, который зачастую нужно оперативно погасить. Чтобы уменьшить амплитуду импульса, снижают скорость нарастания напряжения на выводах первичной обмотки, шунтируя её RC-цепью, или включив параллельно ей *transil* или иной поглотитель выбросов.

Достоинство: каскад довольно прост, и для его построения используют всего один транзистор.

Недостатки: обычно весьма низкий КПД каскада, магнитные свойства сердечника использованы плохо, магнитопровод трансформатора подвергнут постоянному подмагничиванию, что вынуждает вводить в сердечник немагнитный зазор. Трансформатор приводит к частотным искажениям и снижению коэффициента усиления на низких частотах.

11.4.2. Двухтактный трансформаторный каскад

Принципиальная схема двухтактного усилительного каскада с трансформаторами и полевыми МДП-транзисторами *n*-типа, включёнными по схеме с общим истоком, дана на рис. 11.6.

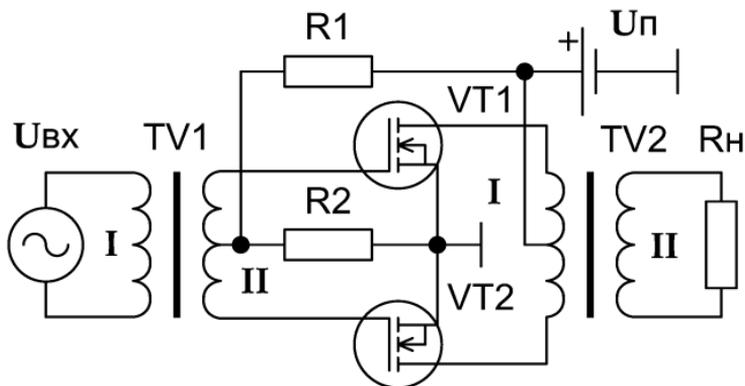


Рис. 11.6. Двухтактный трансформаторный каскад

Резисторы делителя напряжения $R1$ и $R2$, обеспечивающие смещение, нужны для уменьшения искажений выходного сигнала. Для обеспечения некоторой стабильности в диапазоне температур иногда один из резисторов делителя напряжения заменяют подходящим терморезистором. Благодаря согласующему трансформатору $TV1$, который имеет вторичную обмотку с отводом от середины, между затворами и истоками транзисторов $VT1$ и $VT2$ приложены противофазные напряжения, амплитуды которых обладают практически одной и той же величиной. Если к затвору транзистора $VT1$ приложено положительное напряжение, а к затвору транзистора $VT2$ – отрицательное напряжение относительно истоков этих транзисторов, то компонент $VT1$ открыт, а $VT2$ – закрыт. Если, наоборот, к затвору транзистора $VT1$ будет приложено отрицательное напряжение, а к затвору транзистора $VT2$ – положительное напряжение относительно соответствующих истоков транзисторов, то прибор $VT1$ будет закрыт, а $VT2$ – открыт. В любом случае ток течёт по цепи от плюса источника питания, через полуобмотку I выходного трансформатора $TV2$, по выводам сток-исток открытого в данный момент транзистора, к отрицательному полюсу источника питания. Токи

стоков транзисторов, протекая по первичной обмотке выходного трансформатора TV2, инициируют наведение ЭДС на вторичную обмотку, переменное напряжение с которой подводят к нагрузке. Так как токи стоков МДП транзисторов VT1 и VT2 протекают по первичной полуобмотке выходного трансформатора TV2 в противоположных направлениях, то ток, протекающий по нагрузке, пропорционален разности токов стоков транзисторов. Двухтактные трансформаторные каскады целесообразны для работы с мощными нагрузками.

Достоинства: каскад может обладать высоким КПД; в магнитопроводах трансформаторов отсутствуют длительные подмагничивания сердечников постоянным током, что позволяет расширить используемый диапазон магнитной индукции по сравнению с трансформаторами, функционирующими с постоянным подмагничиванием. Пульсации напряжения источника питания не оказывают существенного воздействия на работу каскада, так как происходят взаимные компенсации вызванных ими колебаний токов, протекающих по первичной обмотке выходного трансформатора.

Недостатки: большая масса и габариты трансформаторов, частотные искажения сигнала и завал амплитудно-частотной характеристики на низких частотах, обусловленные не идеальными свойствами трансформаторов. В рассмотренном выше каскаде при коротком замыкании в нагрузке транзисторы очень быстро выйдут из строя, что вынуждает использовать систему защиты по току. Напряжение, подаваемое на транзисторы VT1 и VT2, должно быть подано в противофазе, что в случае отказа от использования согласующего трансформатора TV1 должен обеспечивать специальный каскад – фазоинвертор. Задача фазоинвертора состоит в разделении поданного на его вход сигнала на два выходных сигнала, сдвинутых на 180° по фазе. Фазоинвертором может выступать каскад на одном биполярном транзисторе, включённом по схеме с общим эмиттером, к коллектору и эмиттеру которого подключены резисторы одинако-

вого номинального сопротивления. Сигнал в фазе снимают с эмиттера, а в противофазе – с коллектора транзистора. Сопротивления этих резисторов должно быть близки для того, чтобы амплитуды выходных синфазных и противофазных напряжений были почти одинаковы. Также фазоинвертор может быть выполнен на одном полевом транзисторе, или в качестве фазоинвертора может быть задействован дифференциальный каскад [168, с. 171, 172].

11.4.3. Двухтактный бестрансформаторный каскад

Принципиальная схема двухтактного бестрансформаторного усилительного каскада с полевыми МДП-транзисторами разных типов проводимостей отражена на рис. 11.7.

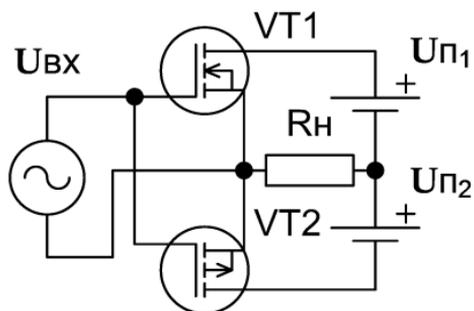


Рис. 11.7. Двухтактный бестрансформаторный каскад МДП-транзистор VT1 обладает n-типом проводимости, а транзистор VT2 – p-типом. Если между затворами и истоками транзисторов будет подано напряжение положительной полярности, то транзистор VT2 будет закрыт, а транзистор VT1 будет открыт, и ток потечёт по цепи от плюса источника питания $U_{п1}$, сток-исток транзистора VT1, по нагрузке, к отрицательному полюсу источника питания $U_{п1}$. А если будет подано напряжение затвор-исток отрицательной полярности, то транзистор VT1 будет закрыт, а транзистор VT2 бу-

дет открыт, и ток потечёт по цепи от плюса источника питания $U_{п2}$, по нагрузке, исток-сток транзистора VT_2 , к отрицательному полюсу источника питания $U_{п2}$. Поступление на вход сигнала с напряжением то положительной, то отрицательной полярностей приводит то к запиранию одного транзистора и отпиранию другого, то наоборот. Другими словами, транзисторы функционируют в противофазе. Транзисторы VT_1 и VT_2 выбирают так, чтобы их параметры и характеристики в рабочей области были как можно более близкими.

Достоинства: возможно получение высокого КПД, при правильном выборе транзисторов нелинейные искажения малы. Каскад развивает большую максимальную выходную мощность, по сравнению с однотактным каскадом с таким же транзистором. Из-за отсутствия трансформаторов нет жёстких ограничений на частотный диапазон усиливаемых сигналов. Кроме того, без громоздких и тяжёлых трансформаторов получают малые массу, габариты и низкую стоимость устройства.

Недостатки: необходимость тщательного выбора транзисторов и стремительное их разрушение при перегрузке выходного каскада, в случае, если в нём не предусмотрена система защиты по току.

11.5. Основные сведения о режимах работы усилителей

11.5.1. Проходная динамическая характеристика и общие сведения о классах усиления

Проходной динамической характеристикой именуют зависимость силы тока, протекающего по выходной цепи каскада, от величины напряжения, подведённого к его входу. Иногда её называют сквозной динамической характеристикой. Если МДП-транзистор вклю-

чѐн по схеме с общим истоком, то проходная динамическая характеристика будет иметь вид зависимости тока стока от напряжения затвор-исток. Если биполярный транзистор включѐн по схеме с общим эмиттером, то проходной динамической характеристикой будет выступать зависимость тока коллектора от напряжения база-эмиттер.

Проходную динамическую характеристику часто строят, располагая входной и выходной статическими характеристиками. Входной статической характеристикой называют зависимость входного тока от напряжения, прикладываемого к входным цепям, при неизменном выходном напряжении. Выходной статической характеристикой именуют зависимость тока нагрузки, протекающего по выходной цепи каскада, от напряжения, снимаемого с выхода устройства, при фиксированном входном токе. График проходной динамической характеристики, получаемой, например, для биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером, приведѐн на рис. 11.8.

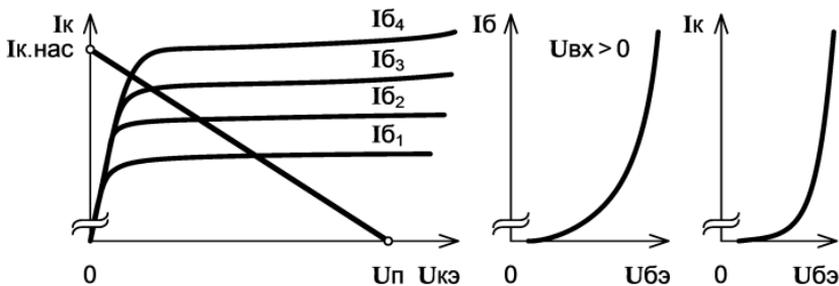


Рис. 11.8. Проходная динамическая характеристика

Зависимость $I_b = f(U_{бэ})$ – это входная статическая характеристика, а $I_k = f(U_{кэ})$ – это выходная статическая характеристика.

Классами усиления называют типовые режимы, в которых функционируют усилительные каскады, причѐм эти режимы зависят от размещения рабочей точки по отношению к проходной динамической характеристике. К наиболее часто используемым режимам следует отнести классы А, В, С, D, G, H, Т, а также промежуточные

классы АВ и ВС. Выходной ток каскада может течь как в течение всего периода, так и лишь некоторую его часть. Углом отсечки имеют половину длительности периода, в течение которой по нагрузке течёт выходной ток каскада. Угол отсечки, обозначаемый « Θ », приводят в градусах.

11.5.2. Режим работы класса А

Рабочая точка каскада, функционирующего в режиме работы класса «А», лежит на линейном фрагменте проходной динамической характеристики. Для этого необходимо организовать смещение, то есть подачу на вход каскада (после разделительного конденсатора или трансформатора между общим проводом и либо затвором, либо базой, либо сеткой) небольшой постоянной составляющей напряжения, для чего обычно используют делитель напряжения источника питания. В режиме класса «А» амплитуда входного сигнала меньше, чем величина смещающего напряжения [175, с. 152]. Угол отсечки каскада класса «А» составляет 180° , то есть постоянный ток через активный усилительный компонент каскада протекает в течение длительности всего периода, даже если входной сигнал отсутствует. Если сигнал на вход каскада класса «А» не подан, то место, через которое проходит линия нагрузочной прямой и требуемая ветвь выходной статической характеристики, носит название рабочей точки покоя. В связи с тем, что амплитуда переменной составляющей тока выходного сигнала меньше постоянной составляющей тока этого сигнала, которая приводит лишь к выделению тепла, то КПД каскада не велик. Наибольшее теоретическое значение КПД каскада в классе «А» составляет 50% [168, с. 157; 95, с. 252], и превышение этого КПД для данного класса невозможно даже в идеальном случае. А КПД каскада класса «А», обычно достижимый на практике, редко превышает 20%. Столь низкий КПД представляет основной недостаток устройств данного класса. Поэтому в классе «А» обычно

функционируют предварительные каскады, а оконечные усилители мощности в этом классе работают редко.

К достоинству класса «А» нужно отнести появление минимальных, относительно остальных классов усиления, нелинейных искажений, ввиду нахождения рабочей точки в линейной области.

11.5.3. Режим работы класса В

Напряжение смещения каскада, функционирующего в режиме класса «В», выбирают таким, чтобы рабочая точка покоя была расположена около нуля в начале координат, а ток, потребляемый каскадом в отсутствие сигнала, был незначительным. Угол отсечки в классе «В» составляет 90° , то есть ток нагрузки течёт лишь половину длительности периода. В отсутствие сигнала, подлежащего усилению, постоянная составляющая тока нагрузки отсутствует, а КПД каскада довольно высок. Максимальная теоретическая величина КПД каскада в классе «В» составляет 78,5% [168, с. 158; 95, с. 258]. На практике КПД каскада в классе «В» часто доходит до 60% ... 65%, что представляет достоинство по сравнению КПД каскада в классе «А».

Важным недостатком режима класса «В» выступают большие нелинейные искажения, что ограничивает применение этого режима оконечными двухтактными усилителями мощности.

11.5.4. Режим работы класса АВ

Каскад в классе «АВ» работает в «гибридном» режиме, когда угол отсечки больше 90° , но меньше 180° , а рабочая точка лежит на изгибе вблизи нуля у начала координат проходной динамической характеристики. В случае отсутствия входного сигнала или при его малой амплитуде активные компоненты функционируют в классе «А», а если уровень сигнала превысит определённый порог, то будет осуществлён переход работы в класс «В». Ток покоя каскада в

классе «АВ» будет много ниже, чем в режиме класса «А», а КПД устройства будет большим, чем в классе «А», но меньшим, чем в классе «В». Нелинейные искажения сигнала, усиленного каскадом в классе «АВ», не велики, а практически достижимый КПД таких устройств может составлять примерно 50% ... 55%. Таким образом, класс «АВ» вобрал лучшие черты классов «А» и «В» – низкие нелинейные искажения при довольно высоком КПД. Распространённое применение каскадов в классе «АВ» заключено в изготовлении окончных двухтактных усилителей мощности с низким уровнем гармоник.

11.5.5. Режим работы класса С

Каскад в классе «С» имеет угол отсечки больше 10° , но меньше 90° , а напряжение смещения в классе «С», обладающее отрицательной величиной, будет значительней, чем в классе «В». В результате выходной сигнал состоит из положительных полуволн с отсечкой тока нагрузки и похож на импульсы малой длительности. КПД каскада в классе «С» может достигать 75% ... 85%, однако нелинейные искажения чрезвычайно велики, что ограничивает использование этого класса окончными каскадами передатчиков, в которых искажение формы сигнала не столь пагубно, как в усилителях звуковой частоты; резонансными усилителями; умножителями частоты и пр. Более того, для умножителей частоты богатый гармониками спектр выступает достоинством, а не недостатком. Иногда для усиления сигналов применяют промежуточный класс «ВС», в котором КПД будет выше, чем в классе «В», а нелинейные искажения будут меньше, чем в классе «С».

11.5.6. Режим работы класса D

Каскад в классе «D» имеет активные компоненты, работающие в ключевом режиме, а требуемое изменение огибающей напряжения выходного сигнала происходят благодаря соответствующему быстрому регулированию коэффициента заполнения широтно-модулированных импульсов, которые пропорциональны амплитуде аналогового сигнала, подаваемого на вход устройства. Так как ключевые транзисторы лишь короткий интервал времени пребывают в линейном режиме, а в основном – в режимах отсечки и насыщения, то КПД каскада в классе «D» может быть очень высоким и достигать 85% ... 90% при усилении музыкального сигнала. Именно высокую энергетическую экономичность относят к важнейшему достоинству усилителей класса «D», что позволяет их рекомендовать для применения в ноутбуках, сотовых телефонах и других устройствах. В ключевом режиме основной причиной уменьшения КПД выступают потери в динамическом режиме, т.е. при переключении активных компонентов. Меньший вклад в снижение КПД вносят потери в статическом режиме.

11.6. Сведения об обратных связях и о влиянии, которое они оказывают на работу усилителей

11.6.1. Основная информация об обратных связях

В электронике обратной называют связь, под действием которой на вход устройства попадает некоторая часть энергии с его выхода. Цепью обратной связи называют путь, по которому сигнал с выхода поступает обратно на вход.

По формированию обратные связи подразделяют на три вида: паразитные, внутренние и искусственные. Паразитные обратные

связи не выполняют каких-либо функций, предусмотренных разработчиками для обеспечения функционирования аппарата, и их образование обусловлено наличием вредных индуктивных, ёмкостных и прочих взаимосвязей компонентов и соединений. Паразитные обратные связи возникают всегда, однако некоторые обратные связи оказывают большее воздействие, а другие – меньшее. Для нормальной работы устройства, паразитные обратные связи, влияющие наиболее пагубно, необходимо если не ликвидировать, то хотя бы минимизировать. Внутренняя обратная связь возникает из-за определённых физических свойств компонентов электронной техники. Искусственную обратную связь создают сознательно с целью оказания требуемого воздействия на свойства каскада. Обратные связи существенно влияют на параметры охваченных ими каскадов, а изменением глубин обратных связей можно в значительной степени регулировать режимы работы приборов. Регулировки глубин паразитных и внутренних обратных связей затруднительны. А для этой цели в основном пригодны искусственные обратные связи.

Если поступающий на вход сигнал имеет ту же фазу, что и выходной сигнал, то такую обратную связь называют положительной, а если сигнал приходит в противофазе – то отрицательной. Организация отрицательной обратной связи в усилительном каскаде снижает коэффициент гармоник в выходном сигнале, расширяет полосу пропускания, но приводит к уменьшению коэффициента усиления по мощности. Введение положительной обратной связи вызывает прямо противоположные явления. В усилителях звуковой частоты часто используют отрицательную обратную связь, а в автогенераторах всегда присутствует положительная обратная связь.

Согласно классификации, по способу подключения к выходу регулируемого устройства обратные связи могут быть по напряжению или по току. Если сигнал, подаваемый на вход системы обратной связи, прямо пропорционален напряжению на выходе регулируемого устройства, то считают, что имеют дело с обратной связью по

напряжению. А если сигнал, подаваемый на вход цепи обратной связи, прямо пропорционален выходному току регулируемого устройства, то это обратная связь по току. Если выходной сигнал с регулируемого устройства будет пропорционален как току, так и напряжению, то в таком случае имеет место смешанная обратная связь.

Для оценки влияния обратной связи на усилительные свойства соответствующего каскада оперируют коэффициентом передачи цепи обратной связи:

$$\beta = U_{\text{вых.ос}} / U_{\text{вх.ос}},$$

где $U_{\text{вых.ос}}$ – выходное напряжение каскада, охваченного обратной связью, В;

а $U_{\text{вх.ос}}$ – входное напряжение этого каскада, В.

Обратную связь часто выполняют на пассивных компонентах, и тогда коэффициент обратной связи ниже единицы. Если уменьшение или увеличение частоты станет приводить к перемене величины коэффициента обратной связи, то такую обратную связь называют частотозависимой, а если нет – то частотонезависимой.

Выход системы обратной связи может быть подключён либо параллельно, либо последовательно к входу регулируемого устройства. В двух этих случаях обратная связь будет носить соответственно названия параллельной и последовательной.

11.6.2. Влияние обратных связей на коэффициенты усиления каскадов

Структурная схема усилительного каскада с последовательной цепью обратной связи по напряжению изображена на рис. 11.9.

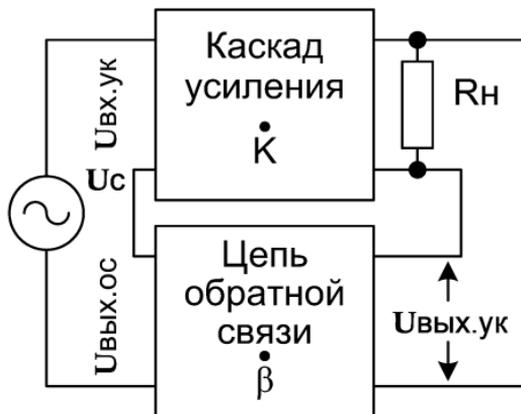


Рис. 11.9. Каскад с последовательной обратной связью

Далее осуществим простейший анализ. Выходное напряжение усилительного каскада в данном случае будет подано на вход цепи обратной связи, а, следовательно, коэффициент передачи последней составляет:

$$\beta = \frac{\dot{U}_{\text{вых.ос}}}{\dot{U}_{\text{вых.ук}}},$$

где $\dot{U}_{\text{вых.ос}}$ – комплексное выходное напряжение цепи обратной связи, В;

а $\dot{U}_{\text{вых.ук}}$ – комплексное напряжение на выходе усилительного каскада или на входе обратной связи, В.

Или, переписав формулу относительно выходного напряжения цепи обратной связи, и учтя, что при отрицательной обратной связи величина β лежит в диапазоне $-1 \dots 0$, при положительной обратной связи – в пределах $0 \dots 1$ [39, с. 245], получим:

$$\dot{U}_{\text{вых.ос}} = \pm \beta \cdot \dot{U}_{\text{вых.ук}}.$$

Общеизвестно, что коэффициент усиления каскада без обратной связи, равен:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{\text{вых.ук}}}{\dot{U}_{\text{вх.ук}}},$$

где $\dot{U}_{\text{вых.ук}}$ и $\dot{U}_{\text{вх.ук}}$ – соответственно комплексные напряжения на выходе и на входе усилительного каскада, В.

Из рисунка видно, что напряжение, отводимое от источника сигнала, равно сумме выходного напряжения цепи обратной связи и напряжения на входе усилительного каскада, а, следовательно, можно записать так:

$$\dot{U}_c = \dot{U}_{\text{вых.ос}} + \dot{U}_{\text{вх.ук}},$$

где \dot{U}_c – напряжение, поступающее на вход каскада, охваченного обратной связью, В.

Перепишем последнее выражение относительно напряжения на входе каскада с обратной связью: $\dot{U}_{\text{вх.ук}} = \dot{U}_c + (\pm\beta \cdot \dot{U}_{\text{вых.ук}})$, из чего следует

$$\dot{U}_c = \dot{U}_{\text{вх.ук}} - (\pm\beta \cdot \dot{U}_{\text{вых.ук}}).$$

Каскад с обратной связью обладает коэффициентом усиления:

$$\dot{K}_{\text{ос}} = \frac{\dot{U}_{\text{вых.ук}}}{\dot{U}_{\text{вх.ук}} - (\pm\beta \cdot \dot{U}_{\text{вых.ук}})}.$$

Имеем право разделить знаменатель и числитель последнего выражения на входное напряжение усилительного каскада $\dot{U}_{\text{вх.ук}}$, и получим формулу для нахождения коэффициента усиления каскада с обратной связью:

$$\dot{K}_{ос} = \frac{\dot{U}_{вых,ук} / \dot{U}_{вх,ук}}{1 - (\pm \beta \cdot \dot{U}_{вых,ук} / \dot{U}_{вх,ук})}$$

Зная, что отношение комплексных величин выходного напряжения усилительного каскада к входному напряжению есть не что иное как коэффициент усиления каскада \dot{K} , не охваченного обратной связью, перепишем последнее выражение:

$$\dot{K}_{ос} = \frac{\dot{K}}{1 - (\pm \beta \cdot \dot{K})}$$

В случае отрицательной обратной связи знаменатель, именуемый глубиной, или фактором обратной связи, имеет вид $1 + \beta \cdot \dot{K}$, а для положительной обратной связи справедлива запись $1 - \beta \cdot \dot{K}$, т.е. отличие лишь в знаке. Отсюда следует, что положительная обратная связь приводит к повышению коэффициента усиления каскада, а отрицательная обратная связь – наоборот, к его понижению. А чем больше фактор обратной связи, тем меньше коэффициент усиления.

11.7. Автогенераторы

Автогенератором называют техническое устройство, которое благодаря обязательному наличию положительной обратной связи формирует незатухающие колебания, потребляя для этой цели энергию от источника питания. В числе обязательных составляющих автогенераторов выступают усилитель, резонансная система и взаимно объединяющая их цепь положительной обратной связи. Она может

быть внутренней (например, как в туннельных диодах) или внешней. Автогенераторы могут вырабатывать сигналы различных форм, например, синусоидальной, прямоугольной, треугольной и других. Частоты выходных колебаний различных генераторов сигналов могут лежать в чрезвычайно широких пределах от долей герца до частот, соответствующих световому диапазону.

При включении автогенератора в его колебательном контуре возникают затухающие колебания, связанные с протеканием тока, с различными переходными процессами и прочим. Частоту колебаний в резонансном контуре можно найти по формуле [42, с. 401]:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_k \cdot L_k}}, \text{ рад/с,}$$

где C_k – ёмкость колебательной системы, Ф, а L_k – её индуктивность, Гн.

Благодаря положительной обратной связи, сигнал, поступающий на вход усилительного каскада, приходит в фазе с выходным сигналом, который подводят к колебательной системе. Затем усиленный сигнал с неё снова приходит на вход усилителя, и процесс, если будут соблюдены все условия возникновения автоколебаний, будет повторяться до тех пор, пока амплитуда выходного напряжения не перестанет возрастать. Самовозбуждение имеет место при наличии балансов фаз и амплитуд. И, кроме того, при поступлении сигнала с выхода на вход усилительного компонента, при отсутствии флуктуаций амплитуды и фазы генерируемого сигнала.

Некоторые устройства (электронные часы, доплеровские локаторы и другие) предъявляют жёсткие требования к стабильностям частот генераторов. Для получения заданной стабильности частоты иногда применяют каскады с кварцевыми резонаторами.

В транзисторном автогенераторе Ральфа Хартлея по схеме с общим истоком, между затвором и стоком имеет место ёмкостная составляющая по переменному току; а между затвором и истоком, а также между стоком и истоком присутствуют индуктивные состав-

ляющие. Принципиальная схема индуктивной трёхточки изображена на рис. 11.10.

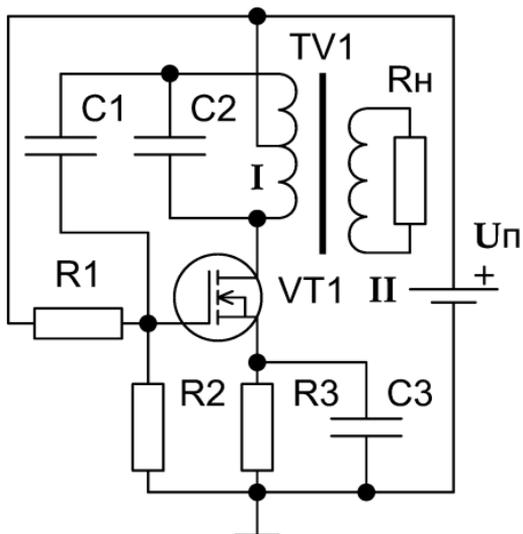


Рис. 11.10. Автогенератор Хартлея

Выходной сигнал с колебательной системы, образованной первичной обмоткой TV1 и конденсатором C2, через конденсатор C1 поступает на затвор транзистора VT1. Резисторы R1 и R2 обеспечивают необходимое смещение, а компоненты C3 и R3 нужны для термостабилизации автогенератора.

В автогенераторном транзисторном каскаде системы Колпитца между затвором и стоком присутствует индуктивная составляющая; а между затвором и истоком, а также между стоком и истоком имеют место ёмкостные составляющие. Принципиальная схема ёмкостной трёхточки изображена на рис. 11.11.

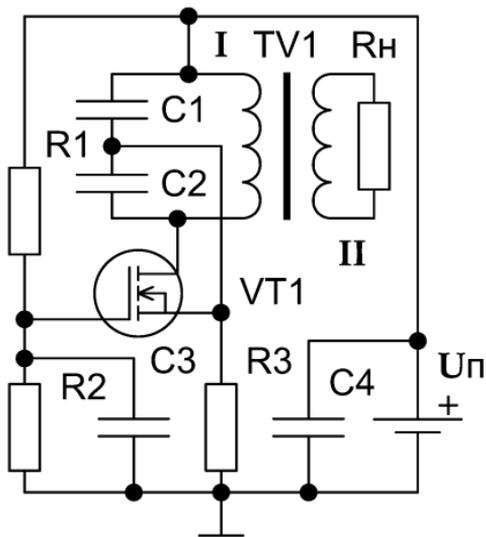


Рис. 11.11. Автогенератор Колпитца

В данном случае усилительный каскад нагружен на резонансный контур, представленный компонентами TV1, C1 и C2. Исток транзистора VT1 подключён в точку соединения конденсаторов C1 и C2.

11.8. Усилители постоянного тока

Усилителем постоянного тока (УПТ) называют такое устройство с гальванической связью между каскадами, которое может усиливать не только переменную составляющую сигнала в некотором диапазоне частот, но и, самое главное, его постоянную составляющую. УПТ подразделяют на однокаскадные и многокаскадные системы; на приборы с преобразованием сигнала и обладающие прямым усилением [169, с. 162].

11.8.1. Усилитель постоянного тока с непосредственными связями

Принципиальная схема простейшего усилителя постоянного тока с непосредственными связями с двумя биполярными п-р-п транзисторами приведена на рис. 11.12.

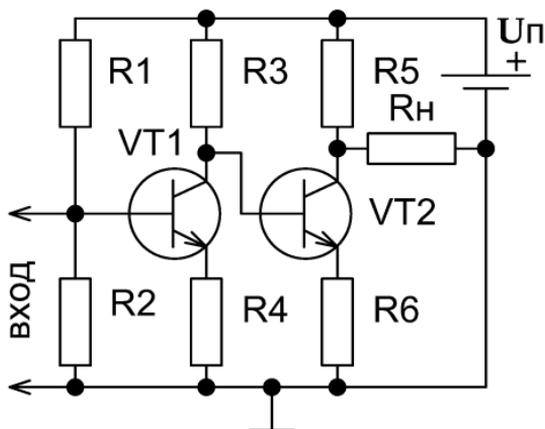


Рис. 11.12. УПТ с непосредственными связями

Важной особенностью УПТ выступает то, что с выхода помимо переменной составляющей сигнала на вход следующего каскада поступает некоторая постоянная составляющая. Следовательно, для сохранения положения рабочей точки второго каскада сопротивление эмиттерного резистора R_6 должно быть выше, чем эмиттерного резистора R_4 предыдущего каскада, что инициирует возрастание глубины ООС [39, с. 259]. А сопротивление коллекторного резистора R_5 второго каскада должно быть ниже, чем сопротивление резистора R_3 предыдущего каскада. Описанные причины выбора номиналов компонентов приводят к тому, что всякий последующий каскад имеет более низкий коэффициент усиления, нежели предыдущий, что является недостатком.

В усилительных каскадах имеют место различные изменения параметров компонентов, смещения рабочих точек транзисторов ввиду непостоянства питающего напряжения, при перепадах температур и прочем. Всё это инициирует нежелательные медленные флюктуации выходных сигналов усилительных каскадов. Из-за гальванической связи между каскадами на входе следующего каскада происходит появление изменений, которые были вызваны предыдущим каскадом. Флюктуации сигнала на выходе усилителя постоянного тока, которые не связаны с входным сигналом и обусловлены сугубо внутренними процессами, называют дрейфом нуля. Чем существенней дрейф нуля, тем труднее обеспечить высокую чувствительность усилителя. Количественно напряжение дрейфа нуля относительно входа можно вычислить согласно формуле [39, с. 260; 169, с. 165]:

$$U_{др.вх} = U_{др.вых} / K,$$

где $U_{др.вых}$ – наибольшая флюктуация выходного напряжения при отсутствии сигнала на входе в течение заданного времени наблюдения, В;

а K – это коэффициент усиления.

Большой дрейф нуля – это ещё один недостаток рассмотренного УПТ с непосредственными связями. Меньшим дрейфом нуля обладают балансные дифференциальные усилительные каскады, что относят к их неоспоримым достоинствам.

11.8.2. Дифференциальный усилитель

Принципиальная схема дифференциального усилителя постоянного тока с двумя МДП-транзисторами изображена на рис. 11.13.

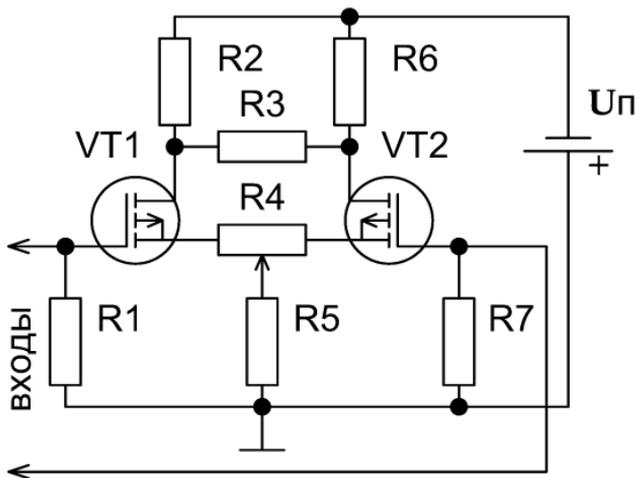


Рис. 11.13. Дифференциальный каскад УПТ

В данном каскаде транзисторы VT1 и VT2 должны обладать как можно более близкими параметрами и характеристиками. В идеале их усилительные качества должны быть равны. Должны быть по возможности одинаковы номинальные сопротивления коллекторных резисторов R2 и R6, а также сопротивления входных резисторов R1 и R7, задействованных половинок переменного резистора R4. Так как на практике получить полную идентичность плеч невозможно, регулировкой сопротивления резистора R4 добиваются некоторой симметрии плеч каскада УПТ. По резистору R5 течёт ток, равный сумме токов истоков обоих транзисторов VT1 и VT2. Выходное напряжение падает на нагрузке, роль которой играет резистор R3.

Если на оба входа, то есть между затворами и истоками транзисторов VT1 и VT2, подадим равные отпирающие напряжения, то это приведёт к идентичному приоткрыванию транзисторов, одинаково-

му увеличению токов через резисторы R2 и R6, и протекание тока через нагрузку R3 будет отсутствовать. По резистору R5 будет течь ток.

Если на один из входов, например, между затвором и истоком транзистора VT1, подадим более высокое отпирающее напряжение, чем на другой вход, то ток стока транзистора VT1 возрастёт, а ток стока транзистора VT2 станет, наоборот, меньше из-за того, что протекающий по резистору R5 ток неизменен.

Важным достоинством дифференциальных УПТ выступает низкий дрейф нуля ввиду взаимной компенсации процессов дестабилизирующих изменений, а всё благодаря симметричному размещению компонентов каскада.

11.8.3. Операционные усилители

Операционный усилитель – это устройство, при использовании которого можно получить высокий коэффициент усиления, с высокоомным дифференциальным входом и низкоомным, часто несимметричным, выходом. Обычно под операционным усилителем подразумевают аналоговую микросхему, однако первый операционный усилитель, изготовленный в 1942 году в Америке Л. Джули, был выполнен на двух электронных лампах и был предназначен для выполнения математических операций. В состав операционных усилителей входят УПТ, источники стабильного тока и прочее. На входах операционных усилителей часто расположены дифференциальные усилительные каскады, которые позволяют получить высокое входное сопротивление. В выходных каскадах операционных усилителей, изготовленных по биполярной технологии, обычно размещены эмиттерные повторители. Это позволяет уменьшить выходное сопротивление операционных усилителей для облегчения согласования их с нагрузкой.

Каждый операционный усилитель может обеспечить коэффициент усиления по напряжению в сотни тысяч раз и даже больше.

Чтобы исключить возникновение автогенерации и повысить некоторые характеристики устройства, операционный усилитель охватывают отрицательной обратной связью путём подключения к нему между входом и выходом корректирующих цепей, состоящих обычно из резисторов и конденсаторов, причём для операционных усилителей разных марок предназначены вполне определённые цепи коррекции. Практически все параметры каскада, выполненного на операционном усилителе, зависят исключительно от обратных связей. Операционный усилитель обычно имеет инвертирующий и неинвертирующий входы, выходы для подсоединения корректирующих цепей, выходы подключения к источнику питания и нагрузке.

Операционные усилители могут обладать перестраиваемыми параметрами, быть быстродействующими, мощными, предназначенными для применения в устройствах широкого потребления. Корпуса мощных операционных усилителей обычно обладают поверхностями, которые надлежит крепить к охладителям.

11.8.4. Обзор некоторых параметров операционных усилителей

Ниже будут перечислены некоторые важнейшие параметры операционных усилителей.

- Постоянное, в основном дуполярное, напряжение питания (В) и потребляемый ток (мА).
- Коэффициент усиления по напряжению сигнала, поданного на дифференциальный вход.
- Входное сопротивление, у отдельных марок компонентов достигающее 10^7 Ом.
- Максимально допустимый выходной ток, мА.
- Частота единичного усиления (на которой коэффициент усиления падает до единицы), МГц.

- Коэффициент ослабления синфазного сигнала, выраженный в децибелах, обычно от 70 дБ до 125 дБ.
- Скорость нарастания выходного напряжения при поступлении на вход короткого импульса, характеризующая быстродействие: $K_n = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta t$ (В / мкс).
- Напряжение смещения нуля, то есть такое напряжение, поданное, когда нет входного сигнала, на вход операционного усилителя, в результате чего выходное напряжение отсутствует, мкВ.
- Температурный дрейф смещения, мкВ.
- Эквивалентное напряжение входного шума, нВ / $\sqrt{\text{Гц}}$.

Список литературы

1. Аваев Н. А., Наумов Ю. Е., Фролкин В. Т. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1991.
2. Аваев Н. А., Шишкин Г. Г. Электронные приборы. – М.: МАИ, 1996.
3. Акаев А. А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации. – М.: Высшая школа, 1988.
4. Алексенко А. Г. Основы микросхемотехники. – 3-е изд. – М.: ЮНИМЕДИАСТАЙЛ, 2002.
5. Алексенко А. Г., Коломбет Е. А., Стародуб Г. И. Применение прецизионных аналоговых микросхем. – М.: Радио и связь, 1981, 304 с.
6. Алексенко А. Г., Шагурин И. И. Микросхемотехника. – М.: Радио и связь, 1982, 416 с.
7. Антипов Б. Л. и др. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы. Учебное пособие для вузов по специальностям электронной техники. / Б. Л. Антипов, В. С. Сорокин, В. А. Терехов; Под ред. В. А. Терехова. – М.: Высшая школа, 1990, 208 с., ил.
8. Аренков А. Б. Печатные и плёночные элементы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1974, 314 с.
9. Аронов В. А., Федотов Я. А. Испытания и исследования полупроводниковых приборов. – М.: Высшая школа, 1975.
10. Баев Б. П. Микропроцессорные системы бытовой техники, 2-е издание. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2005, 480 с.
11. Баранчиков М. Л. Микромагнитоэлектроника. Том 1. – М.: ДМК Пресс, 2001, 544 с.
12. Барканов Н. А., Быстров О. В. и др. Конструирование микромодульной аппаратуры. – М.: Советское радио, 1968, 415 с.
13. Барчихин А. А., Григорьевский М. И., Ходорович А. М. Руководство по оборудованию и организации лаборатории «Общая

- электротехника с основами электроники». – М.: Высшая школа, 1980, 53 с.
14. Белов А. В. Самоучитель по микропроцессорной технике, 2-е издание. – СПб.: Наука и Техника, 2007, 256 с.
 15. Березин А. С., Мочалкина О. Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. / Под ред. И. П. Степаненко. – М.: Радио и связь, 1983.
 16. Берзин А. А. Основы квантовой механики: Учебное пособие. / А. А. Берзин, В. Г. Морозов. – М.: МИРЭА, 2008, 268 с.
 17. Берри Р., Холл П., Гаррис М. Тонкоплёночная технология. Перевод с англ. – М.: Энергия, 1972, 336 с.
 18. Бочаров Л. Н. Электронные приборы. – М.: Энергия, 1980, 362 с.
 19. Браммер Ю. А., Пашук И. Н. Импульсная техника: Учебник. – М.: Форум: Инфра-М, 2005, 208 с. – (Профессиональное образование).
 20. Броддай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии: Пер. с англ. / Под ред. А. В. Шальнова. – М.: Мир, 1985.
 21. Букреев И. Н. и др. Микроэлектронные схемы цифровых устройств. – М.: Советское радио, 1973.
 22. Буланов Ю. А., Глаголев Г. И. Основы электроники. – М.: Высшая школа, 1966, 347 с.
 23. Быков Р. Е. Теоретические основы телевидения: Учебник для вузов по направлению «Радиотехника». – СПб.: Лань, 1988, 288 с.
 24. Быстров Ю. А. Электронные цепи и микросхемотехника: Учебник / Ю. А. Быстров. – М.: Высшая школа, 2002, 384 с.
 25. Быстров Ю. А., Мироненко И. Г. Электронные цепи и устройства: Учебное пособие для электротехнических и энергетических вузов. – М.: Высшая школа, 1989, 287 с.
 26. Валенко В. С. Электроника и микросхемотехника: учебное пособие / В. С. Валенко, М. С. Хандогин. – Мн.: Беларусь, 2000, 320 с.

27. Валиев К. А., Кармазинский А. Н., Королев М. А. Цифровые интегральные схемы на МДП-транзисторах. – М.: Советское радио, 1971, 384 с.
28. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение: перевод с английского О. А. Алексеева. – М.: Атомиздат, 1975.
29. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юркин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: Диалог – МИФИ, 2003, 384 с.
30. Введение в микроэлектронику. Перевод с англ. под ред. И. П. Степаненко. – М.: Советское радио, 1968, 320 с.
31. Вениаминов В. Н., Лебедев О. Н., Мирошниченко А. И. Микросхемы и их применение. Справочное пособие. – М.: Радио и связь, 1989.
32. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. 2-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Радио и связь, 1990, 264 с.
33. Волстон Джозеф. Расчёт схем на транзисторах. Перевод с английского. – М.: Энергия, 1969, 584 с., ил.
34. Ворощук А. Н. Основы ЦВМ и программирование. – М.: Наука, 1978, 464 с.
35. Высоцкий Б. Ф. и др. Конструирование микроэлектронной аппаратуры. – М.: Советское радио, 1975.
36. Гаврилов С. Н., Никулин С. М. Микроэлектроника. – М.: Энергия, 1970.
37. Гайно Е., Москатов Е. Радиолобительские расчёты на компьютере. – Радио, 2005, №6, с. 55, 56; №7, с. 55, 56.
38. Гершензон Е. М., Полянина Г. Д., Соина Н. В. Радиотехника. – М.: Просвещение, 1986.
39. Гершунский Б. С. Основы электроники. – Киев, Издательское объединение «Вища школа», 1977, 344 с., ил.
40. Гитис Э. И., Пискулов Е. А. Аналого-цифровые преобразователи. – М.: Энергия, 1981.

41. Глудкин О. П., Черняев В. Н. Технология испытания микроэлементов радиоэлектронной аппаратуры и интегральных микросхем. – М.: Энергия, 1980.
42. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие для вузов / И. С. Гоноровский. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Дрофа, 2006, 719 с.: ил. – (Классики отечественной науки).
43. Горелик С. С., Дашевский М. Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. – М.: Металлургия, 1988.
44. Гусев В. Г. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – 3-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Высшая школа, 2004, 790 с.
45. Данилин Б. С. Вакуумное нанесение тонких плёнок. – М.: Энергия, 1967, 312 с.
46. Демидович Н. Б., Монахов В. М. Программирование и ЭВМ. – М.: Просвещение, 1977, 230 с.
47. Епифанов Г. И. Физические основы микроэлектроники. – М.: Советское радио, 1971, 375 с.
48. Ермолаев Ю. П., Пономарев М. Ф., Крюков Ю. Г. Конструкции и технология микросхем / Под ред. Ю. П. Ермолаева. – М.: Советское радио, 1980.
49. Ефимов И. Е. Современная микроэлектроника. – М.: Советское радио, 1973, 112 с.
50. Ефимов И. Е. и др. Микроэлектроника. Проектирование, виды микросхем, новые направления: Учебное пособие для вузов. / И. Е. Ефимов, Ю. И. Горбунов, И. Я. Козырь. – М.: Высшая школа, 1978, 312 с., ил.
51. Ефимов И. Е., Козырь И. Я. Основы микроэлектроники, 3-е издание. – СПб.: Лань, 2008, 384 с.
52. Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов Ю. И. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надёжность: Учебное пособие для приборостроительных специальных вузов. – 2-

- е изд., переработанное и дополненное. – М.: Высшая школа, 1986, 464 с., ил.
53. Жеребцов И. П. Основы электроники. – 5-е издание, переработанное и дополненное. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1989, 352 с.
 54. Забродин Ю. С. Промышленная электроника, 2-е изд., стер: Учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – М.: Альянс, 2008, 496 с.
 55. Зайцев Ю. В., Марченко А. Н. Полупроводниковые стабилизаторы. – М.: Энергия, 1969.
 56. Зверев Г. М., Голяев Ю. Д. Лазеры на кристаллах и их применение. – М.: Рикел, Радио и связь, 1994.
 57. Зельдин Е. А. Импульсные устройства на микросхемах. – М.: Радио и связь, 1991, 160 с.
 58. Зельдин Е. А. Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре. – Л.: Энергоатомиздат, 1986, 280 с.
 59. Иванов-Есипович Н. К. Инженерные основы плёночной микроэлектроники. – М.: Энергия, 1968, 174 с.
 60. Иванов-Есипович Н. К. Технология микросхем. – М.: Высшая школа, 1972, 256 с.
 61. Игнатов А. Н. Оптоэлектронные приборы и устройства. – М.: Эко-Трендз, 2006, 272 с.
 62. Игумнов Д. В., Королев Г. В., Громов И. С. Основы микроэлектроники. – М.: Высшая школа, 1991.
 63. Измерение параметров цифровых интегральных микросхем. / Д. Ю. Эйдукас, Б. В. Орлов, Л. М. Попель и др.; Под ред. Д. Ю. Эйдукаса, Б. В. Орлова. – М.: Радио и связь, 1982.
 64. Изюмов Н. М., Линде Д. П. Основы радиотехники – М.: Радио и связь, 1983.
 65. Интегральные схемы. Перевод с англ. под ред. А. А. Колосова. – М.: Советское радио, 1968, 263 с.

66. Интегральные схемы. Основы проектирования и технологии. Перевод с англ. под ред. К. И. Мартюшова. – М.: Советское радио, 1970, 592 с.
67. Калабеков Б. А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000, 336 с.
68. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника. – М.: Высшая школа, 2000, 542 с.
69. Киреев М. А. Современные зарубежные микросхемы – усилители звуковой частоты: Справочник – М.: Горячая линия – Телеком, 2004, 520 с.: ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1266).
70. Киселев А. Б. Металлооксидные катоды электронных приборов. – М.: МФТИ, 2001.
71. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела: перевод с английского. / Под ред. А. А. Гусева. – М.: Наука, 1978.
72. Коваленко А. А., Петропавловский М. Д. Основы микроэлектроники. Учебное пособие, 2-е издание. – М.: Академия, Учебное пособие, 2008, 240 с.
73. Колонтаевский Ю. Ф. Радиоэлектроника. – М.: Высшая школа, 1988.
74. Колосов Л. Н. Введение в инженерную микроэлектронику. – М.: Советское радио, 1974.
75. Колосов А. А., Горбунов Ю. И., Наумов Ю. Е. Полупроводниковые твёрдые схемы. – М.: Советское радио, 1966, 503 с.
76. Конструирование и расчёт больших гибридных интегральных схем, микросборок и аппаратуры на их основе. / Под ред. Б. Ф. Высоцкого. – М.: Радио и связь, 1981.
77. Копылов П. М., Тачков А. Н. Телевидение и голография. – М.: Связь, 1976, 166 с.
78. Кормилицын О. П. Механика материалов и структур нано- и микротехники: Учеб. пособие для вузов / О. П. Кормилицын, Ю. А. Шукейло. – М.: Академия, 2008, 216 с.

79. Кноль М., Эйхмейер И. Техническая электроника, т. 1. Физические основы электроники. Вакуумная техника, перевод с немецкого. – М.: Энергия, 1971.
80. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. В 2-х томах. – М.: Техносфера, 2002, 416 с.: ил.
81. Крекрафт Д., Джерджи С. Аналоговая электроника. Схемы, системы, обработка сигнала. – М.: Техносфера, 2005, 360 с.
82. Крендалл И. Б. Акустика. 3-е издание. – М.: КомКнига, 2007, 168 с.
83. Кузин А. В., Жаворонков М. А. Микропроцессорная техника. Учебник. 4-е издание. – М.: Академия, 2008, 304 с.
84. Куневич А. В., Подольский А. В., Сидоров И. Н. Ферриты: Энциклопедический справочник в 5 томах. Т. 1. Магниты и магнитные системы. – СПб.: Информационно-издательское агентство «ЛИК», 2004, 358 с.: ил.
85. Курбатов Л. Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазона спектра. – М.: Изд. МФТИ, 1999.
86. Курносов А. И., Брук В. А. Основы полупроводниковой микроэлектроники. – М.: Высшая школа, 1980.
87. Курносов А. И., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1979.
88. Кучумов А. И. Электроника и схмотехника: учебное пособие / А. И. Кучумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Гелиос АРВ, 2004, 336 с.
89. Кхамбата А. Большие интегральные схемы. Перевод с англ. под ред. Б. И. Ермолаева. – М.: Мир, 1971, 256 с.
90. Лачин В. И., Савелов Н. С. Электроника: Учеб. пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2002, 576 с.
91. Левин Б. Р. Теория надёжности радиотехнических систем. – М.: Радио и связь, 1983.

92. Лозовский В. Н. Нанотехнологии в электронике, 2-е изд., испр.: Введение в специальность: Учеб. пособие для вузов / В. Н. Лозовский, Г. С. Константинова, С. В. Лозовский. – СПб.: Лань, 2008, 327 с.
93. Малорацкий Л. Г., Явич Л. Р. Проектирование и расчёт СВЧ-элементов на полосковых линиях. – М.: Советское радио, 1972.
94. Малышева И. А. Технология производства микроэлектронных устройств. – М.: Энергия, 1980.
95. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1990.
96. Мелешко Е. А. Быстродействующая импульсная электроника. – М.: Физматлит, 2007, 320 с.
97. Микаэлян А. Л. Оптические методы в информатике. – М.: Наука, 1990.
98. Микросхемы и их применение. / В. А. Батушев, В. Н. Вениаминов, В. Г. Ковалёв и др. – М.: Энергия, 1978, 248 с.
99. Микроэлектроника. Перевод с англ. под ред. Н. П. Богородицкого. – М.: Советское радио, 1966, 452 с.
100. Миниатюризация и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Перевод с англ. под ред. Н. А. Баркакова, М. С. Лихачева. – М.: Мир, 1965, 388 с.
101. Морган Джонс. Ламповые усилители. – М.: ДМК Пресс, 2007, 760 с.
102. Морозова И. Г. Физика электронных приборов. Учебник для вузов. – М.: Атомиздат, 1980.
103. Москатов Е. Расчёт параметрических стабилизаторов. – Радиомир, 2006, №7, с. 22 – 25.
104. Москатов Е. Устройство и особенности плазменных панелей. – Радиолобитель, 2009, №8, с. 6, 7.
105. Мэндл М. 200 избранных схем электроники. – М.: Мир, 1980, 344 с.

106. Нарышкин А. К. Цифровые устройства и микропроцессоры, 2-е изд., стер: Учеб. пособие для вузов / А. К. Нарышкин. – М.: Академия, 2008, 318 с.
107. Наундорф Уве. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование. – М.: Техносфера, 2008, 472 с.
108. Наумов Ю. Е. Интегральные логические схемы. – М.: Советское радио, 1971, 432 с.
109. Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2005.
110. Ненашев А. П., Коледов Л. А. Основы конструирования микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1981.
111. Новаковский С. В., Котельников А. В. Новые системы телевидения. Цифровые методы обработки видеосигналов. – М.: Радио и связь, 1992, 88 с.
112. Новиков Ю. В., Скоробогатов П. К. Основы микропроцессорной техники, 3-е издание. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, интернет–университет информационных технологий, 2006, 360 с.
113. Носов Ю. Р., Сидоров А. С. Оптроны и их применение. – М.: Радио и связь, 1981, 280 с., ил.
114. Общая электротехника с основами электроники. / В. А. Гаврилюк, Б. С. Гершунский, А. В. Ковальчук, Ю. А. Куницкий, А. Г. Шаповаленко. – М.: Высшая школа, 1980.
115. Опадчий Ю. Ф., Глудкин О. П., Гуров А. И. Аналоговая и цифровая электроника. Полный курс. Учебник. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2007, 768 с.
116. Ормонт Б. Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников. / Под ред. В. М. Глазова. – М.: Высшая школа, 1982.
117. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры. / Под ред. Б. Ф. Высоцкого. – М.: Советское радио, 1977.

118. Основы технологии кремниевых интегральных схем. Перевод с англ. под ред. В. Н. Мордковича и Ф. П. Пресса. – М.: Мир, 1969, 451 с.
119. Павлов В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учеб. пособие для вузов / В. Н. Павлов. – М.: Академия, 2008, 288 с.
120. Паначевный Б. И. Курс электротехники. – Харьков: Торсинг, Ростов н/Д: Феникс, 2002, 288 с.
121. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1986.
122. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. – М.: Высшая школа, 1987.
123. Петровский И. И. Электронная теория полупроводников. – Минск, Высшая школа, 1964.
124. Пономарев М. Ф. Конструкции и расчёт микросхем и микроэлементов ЭВА. – М.: Радио и связь, 1982.
125. Поляков В. Т. Посвящение в радиоэлектронику. – М.: Радио и связь, 1988.
126. Попов В. С., Николаев С. А. Общая электротехника с основами электроники. – М.: Энергия, 1976, 568 с.
127. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы. – М.: Высшая школа, 1976, 335 с., ил.
128. Пролейко В. М., Чекмарев А. А. Качество, надёжность и долговечность электронных приборов. – М.: Энергия, 1972.
129. Прохорский А. А. Основы автоматики и телемеханики. – М.: Высшая школа, 1988.
130. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2004.
131. Рабинович Э. А. Сборник задач и упражнений по общей электротехнике. – М.: Энергия, 1978, 304 с.
132. Ревич Ю. Занимательная микроэлектроника. – СПб.: ВHV–СПб, 2007, 592 с.

133. Ричман П. Физические основы работы полевых транзисторов с изолированным затвором. – М.: Советское радио, 1971.
134. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа, 1990.
135. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. – М.: Высшая школа, 1991.
136. Свечников С. В. Элементы оптоэлектроники. – М.: Советское радио, 1967.
137. Севин Л. Полевые транзисторы. – М.: Советское радио, 1968.
138. Сергеев В. С., Воженин И. М. Интегральные гибридные микросхемы. – М.: Советское радио, 1973, 62 с.
139. Силовая электроника: Примеры и расчёты. / Ф. Чаки, И. Герман, И. Ипшич и др. Перевод с английского. – М.: Энергоиздат, 1982, 384 с.
140. Слепов Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и связь, 2003.
141. Смайт В. С. Электротехника и электродинамика. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1954, 604 с., ил.
142. Смирнов А. В. Основы цифрового телевидения: Учебное пособие. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001, 224 с.
143. Смирнов Н. И., Широков В. Б. Оценка безотказности интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1983.
144. Справочник по интегральным микросхемам. Под ред. Б. В. Табраина. – М.: Энергия, 1983, 528 с.
145. Справочник по основам электронной техники. Гершунский Б. С., Романовская А. В., Ващенко Н. М., Власенко В. В. – К.: Издательство Киевского университета, 1972, 346 с.
146. Справочник по радиоэлектронным устройствам. В 2-х томах. Т. 2 / Варламов Р. Г., Додик С. Д., Иванов-Цыганов А. И. и др.; Под ред. Д. П. Линде. – М.: Энергия, 1978, 328 с., ил. (Радиоэлектроника).
147. Справочник по электрическим конденсаторам / М. Н. Дьяков, В. И. Карабанов, В. И. Присняков и др.; Под общей редак-

- цией И. И. Четверткова и В. Ф. Смирнова. – М.: Радио и связь, 1983, 576 с.; ил.
148. Стародубцев Ю. Н., Белозеров В. Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2002, 384 с.
149. Стародубцев Ю. Н. Теория и расчёт трансформаторов малой мощности. – М.: ИП РадиоСофт, 2005, 320 с., ил.
150. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001, 488 с.: ил.
151. Стрижевский И. В. и др. Хемотроника. – М.: Наука, 1974.
152. Стрыгин В. В. Основы автоматики и вычислительной техники. – М.: Энергоиздат, 1981
153. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. – М.: Металлургия, 1987, 328 с., ил.
154. Суздаев И. П. Нанотехнологии: физикохимия нанокластеров, полевая ионизация и полевое испарение. Пер. с англ. – М.: КомКнига, 2006.
155. Таруи Я. Основы технологии СБИС: Перевод с японского. / Под ред. В. Г. Ржанова. – М.: Радио и связь, 1985.
156. Телевидение: Учебник для вузов / В. Е. Джакония, А. А. Гоголь, Я. В. Друзин и др.; Под ред. В. Е. Джаконии. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2004, 616 с.: ил.
157. Терехов В. А. Задачник по электронным приборам. Учебное пособие. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Лань, 2003.
158. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Перевод с немецкого. – М.: Мир, 1982, 512 с., ил.
159. Тищенко Н. М., Машлыкин В. Г. Динисторы и тиристоры и их применение в автоматике. – М. – Л.: Энергия, 1966.
160. Топфер М. Микроэлектроника толстых плёнок. Перевод с английского. – М.: Мир, 1973, 260 с.

161. Транзисторы: Справочник / О. П. Григорьев, В. Я. Замятин, Б. В. Кондратьев, С. Л. Пожидаев. – М.: Радио и связь, 1990, 272 с.: ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1144).
162. Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
163. Турута Е. Ф. Предварительные усилители низкой частоты. Справочник. – М.: Патриот, 1997, 188 с.
164. Турута Е. Ф. Усилители мощности низкой частоты – интегральные микросхемы. Справочник. – М.: Патриот, 1997, 192 с.
165. Угрюмов Е. Цифровая схемотехника: учебное пособие / Е. Угрюмов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004, 528 с.
166. Удалов Н. П. Полупроводниковые датчики. – М. – Л.: Энергия, 1965.
167. Ушаков В. Н. Основы радиоэлектроники. – М.: Высшая школа, 1979.
168. Ушаков В. Н., Долженко О. В. Электроника: от транзистора до устройства. – М.: Радио и связь, 1983, 320 с.
169. Федотов В. И. Основы электроники: Учебное пособие для учащихся не электротехнических специальностей техникумов. – М.: Высшая школа, 1990, 288 с.: ил.
170. Фигьера Бернар, Кноэрт Робер. Введение в электронику. – М.: ДМК Пресс, 2001, 208 с.
171. Фомин А. В., Боченков Ю. И., Сорокопуд В. А. Технология, надёжность и автоматизация производства БГИС и МСБ. – М.: Радио и связь, 1981.
172. Фотолитография и оптика. / Под ред. Я. А. Федотова и Г. Поля. – М.: Советское радио, 1974.
173. Фрике К. Вводный курс цифровой электроники. – М.: Техносфера, 2003.
174. Хабловски И., Скулимовски В. Электроника в вопросах и ответах. / Под редакцией В. И. Котикова. – М.: Радио и связь, 1984, 304 с.

175. Харченко В. М. Основы электроники: Учебное пособие для техникумов. – М.: Энергоиздат, 1982, 352 с., ил.
176. Хернитер Марк Е. 10 увлекательных проектов аналоговой электроники: Пер. с англ. / М. Е. Хернитер. – М.: ДМК Пресс, 2008, 169 с.
177. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники, 6-е издание. – М.: Мир, 2003, 704 с.
178. Хотунцев Ю. Л., Лобарев А. С. Основы радиоэлектроники. Учебное пособие для студентов физических и технологико-экономических факультетов, а также факультетов технологии и предпринимательства пединститутов и педуниверситетов. – М.: Агар, 2000, 288 с., ил.
179. Цифровое преобразование изображений: Учебное пособие для вузов / Р. Е. Быков, Р. Фрайер, К. В. Иванов, А. А. Манцветов; Под ред. проф. Р. Е. Быкова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003, 228 с.
180. Цымбалюк В. С., Крюков Ю. Г., Грибов Э. Б. Миниатюризация приёмо-усилительной аппаратуры. – М.: Связь, 1968, 208 с.
181. Чернышев Е. Т., Чечурина Е. И., Чернышева Н. Г., Студенцов Н. В. Магнитные измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1969, 248 с.
182. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем. / Под ред. А. А. Васенкова. – М.: Энергия, 1977.
183. Чистяков Ю. Д., Райнов Ю. П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. – М.: Металлургия, 1979.
184. Шагурин И. И. Транзисторно-транзисторные логические схемы. / Под ред. Ю. Е. Наумова. – М.: Советское радио, 1974.
185. Шалимова К. В. Физика полупроводников. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
186. Шешин Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. – М.: Издательство МФТИ, 2001.

187. Шилов В. Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. / Под ред. Е. И. Гальперина. – М.: Советское радио, 1974.
188. Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964, 775 с., ил.
189. Штернов А. А. Физические основы конструирования, технологии РЭА и микроэлектроники. – М.: Радио и связь, 1981.
190. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. – М.: Мир, 1991.
191. Щелкин К. И. Физика микромира. – М.: Атомиздат, 1965.
192. Щука А. А. Микроэлектроника СВЧ-диапазона волн. – М.: МИРЭА, 1998.
193. Щука А. А. Нанозлектроника. Учебное пособие. – М.: Физматкнига, 2007.
194. Щука А. А. Электроника. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ–Петербург, 2008, 752 с.: ил. – (Учебная литература для вузов).
195. Эвелто Орацио. Принципы лазеров, 4-е изд.: Учеб. пособие для вузов: Пер. с англ. / О. Эвелто. – СПб.: Лань, 2008, 719 с.
196. Электронно-лучевая технология в изготовлении микроэлектронных приборов. / Дж. Р. Брюэр, Д. С. Гринич, Д. Р. Херриот и др.; Под ред. Дж. Р. Брюэра: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1984.
197. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / В. В. Кононенко, В. И. Муханов, В. Ф. Планидин, П. М. Чеголин; под ред. В. В. Кононенко. – Изд. 4-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2008, 778 с. – (Высшее образование).
198. Эндерлайн Р. Микроэлектроника для всех. – М.: Мир, 1989.
199. Яблонский Ф. М., Троицкий Ю. В. Средства отображения информации. – М.: Высшая школа, 1985.
200. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and P. C. Eklund, Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes, Academic Press, Inc., 1996.

Предметный указатель

О

OLED

- с активным дисплеем, 147
- с пассивным дисплеем, 147

А

- Автогенератор, 175
 - Колпитца, 177
 - Хартля, 176
- Автотрансформатор, 21
- Аквадаг, 141
- Анод, 106

В

- Варикапная матрица, 53
- Варистор, 15
- Время жизни носителя заряда, 24
- Время отклика, 144

Г

- Генерация носителей зарядов, 24
- Гетеропереход, 36
 - анизотипный, 36
 - изотипный, 36
- Гетероструктура, 36
- Голограмма, 152
- Голографическая система, 151
- Графен, 18

Д

Диод

- анод диода, 47
- база диода, 48
- варикап, 52
- выпрямительный, 50
- Ганна, 37
- идеальный, 46
- импульсный, 51
- катод диода, 47
- лазерный, 57
- плоскостной, 48
- полупроводниковый, 46
- реальный, 46
- светодиод, 56
- стабилитрон, 32, 53
- стабистор, 55
- точечный, 31, 47
- туннельный, 43
- формовка диода, 48
- фотодиод, 59
- Шоттки, 35
- Диодная сборка, 50
- Диффузионная длина, 24
- Диффузия, 28
- Диэлектрик, 22
- Добротность, 53
- Домен электростатический, 39
- Дрейф, 24
- Дроссель, 19
- Дырка, 23

Е

Ёмкость

барьерная, 31, 52
варикапа, 52
входная, 113
выходная, 113
диффузионная, 31, 52
конденсатора, 16
проходная, 113

Ж

Жидкие кристаллы
нематические, 142
смектические, 142
холестерические, 142

И

Индикатор, 137
единичный, 137
матричный, 137
одноразрядный, 137
светодиодный, 137
сегментный, 137
Инжекция, 30
Интегральная чувствительность,
73
Интерференционная картина,
151
Ионистор, 17
Ионное легирование, 29

К

Канал, 40, 76
Каскад
двухтактный
бестрансформаторный, 164
двухтактный
трансформаторный, 161

однотактный
трансформаторный, 159
усилительный, 158
Катод, 106
Катушка индуктивности, 18
Класс усиления, 166
А, 167
АВ, 168
В, 168
ВС, 169
С, 169
D, 170
Клистрон, 122
Конденсатор, 16
переменной ёмкости, 17
подстроечный, 17
постоянной ёмкости, 17
Коэффициент перекрытия, 53
Крайтрон, 128

Л

Лазер, 57
газовый, 57
на красителях, 57
полупроводниковый, 57
солитонный, 57
твердотельный, 57
Лампа бегущей волны, 119
Лампа обратной волны, 120
Легирование, 24

М

Магнетрон, 124
Магнитопровод, 18
Мазер, 126
Маска, 133
Микросхема
гибридная, 133, 135

интегральная, 132
плёночная, 132, 133
полупроводниковая, 132, 136
совмещённая, 133
толстоплёночная, 132
тонкоплёночная, 132

Н

Нагрузочная прямая, 87

Напряжение

насыщения, 79, 88

обратное, 53

отсечки, 80, 110

пробоя, 53

смещения ноля, 184

Негистор, 15

Нелинейные искажения, 155

О

Обмотки, 18

Обратная связь, 170

внутренняя, 171

искусственная, 171

отрицательная, 171

паразитная, 170

по напряжению, 171

по току, 172

положительная, 171

смешанная, 172

П

Пассивация, 32

Пентод, 118

Переход

коллекторный, 63, 96

несимметричный, 28

резкий, 28

симметричный, 28

Шоттки, 34

электронно-дырочный, 27

эмиттерный, 63, 96

Плазма, 145

Плазменной панель, 145

Поглотитель, 120, 121

Подложка, 29, 83, 85

Позистор, 16

Полоса пропускания, 154

Полупроводник, 23

i-типа, 23

вырожденный, 25

дырочного типа, 25

собственный, 23

электронного типа, 25

Потенциальный барьер, 52

Примесь

акцепторная, 25

донорная, 25

Пробой

r-n перехода, 32

зенеровский, 32

лавинный, 32, 98

тепловой, 33

туннельный, 32

Проводимость

примесная, 24

собственная, 24

Проводник, 22

Пьезотрансформатор, 21

Пьезоэффект, 21

Р

Рабочая точка, 87, 167

Режим

динамический, 86

ключевой, 88

насыщения, 88

отсечки, 88

Резистор, 14
металлофольговый, 14
переменный, 14
подстроечный, 14
постоянный, 14
проволочный, 14
регулируемый, 14
Резонатор Фабри-Перо, 58
Рекомбинация, 24, 27

С

Сверхпроводник, 22
Связка, 126
Сегнетодиэлектрик, 21
Сенсорный экран
ёмкостная технология, 149
инфракрасная технология,
150
по технологии ПАВ, 150
резистивная технология, 149

Сетка
антидинаatronная, 118
управляющая, 109
экранирующая, 113

Согласование, 154

Соленоид, 120

Спица, 126

Сплавление, 28

Спрайтрон, 130

Степень интеграции, 132

Т

Термогенерация, 24

Терморезистор, 16

Тетрод, 113

Тетрод лучевой, 116

Тиратрон, 127

Тиристор

динистор, 95
запираемый, 100
коэффициент запирающего, 100
симистор, 101
тринистор, 98
фототиристор, 103

ТКН, 54

Ток

диффузионный, 24
дрейфовый, 24
насыщения, 110
обратный, 30
при освещении, 73
прямой, 30
темновой, 59, 73

Транзистор, 61

IGBT, 90

n-p-n, 61

p-n-p, 61

биполярный, 62

БТИЗ, 90

высокочастотный, 62

диффузионный, 64

дрейфовый, 64

затвор, 76

исток, 76

магнитотранзистор, 41

маломощный, 62

МДП, 82

МОП, 82

мощный, 62

низкочастотный, 62

полевой, 76

с изолированным затвором,
76

с управляющим переходом,
76

сверхвысокочастотный, 62

средней мощности, 62

среднечастотный, 62

сток, 76

текнетрон, 77
униполярный, 76
унитрон, 77
фототранзистор, 72
Трансформатор, 20
Тригатрон, 128
Триод, 109
Тубелен, 148

У

Углеродная нанотрубка, 148
Угол отсечки, 167
Уравнение динамического режима, 87
Уровень Ферми, 26
Усилитель
 высокой частоты, 152
 дифференциальный, 180
 избирательный, 153
 низкой частоты, 152
 операционный, 182
 постоянного тока, 152, 178
 широкополосный, 152
Усилительный каскад, 152

Ф

Фазоинвертор, 163
Фонон, 23
Фотон, 58
Фуллерен, 148

Х

Характеристика
 амплитудная, 155
 амплитудно-частотная, 156
 анодная, 107, 111

анодно-сеточная, 110
вольтамперная, 15, 33, 43, 55
вольтфарадная, 52
входная статическая, 166
выходная статическая, 166
проходная динамическая, 165
спектральная, 56
стоковая, 81
стокзатворная, 80, 83, 85
фазовая, 157
яркостная, 56

Э

Экран, 141
Экстракция, 30
Электровacuумная лампа, 105
Электровacuумный диод, 106
Электронная пушка, 141
Электронно-лучевая трубка, 140
Энергетические зоны, 25
 запрещённая зона, 26
 зона валентности, 25
 зона проводимости, 26
Эпитаксия, 28
 гетероэпитаксия, 29
 гомоэпитаксия, 29
Эффект
 Ганна, 37
 динатронный, 116, 117
 Зеебека, 41
 квантовый, 43
 Нернста–Эттингсгаузена, 45
 Пельтье, 41
 поля, 40
 Суля, 40
 туннельный, 44
 Холла, 44