

А. В. ДЫКИН

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

*Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебника
для радиотехнических техникумов*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1965 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.385
Д 87

E-54/90
24.9.1965

В книге излагаются физические процессы, происходящие в электронных и полупроводниковых приборах, рассматриваются устройство этих приборов, параметры и их характеристики.

Каждая тема заканчивается контрольными вопросами, поэтому книга может оказаться полезной учащимся заочного отделения техникумов.

Книга предназначена в качестве учебника по курсу «Электронные и полупроводниковые приборы» для техникумов радиотехнической специальности.

Дыкин Александр Васильевич, Электронные и полупроводниковые приборы
М.—Л., изд-во „Энергия“, 312 стр. с илл.
Темплан 1964 г. № 286

* * *

Редактор *Л. Н. Бочаров*

Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Обложка художника *Н. Г. Яreshko*

Сдано в пр-во 21/IV 1965 г.

Подписано к печати 21/V 1965 г.

Бумага 84×108^{1/2}₃₂

15,99 п. л.

15,43 уч. изд. л.

T-06544

Тираж 56 000 экз.

Цена 64 коп.

Зак. 228

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В предлагаемой читателю книге излагаются материалы по курсу «Электронные и ионные приборы» для техникумов с учетом многолетнего опыта автора по преподаванию этого предмета.

От других учебников и учебных пособий по данной теме книга отличается добавлением сведений о полупроводниковых приборах. Для единства обозначений и терминологии в книге использована терминология, одобренная Комитетом по терминологии АН СССР, система обозначений — СИ (международная).

Автор приносит искреннюю благодарность всем лицам, просмотревшим рукопись и сделавшим ряд ценных замечаний: Г. В. Меньшову, А. Л. Михельсону, В. А. Андрееву и редактору рукописи Л. Н. Бочарову.

Автор будет благодарен всем читателям книги, которые пришлют свои замечания, пожелания по ее содержанию. Письма следует направлять в издательство «Энергия»: Москва, Ж-114, Шлюзовая набережная, д. 10.

Автор

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Введение	9
1-1. Электроника и ее задачи	9
1-2. Общие сведения об электронной лампе	10
1-3. Маркировка приемно-усилительных ламп	12
1-4. Вакуум	13
1-5. Газопоглотитель (геттер)	14
1-6. Классификация электровакуумных приборов	15
1-7. Краткий обзор развития электронных приборов	15
Контрольные вопросы	16
Глава вторая. Физические основы вакуумной электроники	17
2-1. Электроны и ионы	17
2-2. Движение заряженных частиц в продольном электрическом поле	18
2-3. Движение электрона в поперечном электрическом поле	22
2-4. Движение электрона в однородном магнитном поле	23
2-5. Движение электрона во взаимно перпендикулярных однородных электрическом и магнитном полях	25
2-6. Электронный луч и понятие о фокусировке луча	26
Контрольные вопросы	28
Глава третья. Электронная эмиссия и термокатоды	28
3-1. Электронная эмиссия и ее виды	28
3-2. Термоэлектронная эмиссия	30
3-3. Параметры термокатодов	31

3-4. Катоды прямого и косвенного накала	32
3-5. Материал термокатодов	34
3-6. Контроль режима накала	39
Контрольные вопросы	42
глава четвертая. Двухэлектродная лампа (диод)	43
4-1. Устройство диода	43
4-2. Характеристики диода	45
4-3. Параметры диода	50
4-4. Определение параметров диода методом двух от- счетов	53
4-5. Закон степени трех вторых для диода	54
4-6. Применение двухэлектродных ламп	55
4-7. Максимальное обратное напряжение кенотрона	62
4-8. Максимальная мощность, рассеиваемая на аноде . . .	63
4-9. Материал анода	63
4-10. Типы двухэлектродных ламп	64
Контрольные вопросы	66
глава пятая. Трехэлектродная лампа (триод)	66
5-1. Устройство и принцип действия триода	66
5-2. Статические характеристики триода	69
5-3. Спрявленные (идеализированные) характеристики триода	75
5-4. Статические параметры триода и их определение . .	76
5-5. Разброс параметров ламп	86
5-6. Междуэлектродные статические емкости лампы . . .	87
5-7. Закон степени трех вторых для триода	89
5-8. Динамический режим триода	91
5-9. Форма анодного тока	94
5-10. Применение триода в качестве усилителя	101
5-11. Способы подачи напряжения смещения	108
5-12. Фазовые соотношения токов и напряжений в цепях усилительного каскада и токопрохождение	109
5-13. Определение величины тока покоя в режиме А . . .	112
5-14. Эквивалентный генератор тока	114
5-15. Параллельное включение ламп	115
5-16. Конструкция и типы присменно-усилительных триодов	116
Контрольные вопросы	118

Глава двенадцатая. Фотоэлектронные приборы . . .	286
12-1. Общие сведения	286
12-2. Свет и единицы его измерения	286
12-3. Фотоэлектронная эмиссия	287
12-4. Фотоэлементы с фотоэлектронной эмиссией	289
12-5. Полупроводниковые фотоэлементы	295
12-6. Фотоэлектронные умножители	299
12-7. Фотосопротивления	302
Контрольные вопросы	305
Приложения	306
Литература	307

ГЛАВА ПЕРВАЯ

В В Е Д Е Н И Е

1-1. ЭЛЕКТРОНИКА И ЕЕ ЗАДАЧИ

Электроника — это раздел науки, занимающийся получением потоков заряженных частиц и изучением законов движения их в электронных приборах под действием электрических и магнитных полей.

Если в электронных приборах поток заряженных частиц перемещается в вакууме или в разреженном газе, то электроника называется вакуумной. Изучение электрического тока в полупроводниках, где вакуума не требуется, относится к полупроводниковой электронике. Если вопросы электроники объединяются с радиотехникой, то эта область науки называется «радиоэлектроникой».

В настоящее время нет ни одной области науки и техники, где не применялась бы электроника. Например, электронно-вычислительные машины, целью которых было ускорить вычисления, открывают широкие перспективы в области автоматизации производственных процессов: станок с программным управлением работает без человека; в железнодорожном транспорте внедряется автоматическое движение по заданному маршруту; космический корабль сам управляет своим полетом, — все это не могло осуществиться без радиоэлектроники. Широкое применение находит промышленное телевидение, позволяющее наблюдать и управлять производственными процессами, происходящими в тяжелых для обслуживающего персонала условиях, например, на химических заводах и т. п.

1-2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАМПЕ

Электронная лампа — это прибор, состоящий из баллона (стеклянного, металлического или металлокерамического), в котором создан вакуум и помещены электроды. Наименьшее количество электродов — два: катод и анод. Работа простейшей электронной лампы основана на принципе испускания электронов накаливаемым катодом,

которые движутся в вакууме от катода к аноду, при наличии между ними электрического поля.

Первые электронные лампы имели стеклянный баллон и катод в виде тонкой вольфрамовой проволочки, которая при накале ярко светилась, поэтому электровакуумные приборы и получили название «лампа». В некоторых дальнейших конструкциях баллон изготовлялся металлическим, непрозрачным, но название «лампа» сохранилось.

На рис. 1-1,а показано устройство простейшей двухэлектродной электронной лампы и ее схематическое изображение.

Катодом служит нить накала, а анодом — полый металлический цилиндр, окружающий катод. Нить накала нагревается при прохождении электрического тока I_n от батареи накала E_n . Для получения анодного тока I_a между анодом и катодом включается анодная батарея E_a , причем положительный полюс батареи присоединяется к аноду, а отрицательный — к катоду. Между катодом и анодом возникает электрическое поле. Электроны, вылетающие из раскаленного катода и имеющие отрицательный заряд, будут притягиваться к положительно заряженному аноду, т. е. промежуток анод — катод станет токопроводящим и по анодной цепи потечет ток (рис. 1-1,б). Если же изменить полярность анодной

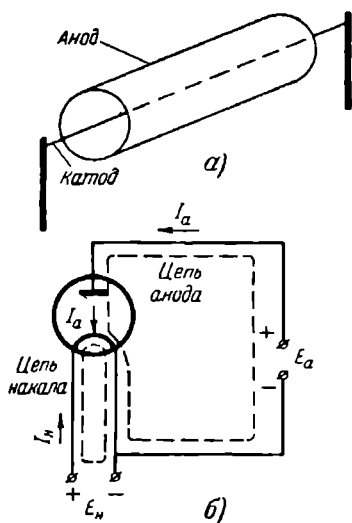


Рис. 1-1. Двухэлектродная лампа.

а — устройства; б — схематическое изображение и электрические цепи.

батареи на обратную, то электроны будут отталкиваться от отрицательно заряженного анода, промежуток анод — катод станет непроводящим и анодного тока не будет.

Электроны внутри лампы движутся от катода к аноду. В электротехнике за направление тока принято направление от плюса источника к минусу, т. е. внутри лампы анодный ток течет от анода к катоду (навстречу движению электронов) и только в одном направлении, когда к аноду приложен положительный потенциал. В этом проявляется характерное свойство двухэлектродной лампы — ее односторонняя проводимость, и поэтому она часто применяется для выпрямления переменного тока.

Если выпрямляется ток промышленной частоты (50 — 400 гц), то двухэлектродная лампа называется кенотроном (слово кенотрон происходит от греческого слова «кенос», что значит пустота). Если лампа служит для выпрямления тока высокой частоты, то она называется диодом или детектором.

Помимо двухэлектродной лампы, имеются многоэлектродные лампы, выполняющие различные функции, например, усиление мощности, усиление напряжения, генерация незатухающих колебаний, преобразование частоты и др.

Выводы от электродов ламп соединяются с контактными штырьками, посредством которых лампа вставляется в ламповую панельку, к лепесткам которой присоединяются провода электронной схемы. Этим достигается быстрая замена ламп. Некоторые типы ламп имеют пластмассовый октальный цоколь с 8 штырьками («окто» — по-латыни «восемь»), на котором штырьки расположены по окружности на равном расстоянии один от другого. Для правильного включения лампы в центре цоколя имеется пластмассовый направляющий ключ с боковым выступом, а на ламповой панельке сделан вырез формы ключа.

Схема соединений электродов лампы со штырьками называется цоколевкой. На цоколевке лампы положение ключа отмечается четырехугольником. Штырьки нумеруются по часовой стрелке, начиная от ключа, если смотреть на лампу со стороны цоколя.

Помимо ламп, имеющих цоколь, изготавливаются и бесцокольные лампы. Миниатюрные лампы «пальчиковой»

серии по количеству штырьков бывают семиштырьковые (диаметр баллона 19 мм) и девятиштырьковые (диаметр 22 мм), у которых направляющего ключа нет. За положение ключа принимается большее расстояние между штырьками. В пальчиковых лампах штырьки впрессовываются в плоское стеклянное доньшко.

В лампах «сверхминиатюрных» с диаметром баллона 10 и 6 мм нет ни цоколя, ни штырьков, а выводы от электродов делаются гибкими. Нумерация выводов считается от цветной метки. Крепление сверхминиатюрных ламп производится различно, в частности, скобками с резиновой или картонной прокладкой. Сверхминиатюрные лампы перед креплением их обертываются алюминиевой фольгой, которая служит наружным экраном лампы.

Изготавливаются еще лампы типа «желудь». Название они получили по внешнему сходству с желудем.

Лампы средней мощности (1 — 3 кВт) имеют большой размер стеклянного баллона для лучшего охлаждения анода. В некоторых типах мощных ламп анод находится не внутри баллона, а снаружи, для чего производится спайка его со стеклянным баллоном. Для охлаждения анодов мощных ламп применяется принудительное воздушное охлаждение или проточной водой.

1.3. МАРКИРОВКА ПРИЕМНО-УСИЛИТЕЛЬНЫХ ЛАМП

Маркировка, или условное обозначение приемно-усилительных ламп, состоит из четырех элементов.

Первый условный элемент — число, которое показывает напряжение нити накала в целых вольтах. Если напряжение накала равно 0,7; 1,2; 1,25 в, то лампы считаются одновольтовыми.

Второй условный элемент — буква (русского алфавита), которая указывает тип лампы: Д — диод; Х — двойной диод, т. е. в одном баллоне помещаются два отдельных и самостоятельно работающих диода; Ц — кенотрон. Значения других букв для различных типов ламп указаны в соответствующих разделах учебника.

Третий условный элемент — число, которое означает заводской номер, т. е. порядковый номер разработки данного типа лампы. Например, двойной диод с общим катодом имеет маркировку 6Х5С; с отдельными катодами для каждого диода 6Х6С.

Четвертый условный элемент — буква, которая указывает на принадлежность лампы к определенной серии С — лампа со стеклянным баллоном (отсутствие буквы означает металлический баллон); М — малогабаритная лампа со стеклянным баллоном; П — лампа пальчиковой серии; Б — лампа сверхминиатюрная с диаметром баллона 10 мм, а для диаметра 6 мм ставится буква А; буква Ж означает лампа типа «желудь»; Л — лампа с замковым цоколем (пружинки в панельке углубляются в канавки, сделанные в металлическом направляющем ключе и прочно удерживающие лампу при толчках или вибрациях). Эти лампы применяются в передвижной аппаратуре.

В табл. 1-1 приведена маркировка некоторых типов электронных ламп.

Таблица 1-1

Маркировка	Напряжение накала, в	Наименование прибора
1Ц1С	0,7	Одновольтный, однонодный, высоковольтный кенотрон прямого накала, цоколь октальный, баллон стеклянный
1Ц1П	1,2	Одновольтный, однонодный кенотрон прямого накала пальчиковой серии
5Ц3С	5,0	Пятивольтный, двухнодный кенотрон прямого накала, баллон стеклянный
5Ц4С	5,0	Пятивольтный, двухнодный кенотрон косвенного накала, баллон стеклянный
6Д6А	6,3	Шестивольтный, однонодный диод косвенного накала, сверхминиатюрный с диаметром баллона 6 мм
6Х6С	6,3	Шестивольтный двойной диод косвенного накала, баллон стеклянный
6Х6	6,3	Шестивольтный двойной диод косвенного накала, баллон металлический

1-4. ВАКУУМ

Из баллона уже собранной электронной лампы откачивают воздух при помощи вакуумных насосов. Степень вакуума измеряют давлением оставшегося в баллоне газа в мм рт. ст. В электронной лампе вакуум доводят до 10^{-6} — 10^{-8} мм рт. ст. Такой высокий вакуум необхо-

дим для того, чтобы электроны на своем пути к аноду не встречали молекул газа. В лампе при худшем вакууме газ будет ионизироваться, поэтому лампа с газом к нормальной работе окажется непригодной.

Наличие газа в лампе можно определить по фиолетовому свечению, возникающему в результате ионизации газа. При откачке лампы ее нагревают токами высокой частоты до высокой температуры, при этом нагреваются как электроды, так и баллон, что способствует лучшему выделению содержащегося в них газа.

1-5. ГАЗОПОГЛОТИТЕЛЬ (ГЕТТЕР)

Во время эксплуатации лампы электроды нагреваются и могут выделять еще сохранившийся в них газ. Газ также может проникнуть в баллон через поры стекла или металла, если баллон металлический. «Патекание» газа ухудшает вакуум.

Для поддержания вакуума в процессе работы лампы, а также для ускорения откачки (вакуум при ускоренной откачке доводят до 10^{-3} — 10^{-4} мм рт. ст.), в лампу помещают газопоглотители (геттеры), которые представляют собой вещества, активно вступающие в реакцию с остающимися газами. Под действием газопоглотителя вакуум быстро достигает 10^{-6} — 10^{-8} мм рт. ст. Газопоглотители бывают двух типов: распыляющиеся и нераспыляющиеся.

К распыляющимся газопоглотителям относятся магний и барий в чистом виде, а также вещества, содержащие барий: феба (железо + барий), бати (барий + титан) и др., так как барий образует прочные соединения со всеми газами.

Распыляющиеся газопоглотители спрессовываются и помещаются между металлическими пластинками с отверстиями, через которые газопоглотители при нагреве испаряются и покрывают внутреннюю поверхность стеклянного баллона налетом: зеркальным (магний) или темным (барий).

Нераспыляющиеся газопоглотители представляют собой чистые элементы (торий, цирконий) или сплав редкоземельных металлов церия и лантана (цето). Они изготавливаются в виде лент или ими покрываются аноды ламп, преимущественно генераторных.

Хорошими газопоглотителями являются молибден и тантал, из которых могут изготавливаться электроды ламп, поэтому в такие лампы геттер не помещается.

1-6. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

Несмотря на большое разнообразие выпускаемых промышленностью электровакуумных приборов, их можно объединить в группы по некоторым общим признакам:

1. По типу катодов: приборы с холодным катодом и накаливаемым катодом; последние могут подразделяться на катоды прямого накала и косвенного накала.

2. По количеству электродов: двухэлектродные (диоды), трехэлектродные (триоды), четырехэлектродные (тетроды), пятиэлектродные (пентоды) и т. д.

3. По напряжению накала: одновольтовые, двухвольтовые, четырехвольтовые, пятивольтовые, шестивольтовые и т. д.

4. По назначению: выпрямительные, усилительные (низкочастотные и высокочастотные), частотопреобразовательные, генераторные и т. д.

5. По наполнению баллона: вакуумные и газонаполненные.

6. По габаритам (маломощные лампы): с октальным цоколем, миниатюрные, сверхминиатюрные.

7. По материалу баллона: стеклянные, металлические, металлокерамические (металлические электроды спаиваются с керамикой) и т. д.

1-7. КРАТКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Двухэлектродная лампа изобретена в 1904 г. английским физиком Флемингом, а трехэлектродная лампа в 1907 г. в Америке Ли-де-Форестом.

В России первые электронные лампы, практически пригодные для эксплуатации, были изготовлены М. А. Бонч-Бруевичем в 1914—1915 гг. Начиная с 1918 г. производство электронных ламп было организовано в Нижегородской радиолaborатории под его же руководством. В 1923 г. М. А. Бонч-Бруевичем впервые

была сконструирована генераторная лампа мощностью 25 кВт с внешним анодом из красной меди и водяным охлаждением. Трудность изготовления таких ламп заключалась в спаянии медного анода со стеклянным баллоном. За границей подобные лампы начали выпускаться только спустя два года. В данное время мощность генераторных ламп достигает 300 кВт. Лампы мощностью 500 кВт изготавливаются разборными. Вакуум создается насосами, действующими непрерывно во время работы лампы.

Для удовлетворения потребности в разного типа электронных лампах в 1922 г. в Ленинграде был построен завод, получивший в 1928 г. название «Светлана». В настоящее время завод превратился в мощный электровакуумный комбинат со своим стекольным заводом.

Среди большого количества заводов, изготавливающих электровакуумные приборы, следует выделить Московский электроламповый завод, выпускающий большой ассортимент электронных ламп от сверхминиатюрных до кинескопов с прямоугольным экраном для современных телевизоров.

За последние 5—6 лет нашли широкое применение полупроводниковые приборы, являющиеся конкурентами электронных ламп. Вследствие большого значения полупроводниковых приборов и совершенно другого принципа их работы по сравнению с электронной лампой, а также вследствие особенности технологии их изготовления в СССР построены специализированные заводы как по выпуску полупроводниковых приборов, так и полупроводниковых материалов для их изготовления (германия, кремния и др.).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое «электроника»?
 2. Какая лампа называется электронной?
 3. Из каких частей состоит двухэлектродная лампа?
 4. В каком направлении протекает ток через электронную лампу?
 5. Для чего в электронной лампе необходим вакуум?
 6. По каким признакам классифицируются электронные лампы?
-

ГЛАВА ВТОРАЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

2-1. ЭЛЕКТРОНЫ И ИОНЫ

Электрон представляет собой элементарную частицу с отрицательным электрическим зарядом, обозначаемый буквой « e ». В системе международных единиц СИ величина $e = 1,6 \cdot 10^{19}$ κ .

Масса покоя электрона $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг . Массой покоя считается масса электрона, когда его скорость не превышает одной десятой скорости света.

Отношение заряда электрона к его массе составляет:

$$\frac{e}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}} = 1,78 \cdot 10^{11} \text{ [}\kappa/\text{кг}]. \quad (2-1)$$

Как известно из физики, электроны в атоме движутся вокруг положительно заряженного ядра по определенным орбитам. Электроны внешнего слоя называются валентными, они участвуют в химических реакциях и создают электропроводность вещества.

Когда атом электрически нейтрален, то все электроны находятся на своих орбитах и удерживаются ядром силами притяжения по закону Кулона.

Каждый электрон обладает энергией, соответствующей орбите, на которой он находится. По квантовой теории атома электрон может иметь строго определенное значение энергии (дискретное) и совершать движение вокруг ядра не по любым орбитам, а только по так называемым разрешенным.

Значения энергии, соответствующие положению электрона на какой-либо орбите, называют уровнями энергии.

Энергию электрона принято выражать в электрон-вольтах (эВ).

Один электрон-вольт — это энергия, которую приобретает или затрачивает электрон при перемещении из одной точки пространства в другую при разности потенциалов между ними в 1 В : $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ дж .

Если электрон находится на ближайшей к ядру разрешенной орбите, то такое состояние электрона назы-

вается нормальным или невозбужденным. Для перехода электрона на более удаленную орбиту требуется добавочная энергия; такое состояние как атома, так и электрона называется возбужденным. В возбужденном состоянии электрон может находиться не более доли микросекунды и затем переходит на более низкий уровень энергии. При переходе электрона с высокого уровня на низкий освобождается энергия, затраченная на его возбуждение, которая переходит в энергию излучения, что часто вызывает свечение атома. Такое свечение наблюдается, например, при работе газоразрядных приборов.

Валентные электроны, как наиболее удаленные от ядра, испытывают наименьшую силу притяжения и под влиянием света, тепла, сильного электрического поля и т. д. легко могут отделиться от атома. Если электроны, покинув вещество, перемещаются в вакууме, что имеет место в электронных лампах, то такие электроны называются «свободными электронами».

Если электроны перемещаются внутри вещества, то такие электроны называются «электронами проводимости». В проводнике электропроводность осуществляется именно такими электронами проводимости.

Процесс перехода валентных электронов от атомов или молекул газа называется ионизацией, при этом атом или молекула, потерявшие электрон, становятся положительными ионами. Отделившиеся электроны иногда «прилипают» к нейтральным атомам или молекулам и превращают их в отрицательные ионы.

Масса иона почти равна массе атома, которая примерно в десятки тысяч раз больше массы электрона.

2-2. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПРОДОЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Рассмотрим движение электрона в электрическом поле. Между анодом и катодом, как между двумя разноименно заряженными металлическими поверхностями, возникает однородное электрическое поле, напряженность которого определяется по формуле

$$E = \frac{U_a}{d} \text{ [в/м]}, \quad (2-2)$$

где U_a — разность потенциалов между анодом и катодом, в .

d — расстояние между электродами, м .

В вводной части учебника образование анодного тока объяснялось движением потока электронов к аноду вследствие притяжения их анодом, имеющим положительный заряд. Теперь можно объяснить появление анодного тока действием электрического поля на поток электронов.

Допустим, что катод эмиттирует электрон, скорость которого при выходе из катода равна нулю. На свободный электрон, находящийся в электрическом поле, будет действовать сила, пропорциональная напряженности поля, вызывающая движение электрона в направлении против силовых линий поля, т. е. от катода к аноду

$$F_a = -eE[n]. \quad (2-3)$$

Знак минус указывает на то, что направление сил, действующих на электрон, противоположно направлению силовых линий поля.

Для перемещения электрона против сил поля полем совершается работа, в результате чего электрон приобретает скорость и кинетическую энергию; такое электрическое поле называется ускоряющим. Кинетическая энергия, приобретаемая электроном, определяется по формуле

$$W_a = \frac{mv^2}{2} \quad [\text{дж}], \quad (2-4)$$

где m — масса электрона, кг ;

v — скорость электрона, м/сек .

Энергия поля, затраченная на перемещение электрона от катода к аноду, равна произведению заряда электрона на разность потенциалов между катодом и анодом:

$$W_{II} = eU_a \quad [\text{дж}], \quad (2-5)$$

где e — заряд электрона, к ;

U_a — разность потенциалов между анодом и катодом, в .

Приравняем формулы (2-4) и (2-5):

$$W_a = W_{II}$$

или

$$\frac{mU_a^2}{2} = eU_a.$$

Отсюда можно определить скорость электрона у анода

$$v_a = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_a} \text{ [м/сек]}. \quad (2-6)$$

После подстановки в формулу численных значений, получим:

$$\begin{aligned} v_a &= \sqrt{2 \frac{e}{m} U_a} = \sqrt{2 \cdot 1,78 \cdot 10^{11} U_a} = \\ &= 593 \cdot 10^3 \sqrt{U_a} \text{ [м/сек]} \end{aligned}$$

или приближенно

$$v_a \approx 600 \sqrt{U_a} \text{ [км/сек]}. \quad (2-7)$$

Эта формула справедлива, если скорость электрона не превышает 0,1 скорости света, следовательно, до 30 000 км/сек.

Определим время пролета электрона от катода до анода (расстояние между анодом и катодом обозначим d).

Электрон, находящийся в однородном электрическом поле, перемещается со скоростью v , определяемой произведением ускорения на время:

$$v = at. \quad (2-8)$$

Ускорение определяется отношением силы, действующей на электрон, к его массе:

$$a = \frac{F_a}{m} = E \frac{e}{m} \text{ [м/сек}^2\text{]}. \quad (2-9)$$

Как видно из (2-9) ускорение электрона в однородном электрическом поле постоянно и зависит только от напряженности поля.

Следовательно, скорость электрона

$$v = at = E \frac{e}{m} t. \quad (2-10)$$

Из приведенной формулы следует, что электрон движется равномерно-ускоренно.

Время пролета электрона в однородном электрическом поле равно отношению расстояния к средней скорости

$$t = \frac{d}{v_{\text{ср}}} \text{ [сек]}. \quad (2-11)$$

Средняя скорость при равномерно-ускоренном движении равна полусумме начальной и конечной скоростей электрона:

$$v_{\text{ср}} = \frac{0 + v_a}{2},$$

где v_a — конечная скорость у анода (начальная скорость равна нулю).

Следовательно, время пролета электрона

$$t = \frac{d}{v_{\text{ср}}} = \frac{2d}{v_a} \text{ [сек]}.$$

Пример. Определить скорость электрона у анода диода и время его пролета, если начальная скорость по выходе из катода равна нулю; расстояние между электродами $d=1$ мм; напряжение на аноде $U_a=200$ в.

Решение. 1. Определим скорость электрона у анода:

$$v_a = 600\sqrt{U_a} = 600\sqrt{200} = 600 \cdot 1,4 \cdot 10 = 8,4 \cdot 10^6 \text{ м/сек.}$$

2. Определим время пролета электрона:

$$t = \frac{2d}{v_a} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{8,4 \cdot 10^6} = 0,24 \cdot 10^{-9} \text{ сек} = 0,24 \text{ н/сек.}$$

Рассмотрим случай, когда электрон движется по направлению линий поля, т. е. от анода к катоду. Для этого электрон должен обладать такой кинетической энергией, чтобы преодолеть тормозящее действие электрического поля. Когда кинетическая энергия электрона уменьшится до нуля, то и скорость его будет равна нулю (2-4). Следовательно, в тормозящем электрическом поле электрон отдает свою энергию полю, благодаря чему энергия поля увеличивается. На остановившийся электрон будет действовать ускоряющее электрическое поле, и электрон станет перемещаться к аноду, приобретая энергию за счет энергии поля. Таким образом, мож-

Но считать, что между электроном и электрическим полем происходит обмен энергиями.

На отрицательный ион электрическое поле будет действовать так же, как и на электрон, только скорость иона будет меньше скорости электрона из-за большей массы иона. Например, скорость водородного иона при прочих равных условиях будет меньше скорости электрона примерно в $\sqrt{2000}$, т. е. в 44,5 раза.

Для положительно заряженной частоты (положительный ион) ускоряющим электрическим полем будет такое поле, в котором положительный ион перемещается по направлению силовых линий поля, а тормозящим — наоборот.

2-3. ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА В ПОПЕРЕЧНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

На рис. 2-1 показана траектория движения электрона в поперечном электрическом поле со скоростью v_0 , которая в начале пути перпендикулярна силовым линиям поля.

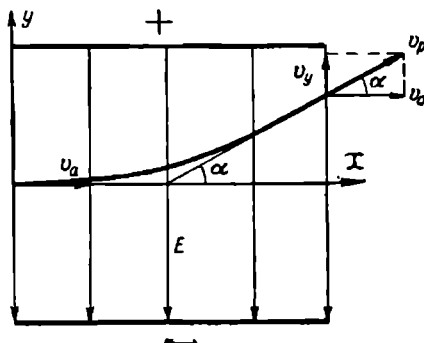


Рис. 2-1. Траектория движения электрона в поперечном поле.

Под действием ускоряющего электрического поля электрон отклонится от своего начального прямолинейного пути и будет двигаться по параболе. Можно определить угол отклонения траектории от направления вектора начальной скорости v_0 электрона, зная поперечную составляющую его скорости v_y . Она опреде-

ляется произведением поперечного ускорения a_y на время пролета электрона t .

Рассмотрим пример: расстояние между пластинами $d = 1$ см, разность потенциалов $v = 100$ в и скорость электрона в направлении оси x

$$v_x = v_0 = 6 \cdot 10^7 \text{ [м/сек].}$$

Определим:

1. Напряженность электрического поля

$$E = \frac{U}{d} = \frac{100}{0,01} = 10\,000 \text{ в/м.}$$

2. Поперечное ускорение электрона

$$a_y = \frac{F}{m} = E \frac{e}{m} = 10^4 \cdot 1,78 \cdot 10^{11} = 17,8 \cdot 10^{14} \text{ [м/сек}^2\text{]}.$$

3. Время пролета электрона

$$t = \frac{d}{v_x d_x} = \frac{0,01}{6 \cdot 10^7} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ сек.}$$

4. Поперечная скорость электрона

$$v_y = a_y t = 17,8 \cdot 10^{14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-8} = 28,48 \cdot 10^6 \text{ [м/сек]}.$$

5. Тангенс угла

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_0} = \frac{28,48 \cdot 10^6}{6 \cdot 10^7} = 0,47.$$

6. Угол $\alpha = \operatorname{arctg} 0,47 = 25^\circ 10'$.

Траектория электрона по выходе его из электрического поля будет прямой линией.

2-4. ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Если электрон перемещается вдоль магнитных силовых линий, то магнитное поле на его траекторию не влияет (рис. 2-2,а).

Магнитное поле действует на движущийся электрон с некоторой силой F_M только тогда, когда электрон пересекает магнитные силовые линии. Сила F_M , действующая на электрон, всегда направлена перпендикулярно к направлению движения электрона и сводится к изменению траектории электрона, при этом численные значения скорости электрона и его энергии остаются неизменными. Направление движения электрона в любой точке поля определяется правилом левой руки, или правилом буравчика, так как движущийся электрон эквивалентен проводнику с током.

Если электрон со скоростью v пересекает силовые линии поля под углом 90° , то траектория электрона будет представлять собой окружность с радиусом R , так как однородное магнитное поле действует на электрон с силой F_M , направленной перпендикулярно скорости, и смещает электрон к центру окружности (рис. 2-2,б).

Электродинамическая сила F_M пропорциональна скорости электрона v и напряженности магнитного поля H :

$$F_M = evH [\mu]. \quad (2-12)$$

Центростремительная сила, с которой электрон удаляется от центра,

$$F_{ц} = \frac{mv^2}{R} [\mu]. \quad (2-13)$$

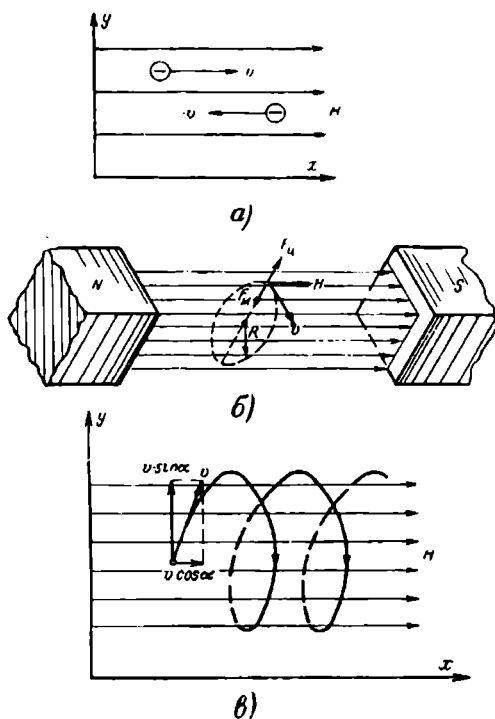


Рис. 2-2. Траектория движения электрона в магнитном поле.

a — продольном; b — под углом 90° ; c — под произвольным углом.

Для определения радиуса кривизны траектории электрона приравняем выражение электродинамической силы F_M центростремительной силе $F_{ц}$

$$F_M = F_{ц}$$

или

$$evH = \frac{mv^2}{R}. \quad (2-14)$$

Отсюда

$$R = \frac{mv}{eH}. \quad (2-15)$$

Анализируя формулу, можно сделать заключение, что при постоянной скорости v радиус окружности зависит только от напряженности магнитного поля, так как отношение заряда электрона к его массе постоянно.

Если электрон со скоростью v пересекает силовые линии не под углом 90° , а под каким-то другим (рис. 2-2, в), то сила F_M уменьшится:

$$F_M = evH \sin \alpha, \quad (2-16)$$

где α — угол между вектором скорости электрона и направлением силовых магнитных линий.

Траекторией электрона будет винтовая линия с постоянным шагом.

2-5. ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА ВО ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ ОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Допустим, что напряженности как электрического поля E , так и магнитного поля H постоянны и взаимно-перпендикулярны, а начальная скорость электрона равна нулю. Тогда траекторией движения электрона будет кривая, которая называется циклоидой (рис. 2-3). Рассмотрим образование этой траектории.

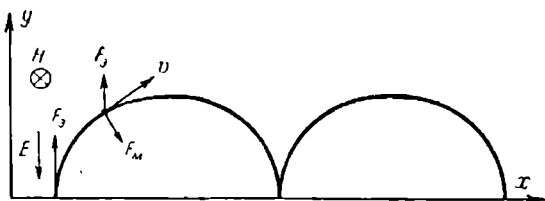


Рис. 2-3. Траектория движения электрона во взаимно-перпендикулярных электрическом и магнитном полях.

На неподвижный электрон сначала действует только ускоряющее электрическое поле с силой $F_э = eF$. Электрон, приобретая скорость и кинетическую энергию, начнет пересекать силовые линии поля, вследствие чего на него начнет действовать и магнитное поле с силой $F_м$, отклоняющей электрон от прямолинейного пути в направлении, перпендикулярном скорости. Из-за искривления траектории приращение скорости электрона в ускоряющем поле станет уменьшаться, а затем совершенно прекратится. Тогда электрон за счет запасенной им энергии будет перемещаться уже в обратном направлении, т. е. в тормозящем электрическом поле. Когда скорость электрона уменьшится до нуля, процесс повторится и т. д.

2-6. ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛУЧ И ПОНЯТИЕ О ФОКУСИРОВКЕ ЛУЧА

Электронным лучом называется электронный поток одного направления, которому придано определенное сечение. Форма луча зависит как от вида формирующих электродов, так и от характера внешних электрических и магнитных полей.

Электронный луч можно сфокусировать подобно световому лучу. Фокусировка представляет собой пересечение траекторий электронов в малом объеме или плоскости, которые условно можно принять за точку. Фокусировка осуществляется электронно-оптическими линзами, которые действуют аналогично оптическим световым линзам. Если фокусировка осуществляется электрическим полем, то линзы называются электростатическими. Если же луч фокусируется магнитным полем, то линзы называются магнитными. Рассмотрим принцип действия простейших собирательных линз: электростатической и магнитной.

Собирающая трехэлектродная электростатическая линза представляет собой неоднородное электрическое поле. Как известно, силовые линии электрического поля в любой его точке перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям, которые в сечении изображаются линиями. В однородном поле электроны, имеющие начальную нулевую скорость, двигаются по силовым линиям поля. В неоднородном электрическом поле траектория таких электронов не совпадает с направлением силовых

линий и зависит от величины скорости электронов, их направления и от величины напряженности электрического поля, т. е. от густоты эквипотенциальных поверхностей поля, которые пересекают электроны.

Для получения собирающей фокусирующей линзы необходимо иметь неоднородное электрическое поле

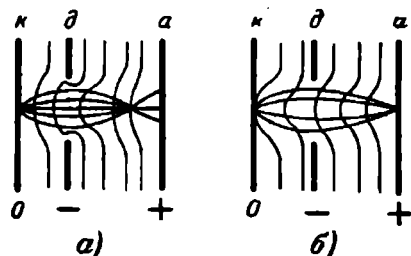


Рис. 2-4. Схематическое изображение двух простейших собирающих электростатических линз с большим отрицательным потенциалом на диафрагме относительно катода (а) и меньшим (б).

между катодом (κ) и плоским анодом (α), которое создается при помощи диафрагмы (δ) — диска с центральным отверстием, расположенным между электродами. Диафрагме сообщается отрицательный потенциал относительно катода, вследствие чего эквипотенциальные поверхности поля будут изгибаться через диафрагму и электроны с катода, пройдя диафрагму, пересекутся в одной

точке, называемой фокусом линзы. На рис. 2-4 изображены две простейшие электростатические линзы с различным потенциалом на диафрагме и различной длиной фокусного расстояния (на рис. 2-4,а отрицательный потенциал больше, чем на рис. 2-4,б). Следовательно, изменяя потенциал диафрагмы, можно изменять фокусное расстояние.

Магнитная линза представляет собой неоднородное магнитное поле, образуемое катушкой, через которую протекает постоянный ток (рис. 2-5). Наибольшая напряженность поля будет по середине катушки, а с удалением от катушки напряженность поля уменьшается. Поток электронов, влетающий в продольное магнитное поле катушки расходящим-

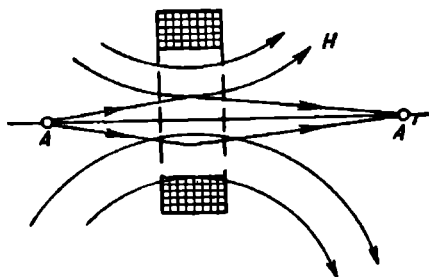


Рис. 2-5. Магнитная линза.

ся пучком (точка A), завихряется вокруг осевой линии поля и собирается в одну точку (точка A_1), называемую фокусом магнитной линзы. Изменяя величину тока, протекающего через катушку, можно изменять длину фокусного расстояния.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить, что понимается под энергией электрона и в каких единицах она выражается.
2. Как перемещается электрон в однородном и неоднородном электрических полях?
3. Как определить скорость электрона, находящегося в однородном электрическом поле?
4. Как перемещается электрон в однородном и неоднородном магнитных полях?

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ И ТЕРМОКАТОДЫ

3-1. ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ И ЕЕ ВИДЫ

Под электронной эмиссией понимается испускание (эмиттирование) с поверхности какого-либо вещества свободных электронов, которые должны преодолеть силы электрического притяжения положительных зарядов, остающихся на поверхности вещества, т. е. должны совершить работу, называемую «работой выхода электрона». Таким образом, под работой выхода понимается минимальная величина добавочной энергии, подводимой к электрону для выхода его с поверхности вещества. Работу выхода электрона измеряют в электронвольтах, и она зависит от материала вещества, например, для чистого вольфрама работа выхода составляет 4,5 эв, тория — 3,35 эв, а цезия — 1,8 эв.

Для того чтобы уменьшить работу выхода электронов, нужно соединить два металла с различной работой выхода между собой. Тогда на границе контакта между ними произойдет следующее явление: электроны, находящиеся в металле с меньшей работой выхода, будут переходить через контакт в металл с большей работой выхода, в результате чего на свободных концах метал-

лов возникнет разность потенциалов, которая называется контактной. Положительный заряд образуется у металла с меньшей работой выхода, а отрицательный — у металла с большей работой выхода. Контактная разность потенциалов пропорциональна разности их работ выхода. Если возьмем вольфрам, покрытый торием, то в образующемся поле плюс будет на тории, а минус — на вольфраме. Поле контактной разности потенциалов в данном случае для эмиттируемых электронов будет ускоряющим, и работа выхода электрона, покидающего вольфрам, покрытый тонким (мономолекулярным) слоем тория, станет меньше работы выхода из тория.

В зависимости от способа сообщения электронам дополнительной энергии различают следующие четыре вида электронной эмиссии, имеющие применение в электронных приборах.

1. Термоэлектронная эмиссия, когда энергия сообщается электронам посредством нагрева катода и широко используется в электровакуумных приборах. Впервые термоэлектронная эмиссия была открыта американским изобретателем Эдисоном в 1883 г.

2. Вторичная эмиссия — это испускание «вторичных» электронов с поверхности вещества, на которую падает поток быстрых (первичных) электронов. Первичные электроны сообщают вторичным энергию, необходимую для работы выхода. Электрод, эмиттирующий вторичные электроны, получил название динод.

Отношение числа вторичных электронов n_2 к числу первичных n_1 называется коэффициентом вторичной эмиссии и обозначается буквой σ (сигма):

$$\sigma = \frac{n_2}{n_1} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (3-1)$$

Коэффициент вторичной эмиссии (в пределах 0—10) зависит от работы выхода вещества, от энергии и угла падения первичных электронов. При очень больших скоростях первичные электроны проникают далеко в глубь вещества, и тогда выход вторичных электронов наружу затрудняется.

Вторичные электроны называются медленными электронами, так как их скорость значительно меньше скорости первичных электронов.

Вторичная электронная эмиссия используется в фотоэлектронных умножителях и специальных лампах со вторичной эмиссией.

Вторичная электронная эмиссия может быть получена и при ударе положительно заряженного иона о катод, что используется в газоразрядных приборах с холодным катодом. Иногда вторичная электронная эмиссия появляется в электронных лампах как сопутствующее и вредное явление.

3. Фотоэлектронная эмиссия, когда электроны получают энергию за счет фотонов лучистой энергии, облучающих поверхность фотокатода. Она используется в фотоэлементах.

4. Автоэлектронная эмиссия — это эмиссия, возникающая при холодном катоде под действием сильного электрического поля, и используется в рентгеновских трубках и газоразрядных лампах.

3-2. ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Возьмем электронную лампу с катодом, изготовленным, например, из чистого вольфрама. При нагревании катода повышается кинетическая энергия электронов, и когда дополнительная энергия станет равной или превысит работу выхода электронов из катода, они начнут эмиттироваться. Электроны покидают катод с различными скоростями; будут иметься электроны и с нулевой скоростью. Эмиттированные катодом электроны образуют около катода электронное облачко, представляющее собой объемный отрицательный заряд, распределенный в пространстве, который наводит на поверхности катода положительный заряд соответствующей величины. На границе металл — вакуум возникает тормозящее электрическое поле для эмиттируемых электронов.

С увеличением плотности объемного заряда вылет новых электронов с поверхности катода затрудняется и через некоторое время устанавливается динамическое равновесие, когда число электронов, вылетевших из катода, будет равно количеству электронов, возвратившихся за то же время на катод под действием объемного заряда.

3-3. ПАРАМЕТРЫ ТЕРМОКАТОДОВ

Параметрами термокатодов служат постоянные величины, по которым оцениваются эмиссионные свойства катодов.

Катод в электронной лампе является основным электродом. От него зависит как срок службы лампы (долговечность), так и величина тока эмиссии. Катоды электронных ламп характеризуются параметрами: удельная эмиссия, эффективность и долговечность.

Удельная эмиссия. Под удельной эмиссией или плотностью тока эмиссии понимается величина тока эмиссии катода, приходящаяся на один квадратный сантиметр его поверхности:

$$\gamma = \frac{I_e}{s_k} \text{ [a/cm}^2\text{]}, \quad (3-2)$$

где I_e — ток эмиссии катода;
 s_k — рабочая поверхность катода.

Удельная эмиссия зависит главным образом от материала катода и его температуры.

Эффективность или экономичность катода есть величина, показывающая, сколько миллиампер тока эмиссии катода приходится на 1 *вт* мощности накала:

$$H = \frac{I_e}{P_n} \text{ [ma/vt]}, \quad (3-3)$$

где I_e — ток эмиссии катода;
 P_n — мощность накала.

Чем меньше требуется мощности на накал катода для получения одного и того же значения тока эмиссии, тем экономичнее катод. Эффективность зависит от температуры и от работы выхода электрона, т. е. материала катода и находится в пределах от 2 до 10 000 *ма/вт*.

Долговечность катода определяет срок службы лампы, выражаемый в рабочих часах, в течение которых эффективность катода остается больше 80% от номинального значения при нормальных условиях эксплуатации. В среднем срок службы лампы составляет 200—2 000 ч. Особо долговечные лампы работают до 5 000 ч и более.

В процессе работы лампы происходит испарение материала катода, а также разрушение его специальных покрытий, в результате чего уменьшается ток эмиссии. Лампа считается пригодной к работе, если ток эмиссии со временем уменьшился не более чем на 20% от первоначального значения. Лампа с уменьшенной эмиссией может еще работать в менее ответственной радиоаппаратуре.

3-4. КАТОДЫ ПРЯМОГО И КОСВЕННОГО НАКАЛА

По способу нагревания катодов они подразделяются на два типа: катоды прямого и косвенного накала, или подогревные.

Катодами прямого накала называются такие катоды, через которые непосредственно проходит ток накала. Для получения большей величины тока эмиссии катод тоже должен иметь большую длину проволочки. Для того чтобы не увеличивать габариты лампы, нити придают зигзагообразную форму, свивают ее в спираль либо несколько отдельных петель соединяют параллельно (рис. 3-1, а, б). В зависимости от мощности ламп диаметр нити накала может быть от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Тонкие нити применяются в лампах малой мощности, питание которых по накалу катода осуществляется постоянным током. Время разогрева тонкой нити очень мало, поэтому при накаливании ее переменным током будет сильно сказываться малая тепловая инерция катода. Если через тонкую нить протекает ток, равный амплитудному значению, то нить может перескочить, а когда ток равен нулю, температура нити может значительно понизиться. В результате периодического изменения температуры нити накала эмиссионный ток будет пульсировать с удвоенной частотой переменного тока, а для нормальной работы лампы ток эмиссии катода должен быть постоянным. Катоды прямого накала, изготовленные из нити большого диаметра, имеют большую тепловую инерцию и для питания их можно использовать переменный ток.

Катодами косвенного накала называются такие катоды, нагрев которых осуществляется током, проходящим не непосредственно через катод, а через подогреватель, находящийся внутри катода. Электрически

подогреватель и катод изолированы друг от друга. Конструктивно катод косвенного накала (рис. 3-1,б) представляет собой трубочку 3 цилиндрической или овальной

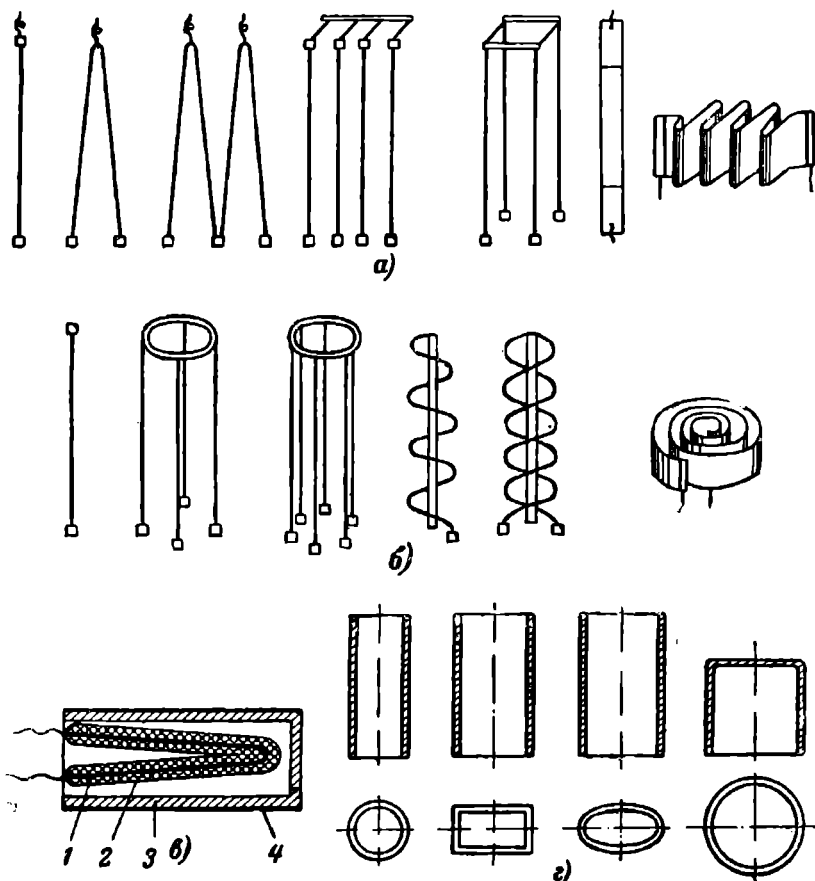


Рис. 3-1. Конструкции катодов.

а — прямого накала для плоской формы электродов; *б* — прямого накала для цилиндрической формы; *в* — устройство подогревного катода; 1 — пить подогревателя; 2 — изолирующее покрытие (алюид); 3 — никсельный цилиндр; 4 — активированный слой; *г* — конфигурация подогревных катодов.

формы, или плоскую тарелочку, покрытую активизирующим слоем 4, эмиттирующим электроны. Подогреватель выполняется из проволочки тугоплавкого материала 1 (вольфрам или сплав молибдена с вольфрамом) и по-

крывається сієюм високотемпературної ізоляції—алундом 2 (окись алюмінія). Форми підогреваних катодів різні (рис. 3-1,2). Ці катоди по порівнянню з катодами прямого накали мають меншу ефективність, але вони міцні і нечутливі до малих коливань напруги накали, так як мають порівняльно більшу масу. Різниця потенціалів між катодом і підогревателем звичайно становить приблизно 100 в. Готуються лампи з підвищеною ізоляцією, допускаючи більшу різницю потенціалів.

Підогревні катоди при включенні напруги накали починають емітувати електрони не одразу, а після деякого часу, коли прогреться катод. Час прогріву для прийомно-усилительних ламп звичайно становить від 30 сек до 1,5 мин, а для потужних ламп час прогріву досягає декількох хвилин.

Підогревні катоди призначені для живлення їх змінним струмом. Конструкція підогревного катода була запропонована в 1918 г. академіком А. А. Черновим.

3-5. МАТЕРІАЛ ТЕРМОКАТОДІВ

Катоди звичайно виготовляються або з чистих металів, або з активованих.

Катоди з чистих металів. Матеріалом для них повинен бути тугоплавкий метал, так як чим вище робоча температура, тим більше емітується електронів. Найбільш широке розповсюдження отримав вольфрам (температура плавлення 3655° К) і рідше — тантал (температура плавлення 2700° К). З чистих металів виготовляються тільки катоди прямого накали.

Вольфрамовий катод починає ефективно емітувати електрони тільки з температури 2270° К. Робоча температура коливається в межах 2400—2700° К. Удельна емісія в даному інтервалі температур $\gamma = 0,3-1,5$ а/см², а ефективність відповідно $H = 2-10$ ма/вт. Робота виходу вольфрамового катода 4,5 эв.

Довговічність вольфрамового катода становить приблизно 1000 ч. З збільшенням робочої температури довговічність зменшується, так як відбувається інтенсивне випаровування вольфраму. Перекал на 1% номінального напруги скорочує термін служби лампи на 10%,

а уменьшение накала на 1% увеличивает срок работы лампы тоже примерно на 10%.

Следует указать на важное свойство вольфрамового катода — это устойчивость эмиссии. С повышением рабочей температуры он «не теряет эмиссии», как это имеет место в лампах с активированными катодами. Кроме того, вольфрамовый катод выполняет роль газопоглотителя, так как атомы вольфрама, испаряясь при нагреве, вступают в химические соединения с газами, появившимися в баллоне, и осаждаются на стенках баллона. Несмотря на малую экономичность, вольфрамовый катод применяется в мощных генераторных лампах с высоким анодным напряжением порядка 40 кВ и в маломощных лампах, где требуется постоянство тока эмиссии, например в электрометрических лампах.

Тонкопленочные активированные катоды. К тонкопленочным катодам относятся торированный и карбидированный катоды.

Торированный катод. При добавлении к вольфраму небольшого количества металла тория (1—2%) эффективность катода значительно повышается: $H = 35—50 \text{ ма/вт}$. При нагреве катода торий изнутри вольфрама диффундирует на поверхность, окружая вольфрам тонкой пленкой толщиной всего в один атом, поэтому торированные катоды и называются «тонкопленочными». Повышение эффективности торированного катода происходит вследствие уменьшения работы выхода. Электроположительный слой пленки тория на вольфраме образует ускоряющее поле для эмиттируемых электронов, за счет чего работа выхода торированного катода (2,63 эВ) становится меньше работы выхода чистого тория (3,38 эВ). Удельная эмиссия торированного катода $\gamma = 2 \text{ а/см}^2$. Рабочая температура 1800—1900° К, вследствие чего ток накала уменьшается примерно в 10 раз по сравнению с вольфрамовым катодом.

Недостатком торированного катода является неустойчивость его работы из-за плохого сцепления атомов тория с вольфрамом. В особенности это заметно при повышении температуры, когда торий, усиленно испаряющийся с поверхности вольфрама, значительно превышает количество тория, диффундирующего изнутри. Ток эмиссии при этом уменьшается и может даже прекратиться. Такое явление называется потсрей эмиссии.

Долговечность торированного катода 1 000—1 500 ч. Торированные катоды в данное время не применяются, но изучаются они потому, что на их основе изготавливаются современные высокоэффективные катоды.

Карбидированный катод. Это улучшенный торированный катод. Вольфрамовая проволока подвергается действию углерода, вследствие чего поверхность вольфрама превращается в карбид вольфрама, с которым одноатомная пленка тория имеет лучшее сцепление. Но углерод делает вольфрам хрупким, поэтому карбидированный катод не может быть изготовлен тоньше 0,1 мм. Карбидированные катоды широко применяются в маломощных генераторных лампах с катодом прямого накала и высоковольтных кенотронах.

Рабочая температура карбидированного катода 1 950—2 000° К, эффективность $H=50-70$ ма/вт, долговечность 1 000—2 000 ч.

Оксидный катод (полупроводниковый катод). Оксидный катод может быть как прямого накала, так и косвенного. Оксидный катод прямого накала состоит из вольфрамовой или никелевой проволочки (подложка, керн), на которую наносится слой окисла щелочно-земельных металлов (барий, стронций, цезий). В окислах металлов носителями тока служат ионы, и для получения электронов необходимо произвести процесс активизации, заключающийся в нагревании оксидного покрытия до температуры, превышающей нормальную рабочую температуру градусов на 300. Тогда на поверхности оксидного слоя из окислов выделяется чистый металл в виде отдельных крупинок, которые и эмиттируют электроны.

Работа выхода щелочноземельных металлов очень мала 1,1—1,3 эв, поэтому рабочая температура оксидного катода порядка 1 000—1 150° К, эффективность $H=80-120$ ма/вт, долговечность 1 500—3 000 ч, плотность тока $\gamma=0,8-1,1$ а/см². Оксидный катод нашел исключительно широкое применение. До 90% всех приемно-усилительных ламп имеют оксидный катод. В мощных лампах с катодом прямого накала в качестве керн применяются никелевые ленты.

В катодах косвенного накала керном служит никелевая трубочка, которая покрывается оксидным слоем. В некоторых типах ламп катод имеет форму цилиндра

небольшой высоты с дном, внутри которого подогреватель выполняется в виде «улитки».

Оксидный катод очень чувствителен к изменению напряжения накала. При недокале катода сопротивление эмиссионному току оксидного покрытия в месте контакта с металлом (керном) оказывается относительно большим. Поэтому эмиссионный ток может вызвать местный перегрев отдельных участков катода, приводящий к разрушению оксидного покрытия. При подаче высокого анодного напряжения и недокале катода появляется «искрение», также приводящее к разрушению оксидного слоя. Перекал катода увеличивает скорость испарения оксидного покрытия, что приводит к потере эмиссии. Поэтому можно допускать кратковременно изменение накала в пределах $\pm 5\%$ от номинального напряжения.

У оксидного катода может быть явление так называемого «отравления» катода. Отравление оксидного катода связано с появлением в баллоне лампы газа, особенно кислорода, который вступает в реакцию с активным веществом катода (барий), вследствие чего уменьшается эмиссионная способность. Газоотделение электродами лампы может появиться в результате перегрева их, особенно анода.

Следует указать и на положительное качество оксидного катода, позволяющее получать за короткие промежутки времени 0,001—0,01 сек (импульсный режим) значительный ток эмиссии $\gamma = 30\text{—}50 \text{ а/см}^2$, т. е. примерно в 100 раз больше, чем при непрерывной работе.

Рассмотрим новые высокоэффективные катоды.

Синтерированные катоды. Эти катоды представляют собой ториево-оксидные катоды на спеченном сердечнике. На вольфрамовую подложку в виде ленты помещается слой молибденового порошка, который спекается с подложкой в атмосфере водорода; после спекания наносится слой активного вещества окиси тория. Окись тория имеет хорошее сцепление с металлом — подложкой — и это увеличивает электропроводность катода. Ториево-оксидный катод не дает «искрения» при высоких анодных напряжениях. Он также имеет большую стойкость к «отравлению» газами.

Рабочая температура 1700—1950° К, работа выхода 2,6 эв, удельная плотность тока $\gamma = 2 \text{ а/см}^2$, долговечность порядка 8000 ч.

Синтерированные катоды являются катодами прямого накала и применяются в мощных генераторных лампах и лампах СВЧ. Конструктивно они выполняются в виде вольфрамовых лент (рис. 3-1).

Л-катод (катод Леменса). Этот тип катодов можно назвать металлургическими камерными подогревными катодами (рис. 3-2). Они представляют собой мо-

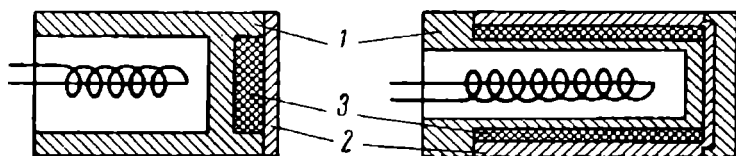


Рис. 3-2. Металлогубчатые камерные катоды (1 — катоды).

либденовый цилиндр с перегородкой, в верхней части которого, закрытой от окружающей среды пористым вольфрамом 2 (губкой), помещается активное вещество 3, состоящее из смеси металлического бария и стронция. Барий и стронций при нагреве диффундируют через поры вольфрамовой губки на поверхность, покрывая ее активным слоем.

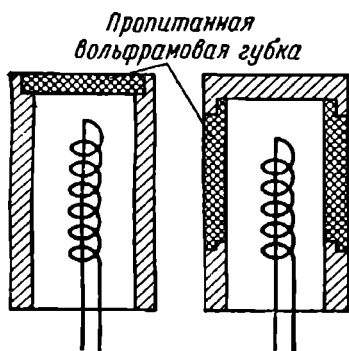


Рис. 3-3. Импрегнированные (пропитанные) катоды.

В нижней части цилиндра находится подогреватель. Вольфрамовая губка предназначена для защиты активного вещества от разрушения ударами положительных ионов.

Эффективность Л-катода несколько ниже эффективности обычных оксидных катодов, но по плотности тока превышает их: $\gamma = 1,5 \text{ а/см}^2$.

Рабочая температура 1 200—1 600° К, работа выхода 2,1 эв, долговечность до 10 000 ч, так как катод имеет большой запас активного вещества. Л-катод применяется в мощных генераторных лампах.

Импрегнированный (пропитанный) катод. Этот катод является улучшенным Л-катодом (рис. 3-3). В нем отсутствует специальная камера для

помещения активного вещества. Катод из пористого вольфрама (губки) цилиндрической или другой формы пропитывается в активной массе, состоящей из смеси химических соединений щелочноземельных металлов, обычно алюминатом бария. Подогреватель находится внутри камеры. Рабочая температура катода $1100—1700^{\circ}\text{K}$, работа выхода $1,7\text{ эв}$; плотность тока $\gamma=9\text{ а/см}^2$, эффективность $H=100—1000\text{ ма/вт}$, долговечность не менее 5000 ч . Импрегнированный катод применяется в мощных генераторных лампах, особенно в лампах дециметрового и сантиметрового диапазона.

М-катод. Это металлокерамический спрессованный и спеченный катод. Изготавливается он из смеси порошков металлов никеля и вольфрама с карбонатом бария. Смесь прессуется в формы цилиндрическую, параллелепипеда или какую-нибудь другую. Затем смесь спекается в атмосфере водорода.

Рабочая температура порядка 1100°K , максимальная плотность тока эмиссии $\gamma=0,5\text{ а/см}^2$, долговечность примерно 5000 ч . М-катод может быть как прямого, так и косвенного накала.

3-6. КОНТРОЛЬ РЕЖИМА НАКАЛА

Для каждой электронной лампы заводом-изготовителем указывается режим лампы, т. е. величина номинальных напряжений на электродах и токов в цепях лампы, в том числе и для цепи накала. Номинальная мощность накала устанавливает такую температуру нити накала, при которой лампа будет иметь наибольшую долговечность при относительно высокой эффективности катода.

Режим накала можно контролировать либо по вольтметру, либо по амперметру, т. е. по напряжению и по току. Если катод прямого накала, то амперметр включается в цепь со стороны отрицательного конца нити накала, где через амперметр будет протекать сумма токов, состоящая из накального и половины анодного тока (рис. 3-4). Амперметр, включенный со стороны положительного конца нити накала, будет показывать разность этих токов. Если же по нему установить номинальное значение тока накала, то отрицательный конец нити накала будет перегреваться и лампа скорее выйдет из строя.

Следовательно, при поддержании режима накала по амперметру последний должен включаться только со стороны отрицательного конца нити накала и это требование еще не гарантирует постоянства температуры нити — со временем она будет повышаться. Объясняется это тем, что при работе лампы вследствие испарения металла нить становится тоньше и на меньшее сечение провода будет приходиться одна и та же величина тока, что повышает плотность тока накала и соответственно температуру катода.

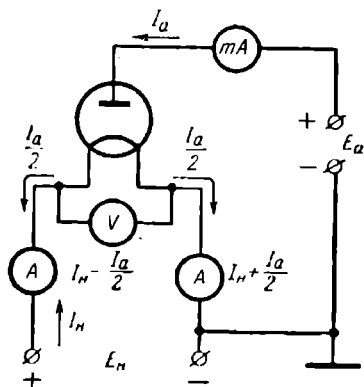


Рис. 3-4. Контроль режима накала лампы.

Контроль режима накала по вольтметру обеспечивает примерно одинаковую плотность тока накала, так как с уменьшением сечения провода увеличится его сопротивление и при постоянном напряжении накала уменьшится ток накала, отчего плотность тока и температура катода со временем не изменяются. Регулировка режима накала производится реостатом в цепи накала.

Для защиты электронных ламп от перегрева и получения постоянного тока в цепи накала их применяют бареттеры.

Бареттером называется газонаполненный прибор, служащий для стабилизации тока, протекающего через него. Бареттер состоит из стеклянного баллона, наполненного водородом, внутри которого помещена железная или вольфрамовая проволочка. Ток, проходя через проволочку, разогревает ее, и тепло при помощи водорода отводится к баллону, а через него в пространство. Водород обладает наибольшей теплопроводностью по сравнению с другими нейтральными газами. Железная проволочка применяется потому, что температурный коэффициент сопротивления очень велик ($\alpha_{\circ} = 0,0048—0,0062$). Но железо не выдерживает перегрузок, поэтому чаще применяется вольфрам, который хотя имеет меньший температурный коэффициент сопротивления, чем железо, зато устойчив при перегрузках.

Ввиду того что тепловые явления в металлах и газах протекают по различным законам, можно подобрать такие условия (рабочую температуру проволоочки, давление и объем газа), при которых сопротивление бареттера будет изменяться прямо пропорционально приложенному к нему напряжению.

На рис. 3-5 показаны включение бареттера в схему и вольт-амперная характеристика его.

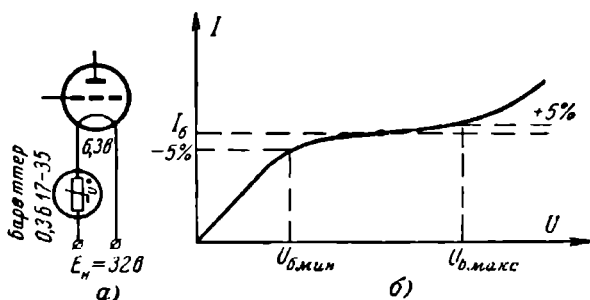


Рис. 3-5. Бареттер.

а — условное изображение; б — вольт-амперная характеристика.

Параметры бареттера: ток бареттирования I_0 ; напряжение бареттирования, т. е. минимальное и максимальное значения напряжений на бареттере, когда ток от среднего значения (I_0) изменяется не более $\pm 5\%$. Маркировка бареттера состоит: из цифры, означающей величину тока бареттирования (среднее значение тока стабилизации) в амперах, буквы Б (бареттер) и чисел, указывающих максимальное и минимальное значения напряжения бареттирования.

Бареттеры применяются в цепях с медленно изменяющимся напряжением, например, при питании нити накала от аккумулятора или сети переменного тока. В цепях с резкими изменениями напряжения бареттер не применяется, так как он обладает большой тепловой инерцией (температура нити устанавливается через 2—4 мин).

Напряжение источника питания накала при включенном бареттере должно быть больше напряжения нака-

ла лампы на величину среднеарифметического значения напряжений бареттирования:

$$E_{\text{н}} = U_{\text{н}} + \frac{U_{\text{мин}} + U_{\text{макс}}}{2}, \quad (3-4)$$

где $U_{\text{н}}$ — напряжение нити накала лампы;

$U_{\text{мин}}$ — минимальное напряжение бареттирования;

$U_{\text{макс}}$ — максимальное напряжение бареттирования.

Например, при напряжении нити накала 6,3 в и бареттере типа 0,3Б17-35 напряжение источника питания должно быть:

$$E_{\text{н}} = U_{\text{н}} + \frac{U_{\text{мин}} + U_{\text{макс}}}{2} = 6,3 + \frac{17 + 35}{2} = 32 \text{ в.}$$

Тогда при изменении напряжения накала на ± 9 в ток накала будет практически постоянным.

Основные данные бареттеров, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 3-1.

Таблица 3-1

Маркировка бареттеров	Ток стабилизации, ма	Напряжение стабилизации, в	
		$U_{\text{мин}}$	$U_{\text{макс}}$
0,3Б17-35	285—315	17	35
0,3Б65-135	285—315	65	135
0,85Б5,5-12	800—900	5,5	12
1Б10-17	950—1 050	10	17

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под электронной эмиссией и, в частности, под термоэлектронной эмиссией?
2. Перечислите параметры термокатода и укажите каков их физический смысл.
3. Укажите различие в конструкции катода прямого и косвенного накала.
4. Какой материал применяется для изготовления катодов прямого накала?
5. Укажите на достоинства и недостатки карбидированного катода по сравнению с торированным.
6. Как влияет на работу катода перекал и недокал, в частности, на оксидный катод?
7. Что означает «Потеря эмиссии катода»?
8. По какому прибору, вольтметру или амперметру, точнее можно контролировать режим накала?
9. Бареттер, его устройство и область применения. Может ли бареттер реагировать на изменения тока накала, изменяющегося скачком?

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ
ДВУХЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА
(диод)

4-1. УСТРОЙСТВО ДИОДА

Диод — наиболее простая электронная лампа, имеющая два электрода: катод и анод (рис. 4-1). Катод 2 может быть как прямого накала, так и косвенного. Он помещается внутри анода 1, форма которого может быть различной в зависимости от конструкции катода, либо в виде цилиндра (рис. 4-1, а), либо в виде короба —

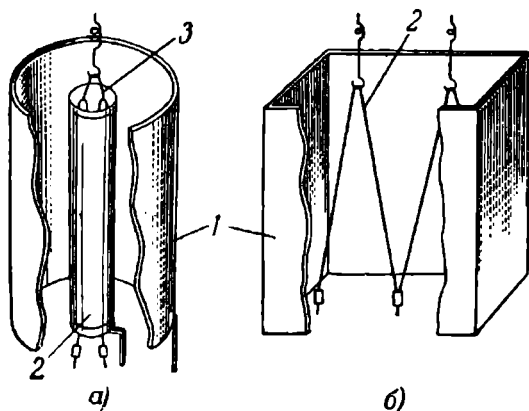


Рис. 4-1. Форма анодов.

а — для катодов косвенного накала — цилиндрическая; *б* — для катодов прямого накала — плоская; 1 — анод; 2 — катод; 3 — подогреватель.

плоский анод (рис. 4-1, б). Оба электрода помещают в стеклянный или металлический баллон, через стенки которого проходят выводы от электродов.

При нагреве катода током накала I_n возникает термоэлектронная эмиссия, причем принято считать потенциал катода равным нулю и от этого значения отсчитывать потенциалы всех других электродов.

Если анод находится под положительным потенциалом, то электроны, вылетающие из катода, движутся

к аноду под действием ускоряющего поля, во внешней цепи лампы при этом возникает анодный ток. Если изменить полярность батарей, т. е. подать на анод напряжение, отрицательное относительно катода, то электроны, отталкиваемые тормозящим полем, возвратятся на катод. Тока во внешней цепи не будет. Таким образом, внутри диода ток может протекать только в одном направлении — от анода к катоду,

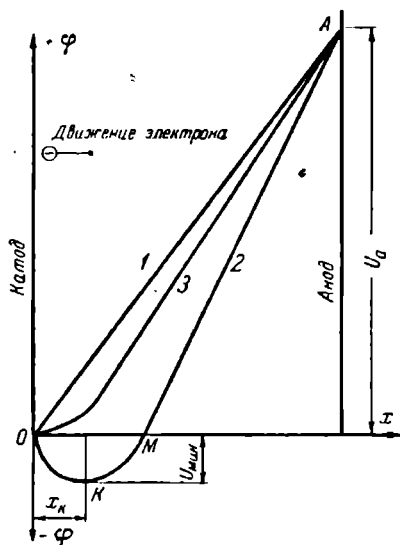


Рис. 4-2. Распределение потенциала между анодом и катодом диода. 1 — катод холодный; 2 — катод накаленный (режим пространственного заряда); 3 — катод накаленный (режим насыщения).

когда потенциал анода выше потенциала катода.

Анодный ток, определяемый числом электронов, достигающих анода, зависит как от тока эмиссии, так и от анодного напряжения. При увеличении тока эмиссии возрастает число электронов, покидающих катод, которые, попадая на анод, увеличивают тем самым анодный ток. Анодное напряжение также влияет на число электронов, достигающих анода. Таким образом, можно сказать, что анодный ток является функцией двух величин: анодного напряжения и тока эмиссии. Последний определяется температурой катода, зависящей от напряжения или тока накала.

Рассмотрим распределение потенциала в пространстве между катодом и анодом диода при различных напряжениях накала и при некотором фиксированном напряжении на аноде. Представим анод и катод в виде неограниченных плоскостей. На рис. 4-2 показаны кривые распределения потенциала. По оси ординат вверх отложены положительные значения потенциалов, а по оси абсцисс — расстояния от поверхности катода.

При $U_H=0$ катод не накален и эмиссии нет, тогда распределение потенциала между анодом и катодом в этом случае — прямая линия 1, соединяющая точки, соответствующие потенциалу катода $U_K=0$ и анода U_A .

При незначительном напряжении накала температура катода такова, что сообщенная электронам энергия меньше требуемой для совершения работы выхода и ток эмиссии равен по-прежнему нулю. Когда напряжение превысит некоторое значение $U_{п0}$, электроны, обладающие наибольшей собственной энергией, покидают катод, и ток эмиссии возрастает с увеличением напряжения накала.

При накаленном катоде (большое значение U_H) образуется отрицательный пространственный заряд во всем промежутке от катода до анода, вследствие чего положительный потенциал в любой точке пространства уменьшится. Вблизи катода, на расстоянии x_K плотность пространственного заряда максимальна и потенциал этой точки относительно катода будет отрицательный, что отмечено участком кривой 2 ниже оси x . Поэтому электроны, эмиттируемые катодом, прежде чем попасть в ускоряющее поле и затем на анод, должны преодолеть тормозящее поле прикатодного пространственного заряда (участок ОК).

Для преодоления этого тормозящего действия поля начальная скорость электронов, покидающих катод, должна быть больше некоторой величины, определяемой потенциалом $U_{мин}$.

Кривая 3 соответствует режиму насыщения, когда прикатодный пространственный заряд отсутствует.

4-2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА

Характеристикой называется выраженная графически зависимость одной величины от другой. Для диода достаточно иметь две характеристики: анодную и эмиссионную. Они получают экспериментально, т. е. снимаются по точкам с помощью специальной схемы.

Схема для снятия характеристик. На рис. 4-3 изображены схемы для снятия характеристик диодов прямого накала и косвенного накала. В схеме для снятия характеристик диодов с катодом прямого накала минус источника анодного питания соединяется с минусом ис-

точки накала. Эта точка называется точкой нулевого потенциала. Относительно точки нулевого потенциала измеряется напряжение на аноде.

Анодное напряжение изменяется потенциометром R_2 (делителем напряжения). Если подвижной контакт на-

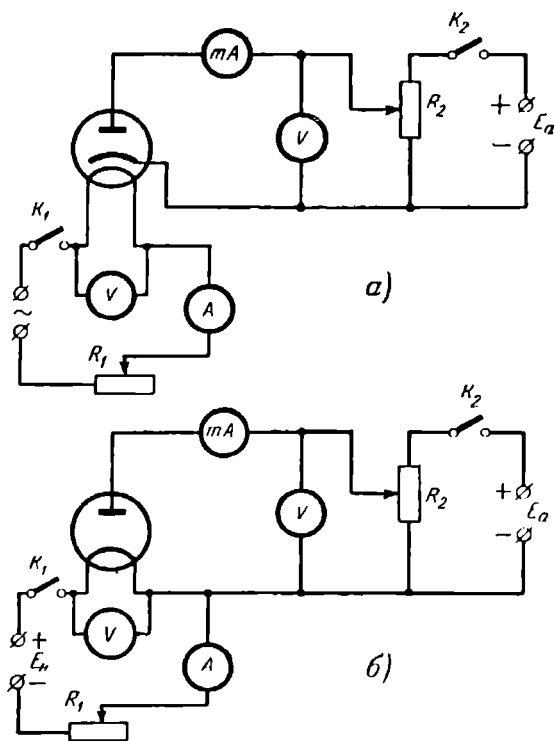


Рис. 4-3. Схемы для снятия анодных (вольт-амперных) характеристик диода.

а — с катодом косвенного накала; *б* — с катодом прямого накала.

ходится на конце потенциометра со стороны катода, то анодное напряжение равно нулю.

Анодные характеристики диода. На рис. 4-4,*а* приведена одна анодная (вольт-амперная) характеристика, выражающая зависимость анодного тока от изменения анодного напряжения при постоянном напряжении накала (постоянная температура катода).

Символически эта зависимость выражается так: $I_a = f(U_a)$; $U_H = \text{const}$.

Из рассмотрения анодной характеристики можно отметить три резко выраженных участка: нижний изгиб (OA), прямолинейный участок (AB) и верхний изгиб, переходящий в горизонтальную прямую (BC). Нижний изгиб характеристики получается при малых анодных напряжениях и объясняется действием пространственного заряда. Электроны, эмиттируемые катодом, отталкиваются пространственным зарядом к катоду, а небольшое ускоряющее электрическое поле мало влияет на крайние электроны пространственного заряда.

С увеличением анодного напряжения анодный ток увеличивается почти линейно (участок AB), а объемный заряд уменьшается, и когда объемный заряд исчезнет, анодный ток достигнет максимальной величины, называемой током насыщения I_s (участок BC). Он зависит только от температуры катода, так как катод при определенной температуре эмиттирует определенное количество электронов в единицу времени и все электроны попадают на анод. Анодное напряжение, при котором наступает ток насыщения, называется напряжением насыщения U_s . Для повышения тока насыщения необходимо увеличить температуру катода, что достигается увеличением напряжения накала.

Таким образом, прикатодный объемный заряд можно считать в образовании анодного тока катодом, поэтому его принято называть «виртуальный» (фиктивный) катод. Диаметр виртуального катода больше диаметра реального катода.

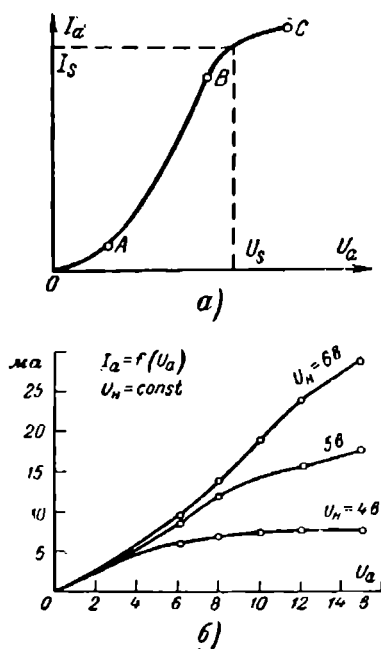


Рис. 4-4. Характеристики диода. а — анодная (вольт-амперная); б — семейство анодных характеристик.

На рис. 4-4,б изображено семейство анодных характеристик, т. е. несколько характеристик, снятых при различных напряжениях накала. Характеристики располагаются веерообразно. Чем выше температура накала катода, тем больше становится анодный ток и тем выше идет характеристика.

Анодные характеристики снимаются следующим образом. Устанавливается заданное напряжение накала, например, $U_{\text{н}}=4$ в. Напряжение на аноде изменяется от нуля через каждые 1—2 в и значения анодного тока соответственно записываются в таблицу. То же повторяется для другого значения напряжения накала, например, $U_{\text{н}}=5$ в и т. д. Показания приборов записываются в таблицу и по полученным данным наносятся точки, через которые проводят линию, являющуюся анодной характеристикой.

$U_{\text{а}}$	$I_{\text{а}}, \text{ма}$		
	$U_{\text{н}} =$	$U_{\text{н}} =$	$U_{\text{н}} =$

Строго говоря, характеристика проводится не через каждую точку, а через точки, определяющие направление характеристики, так как замеры токов и напряжений в процессе снятия характеристик могут быть не совсем точными, и такие точки не должны учитываться.

Ток насыщения можно получить только у вольфрамовых катодов. Активированные катоды не имеют строго выраженного тока насыщения и с увеличением анодного напряжения ток анода возрастает. Причина этого заключается в том, что оксид имеет большое сопротивление и за счет прохождения анодного тока через катод он получает дополнительную мощность нагрева, увеличивающую его температуру.

В анодных характеристиках принято различать области: 1) пространственного заряда, когда вокруг катода имеется электронное облачко, и 2) область насыщения, когда электронное облачко исчезает (рис. 4-5). Электрон-

ные лампы работают преимущественно в режиме пространственного заряда.

При нулевом анодном напряжении в анодной цепи, строго говоря, будет анодный ток (начальный ток I_0), хотя и очень малый — порядка нескольких микроампер, который в диодах с большим анодным током не учитывается.

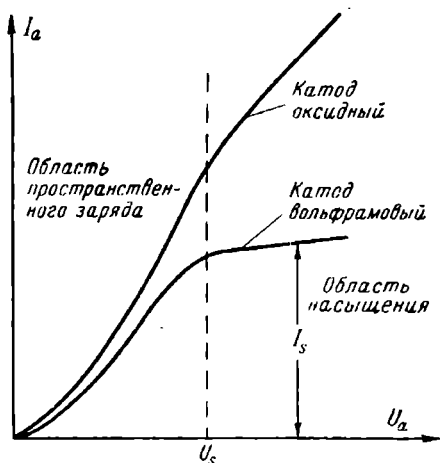


Рис. 4-5. Область насыщения и область пространственного заряда анодных характеристик.

Анодный ток при $U_a=0$ появляется за счет электронов, имеющих большую скорость вылета v , которые преодолевают действие пространственного заряда. Для получения анодного тока, равного нулю, необходимо к аноду приложить отрицательный запирающий потенциал U'_a (рис. 4-6). Положение начального участка характеристики и связанного с ним запирающего потенциала U'_a не является строго постоянным, а с течением времени изменяется. Дело в том, что ток I_0 зависит, помимо начальной скорости электронов, еще и от величины контактной разности потенциалов между анодом и катодом, так как электроды изготовлены из различных материалов. Если, например, работа выхода материала анода меньше, чем у материала катода, то между электродами возникает ускоряющее поле. Во время работы оксид катода испаряется, частично он оседает на аноде, отчего изменяется контактная разность потенциалов, а с ней изменяется началь-

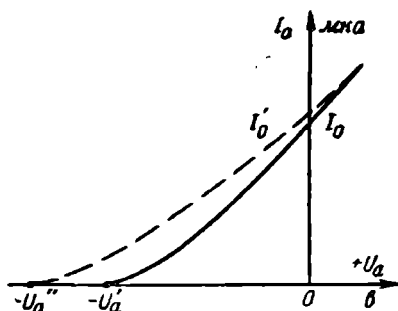
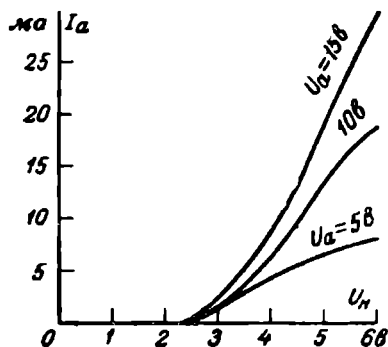


Рис. 4-6. Получение нулевого значения анодного тока диода.

ный участок характеристики и нулевое значение анодного тока.

Эмиссионные характеристики диода. Эти характеристики выражают зависимость анодного тока от изменения напряжения накала при постоянном анодном напряжении:



$$I_a = f(U_n); U_a = \text{const.}$$

Рис. 4-7. Семейство эмиссионных характеристик диода 6Х6С.

На рис. 4-7 приведено семейство эмиссионных характеристик диода 6Х6С, снятых при анодных напряжениях 5, 10 и 15 в. Эмиссионные характеристики начинаются не из начала координат, так как необходимо приложить некоторое определенное напряжение к нити накала (или подогревателя) для получения

температуры катода, при которой катод будет эффективно эмиттировать электроны.

4-3. ПАРАМЕТРЫ ДИОДА

Параметрами называются постоянные величины, характеризующие свойства лампы. У диода имеется два параметра: крутизна характеристики S и внутреннее сопротивление R_i .

Крутизна характеристики S — это параметр, который показывает, на сколько миллиампер изменится анодный ток при изменении анодного напряжения на 1 в. Она определяется отношением приращения анодного тока к приращению анодного напряжения:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \text{ [ма/в]}. \quad (4-1)$$

Крутизну характеристики можно определить по анодной характеристике диода (рис. 4-8,а). Для этого возьмем на прямолинейном участке характеристики две точки A и B . Определим для них значения анодных

напряжений, опуская из этих точек перпендикуляры на ось абсцисс, а также значения анодных токов, проектируя точки на ось ординат. В результате получим прямоугольный треугольник ABD , называемый характеристическим. Один катет треугольника определяет приращение анодного тока ΔI_a , а другой катет — приращение

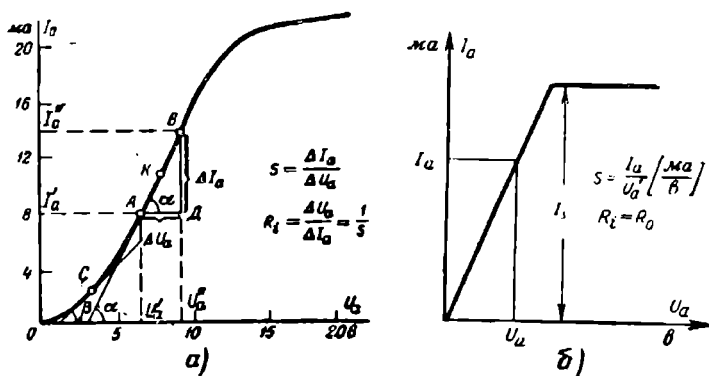


Рис. 4-8. Определение параметров днюда.

а — по анодной реальной характеристике; б — по идеализированной характеристике.

анодного напряжения ΔU_a , гипотенузой служит участок характеристики AB . Подставляя в формулу (4-1) вместо буквенных выражений цифровые значения, получим:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} = \frac{10 - 6}{6 - 4} = \frac{4}{2} = 2 \text{ ма/в.}$$

Крутизна характеристики в данном случае определена для участка характеристики AB , точнее для точки K , расположенной между точками A и B .

Из определения крутизны характеристики следует, что она пропорциональна тангенсу угла касательной в данной точке с осью абсцисс. Поскольку характеристика нелинейна, то разные точки характеристики имеют различную крутизну. Например, проведя касательную к точке A , увидим, что она сливается с участком характеристики AB . Крутизна характеристики в точке C будет меньше, чем в точках A и B . Крутизна характеристики постоянна только для прямолинейного участка характеристики.

Для любой точки характеристики крутизна представляет собой первую производную от анодного тока по анодному напряжению:

$$S = \frac{dI_a}{dU_a} \text{ [ма/в]}. \quad (4-2)$$

Для диода S находится в пределах 1—10 ма/в.

Для определения внутреннего сопротивления и R_i диода берется отношение приращения анодного напряжения к приращению анодного тока:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \text{ [ом]}, \quad (4-3)$$

или можно сказать, что внутреннее сопротивление диода есть величина, обратная крутизне характеристики:

$$R_i = \frac{1}{S}. \quad (4-4)$$

Если крутизна характеристики берется в миллиамперах на вольт, то сопротивление получается в килоомах. Для получения сопротивления в омах крутизна характеристики должна быть выражена в амперах на вольт.

Определим, например, R_i для диода, у которого $S = 2 \text{ ма/в}$,

$$R_i = \frac{1}{S} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ ком}$$

или

$$R_i = \frac{1}{S} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-3}} = \frac{10^3}{2} = 500 \text{ ом}.$$

Физически внутреннее сопротивление означает сопротивление промежутка между анодом и катодом для переменного тока с малыми амплитудами при наличии постоянного анодного тока, протекающего через диод.

Иногда внутреннее сопротивление R_i называют дифференциальным сопротивлением диода, которое находится в пределах от нескольких ом до нескольких десятков килоом.

Внутреннее сопротивление в дифференциальной форме имеет следующий вид:

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a} \text{ [ом]}. \quad (4-5)$$

Сопrotивление диода постоянному току R_0 . Помимо сопротивления диода переменному току, определяют еще сопротивление диода для протекающего через него постоянного тока, хотя это сопротивление и не является параметром диода. Для определения R_0 берется отношение не приращений напряжения к приращению тока, а отношение абсолютных значений напряжения и тока, т. е. R_0 определяется по закону Ома:

$$R_0 = \frac{U_a}{I_a} \text{ [ом]}. \quad (4-6)$$

Для точки A (рис. 4-8,а) на характеристике сопротивления диода постоянному току

$$R_0 = \frac{U_a}{I_a} = \frac{4}{6 \cdot 10^{-3}} = \frac{4000}{6} = 660 \text{ ом}.$$

Для точки B

$$R_0 = \frac{U_a}{I_a} = \frac{6}{10 \cdot 10^{-3}} = 600 \text{ ом}.$$

Сопrotивление диода переменному току R_i не равно сопротивлению его для постоянного тока R_0 . Равенство этих сопротивлений ($R_i = R_0$) возможно только при спрямлении (идеализации) анодных характеристик (рис. 4-8,б). Тогда параметры диода S и R_i также определялись бы отношением абсолютных значений тока и напряжения.

4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИОДА МЕТОДОМ ДВУХ ОТСЧЕТОВ

Определение параметров диода по характеристическому треугольнику является делом трудоемким, так как требуется сначала снять характеристику по точкам. Поэтому практически применяют так называемый метод «двух отсчетов». В этом случае вместо снятия характеристики измеряют только значения анодного тока для заданных анодных напряжений, соответствующих вершинам характеристического треугольника. Измерения производятся в схеме для снятия характеристик. Сначала устанавливают напряжение на аноде U'_a (рис. 4-8,б) и отмечают величину анодного тока I'_a (первый отсчет).

Для получения второго отсчета изменяют напряжение на аноде, т. е. увеличивают его или уменьшают. Для нового анодного напряжения U''_a также записывают величину анодного тока I''_a .

Показания приборов заносятся в таблицу, по которым определяют приращения анодного напряжения и приращения анодного тока.

Примечания: 1) $U''_a > U'_a$ и $I'' > I'$;

$$2) S = \frac{I''_a - I'_a}{U''_a - U'_a} \text{ [ма/в]}.$$

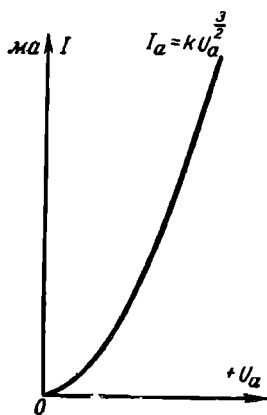
4.5. ЗАКОН СТЕПЕНИ ТРЕХ ВТОРЫХ ДЛЯ ДИОДА

Анодную характеристику, приведенную на рис. 4-4, можно не снимать по точкам, как это было сделано, а построить расчетным путем по формуле

$$I_a = kU_a^{3/2}, \quad (4-7)$$

где k — коэффициент, зависящий от конструкции диода; U_a — напряжение на аноде диода.

Коэффициент k учитывает размеры и конструкцию электродов, и его можно подсчитать, тогда для данной конструкции диода он будет постоянным. Следовательно, анодный ток зависит только от анодного напряжения. Задаваясь величиной анодного напряжения, по формуле можно определить величину анодного тока.



Построенная таким образом кривая изображена на рис. 4-9. Она представляет собой полукубическую параболу. Следовательно, на этой кривой нельзя найти прямолинейный участок характеристики и участок, соответствующий режиму насыщения, и если допускается выражение «прямолинейный участок характеристики», то надо понимать под этим термином участок характеристики, приближающийся к прямолинейному, и чем меньше такой участок, тем он ближе к прямолинейному.

Рис. 4-9. Теоретическая характеристика диода, соответствующая закону степени трех вторых (полукубическая парабол).

4-6. ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХЭЛЕКТРОДНЫХ ЛАМП

Основным назначением двухэлектродной лампы является преобразование переменного тока в постоянный, т. е. выпрямление переменного тока. Схем выпрямления имеется много, для примера рассматриваются только две: однополупериодная и двухполупериодная.

Однополупериодная схема выпрямителя изображена на рис. 4-10. Схема выпрямителя состоит из кенотрона, трансформатора с тремя обмотками

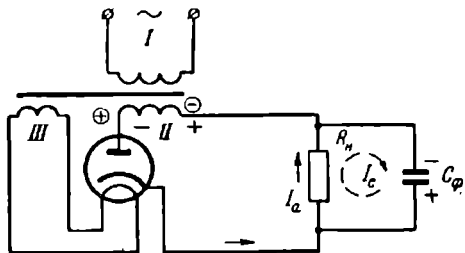


Рис. 4-10. Схема однополупериодного выпрямителя с простейшим емкостным фильтром.

(I — первичная, II — вторичная, или анодная и III — накальная) и нагрузочного сопротивления R_n . Под нагрузкой или нагрузочным сопротивлением понимается все то, что потребляет ток, например, анодные цепи радиоприемника и др.

При прохождении переменного тока через первичную обмотку трансформатора во вторичной обмотке индуцируется переменное напряжение, и когда на аноде кенотрона будет положительный полупериод напряжения, через него и нагрузочное сопротивление потечет анодный ток. В следующий полупериод на аноде будет отрицательное напряжение, и ток через кенотрон не потечет. Следовательно, ток в анодной цепи за время периода будет протекать только за один положительный полупериод, поэтому и схема выпрямления называется однополупериодной.

Выпрямленный ток и напряжение на нагрузке будут пульсирующими. Для питания же анодных цепей ламп необходимо иметь постоянное напряжение. Для сглажи-

вания пульсаций выпрямленного тока и напряжения применяется фильтр. Простейшим фильтром является емкость, подключенная параллельно нагрузке (рис. 4-10). Работу емкостного фильтра можно объяснить следующим образом. При прохождении тока через кенотрон большая часть его ответвляется на конденсатор фильтра и заряжает его. За отрицательный полупериод, когда ток через кенотрон не протекает, ток через нагрузку будет протекать за счет разряда конденсатора в том же направлении, что и за положительный полупериод (показано пунктиром). У конденсатора имеется еще вторая, параллельно включенная цепь: вторичная обмотка трансформатора и кенотрон. Но через эту цепь конденсатор разряжаться не может, так как на анод кенотрона с конденсатора фильтра поступает отрицательное напряжение. Плюс выпрямленного напряжения будет всегда у катода кенотрона, а минус — у конца вторичной обмотки трансформатора. Это легко определить, если проследить направление выпрямленного тока через нагрузку (ток протекает от плюса к минусу).

На рис. 4-11,а приведены кривые, поясняющие работу схемы выпрямителя без фильтра. Кривая 1 показывает форму напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Кривая 2 характеризует напряжение на аноде: напряжение за положительный полупериод, когда через кенотрон протекает ток, становится много меньше, так как большая часть напряжения падает на нагрузку. Кривая 3 изображает форму выпрямленного тока — ток через кенотрон протекает только в течение положительного полупериода анодного напряжения. Кривая 4 показывает, что напряжение на нагрузке пульсирующее, и когда ток через кенотрон и нагрузку не протекает, то напряжение на нагрузке равно нулю. При выпрямлении тока промышленной частоты частота пульсаций будет равна 50 гц.

На рис. 4-11,б показаны кривые, характеризующие работу выпрямителя с фильтром. Кривая 1 показывает, что анод кенотрона всегда находится под отрицательным потенциалом, равным выпрямленному напряжению на нагрузке. Ток через кенотрон будет протекать не за весь положительный полупериод, как при отсутствии фильтра, а только за часть полупериода, когда напряжение на вторичной обмотке трансформатора превышает

напряжение на фильтре (кривая 2). При наличии фильтра (кривая 3) ток через нагрузку протекает и в отрицательный полупериод. Когда конденсатор фильтра заряжается, соответственно повышается и величина выпрямленного тока. При разряде конденсатора уменьшается и выпрямленный ток, но чем больше емкость конденсатора фильтра, тем ближе будет пульсирующий

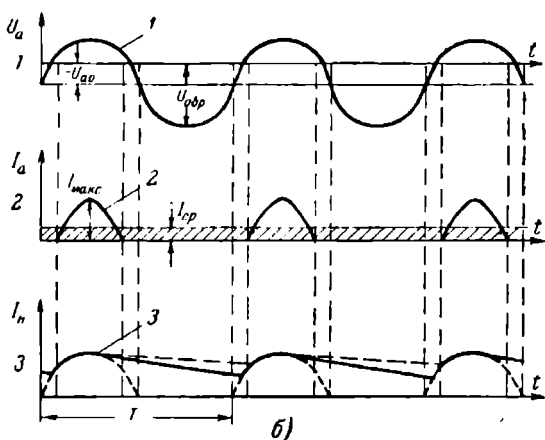
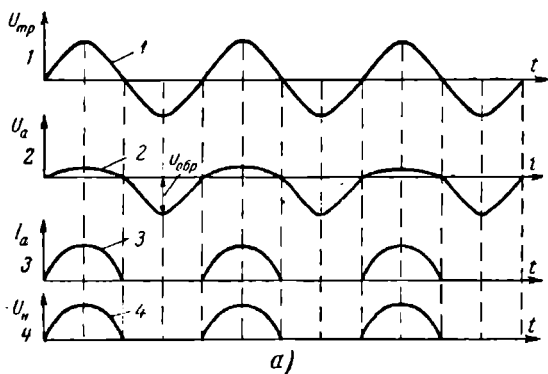


Рис. 4-11. Кривые, поясняющие работу однополупериодного выпрямителя.

a — без фильтра; 1 — напряжение на трансформаторе; 2 — напряжение на аноде кенотрона; 3 — ток, протекающий через нагрузку; 4 — напряжение на нагрузке; *б* — с фильтром; 1 — напряжение на аноде кенотрона; 2 — выпрямленный ток в импульсе и среднее значение тока; 3 — ток, протекающий через нагрузку; сплошная линия соответствует малой емкости фильтра, а пунктирная — большей.

ток приближаться к постоянному (на кривой 3 показано пунктиром). Недостатком схемы однополупериодного выпрямителя являются: 1) неполное использование мощности трансформатора (за второй полупериод мощность не используется) и 2) трудность получения выпрямленного тока с малой пульсацией.

На рис. 4-12,а показана схема двухполупериодного выпрямителя на двух отдельных кенотронах, а на рис. 4-12,б, в—на одном двуханодном

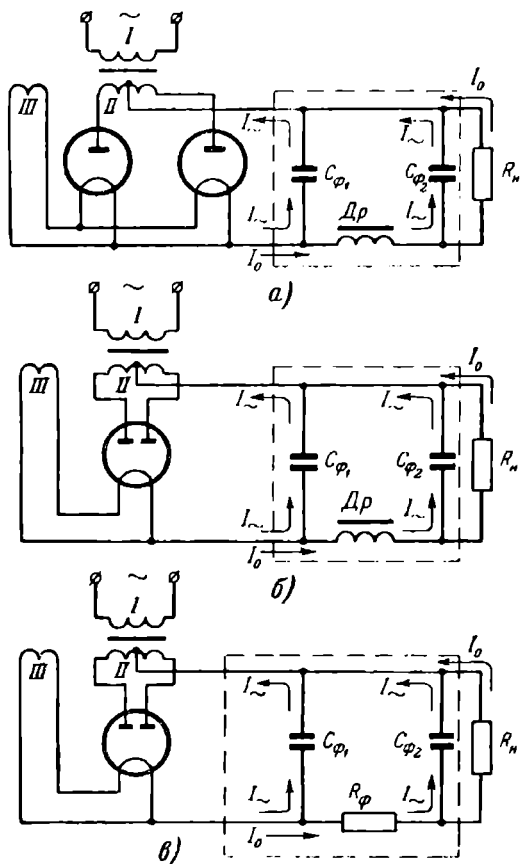


Рис. 4-12. Схемы двухполупериодных выпрямителей.

а — на двух одноанодных кенотронах; б — на одном двуханодном кенотроне с индуктивно-емкостным фильтром; в — с резистивно-емкостным фильтром.

кентроне. Как видно из рисунков, схема двухполупериодного выпрямителя представляет собой две схемы однополупериодного выпрямителя, объединенные в одной (средней) точке, которые работают поочередно на общую нагрузку R_n . Концы вторичной обмотки трансформатора присоединяются к анодам кентрона. Принцип действия схемы двухполупериодного выпрямителя заключается в следующем:

При прохождении переменного тока через первичную обмотку трансформатора во вторичной обмотке индуцируется переменное напряжение. На анодах кентронов переменные напряжения оказываются сдвинутыми по фазе на 180° (рис. 4-13, кривые 1 и 2). Допустим, что в данный момент времени на левом конце вторичной обмотки трансформатора плюс, а на правом конце — минус. Тогда через второй кентрон ток протекать не будет. Ток потечет через первый кентрон, через обмотку дросселя фильтра, нагрузочное сопротивление и к средней точке вторичной обмотки трансформатора. Следовательно, за данный полупериод работает только левый кентрон и левая половина вторичной обмотки трансформатора. За следующий полупериод работает правый (второй) кентрон и правая половина вторичной обмотки трансформатора и т. д. Через нагрузку ток будет протекать за каждый полупериод и, как видно на рис. 4-13 (кривая 5), пульсации тока становятся менее глубокими по сравнению с однополупериодным выпрямлением, а частота их повышается в два раза, т. е. равна 100 гц.

Если же в двухполупериодном выпрямителе применить сложный фильтр — с двумя конденсаторами и дросселем, то пульсации тока станут еще меньше, так как дроссель имеет свойство препятствовать изменению тока. Например, при увеличении тока, протекающего через дроссель, изменяется магнитный поток, пронизывающий дроссель, вследствие чего на зажимах дросселя образуется э. д. с., создающая встречный ток, поэтому ток в цепи останется практически неизменным. При уменьшении же тока на зажимах дросселя возникает э. д. с., создающая попутный ток. Такой фильтр может быть применен и в схеме однополупериодного выпрямителя, позволяя тем самым улучшить результаты в сравнении с емкостным фильтром.

Из электротехники известно, что сложная форма тока может быть представлена как сумма токов постоянной составляющей и ряда синусоидальных колебаний (гармоник). При разложении пульсирующего тока на постоянную и переменные составляющие можно работу

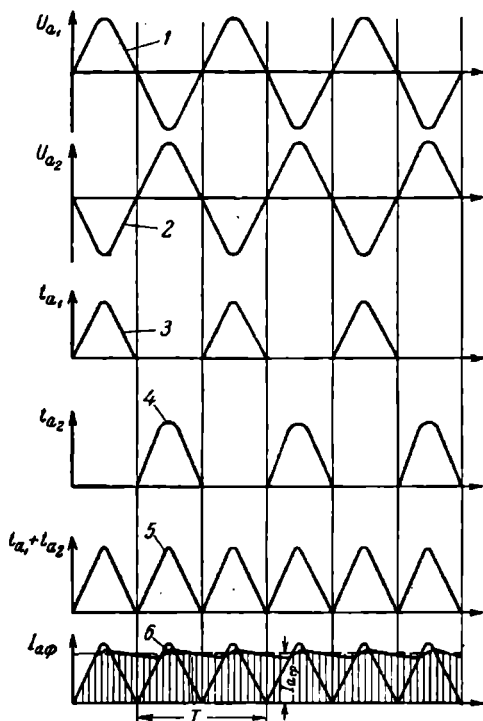


Рис. 4-13. Кривые, поясняющие работу двухполупериодного выпрямителя.

1, 2 — напряжения на анодах 1-го и 2-го катодов; 3, 4 — форма токов, протекающих за каждый диод; 5 — ток, протекающий через нагрузку выпрямителя (без фильтра); 6 — ток, сглаженный фильтром

фильтра объяснить так. Дроссель для переменной составляющей тока представляет большое реактивное сопротивление $X_L = 2\pi fL$, и она преимущественно будет проходить через емкость фильтра $C_{\phi 1}$, а если часть ее и пройдет через дроссель, то она замкнется через конденсатор фильтра $C_{\phi 2}$ (рис. 4-12); следовательно через

нагрузку пройдет только постоянная составляющая выпрямленного тока и соответственно напряжение на нагрузке будет постоянным. Если нужно иметь малое выпрямленное напряжение и малую величину тока, то при том же выпрямителе в фильтре вместо дросселя применяют активное сопротивление, выбираемое в зависимости от величины напряжения, которое требуется погасить. Реостатно-емкостный фильтр показан на рис. 4-11, в.

Выпрямление (детектирование) токов высокой частоты. Принципиально нет никакой разницы в выпрямлении токов как низкой, так и высокой частоты. Но кенотроны не могут быть применены в качестве детектора из-за большой междуэлектродной

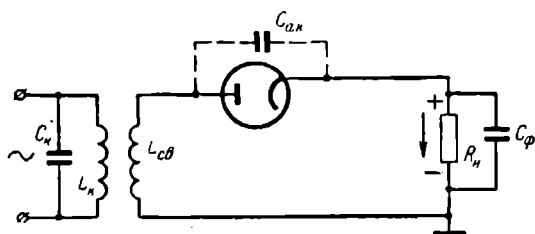


Рис. 4-14. Схема высокочастотного однополупериодного выпрямителя (детектора).

емкости между катодом и анодом $C_{а.к}$. Эта емкость включена параллельно кенотрону и шунтирует его. Для низких частот она не оказывает существенного влияния, так как представляет собой сопротивление, значительно большее внутреннего сопротивления R_i . Приняв в среднем для кенотронов $R_i=200$ ом и $C_{а.к}=25$ пф, получим для $f=50$ гц — емкостное сопротивление $C_{а.к}$ порядка 100 Мом. Для высоких же частот это сопротивление становится меньше внутреннего сопротивления кенотрона. Например, для $f=60$ Мгц, $X_c=100$ ом, а для частоты $f=600$ Мгц, $X_c=10$ ом. Тогда через кенотрон пройдет лишь небольшая часть переменного тока и продетектированное напряжение на нагрузке будет мало. Детекторы имеют малые междуэлектродные емкости, что достигается уменьшением поверхностей анодов и увеличением расстояния между катодом и анодом. Значения междуэлектродных емкостей для детекторов приводятся

в паспортных данных. Для двойного диода 6Х6С емкость $C_{a,k}=4$ пф, а для диода 2Д1С емкость $C_{a,k}=0,25$ пф.

На рис. 4-14 приведена схема однополупериодного выпрямителя (детектора) токов высокой частоты с простейшим емкостным фильтром. Напряжение высокой частоты поступает с колебательного контура.

4-7. МАКСИМАЛЬНОЕ ОБРАТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ КЕНОТРОНА

Под обратным напряжением на кенотроне $U_{обр}$ понимается напряжение, приложенное к электродам кенотрона обратными знаками: к аноду — минус, а к катоду — плюс.

При обратном напряжении на кенотроне, не превышающем допустимого для него значения, вентильное свойство кенотрона не должно нарушаться. Если же обратное напряжение окажется больше допустимого, тогда может произойти электрический пробой между-электродного промежутка кенотрона, либо через кенотрон потечет большой обратный ток. В том и другом случае работа кенотрона нарушится. Для обратного тока эмиттером будет служить анод, нагретый во время работы до достаточно высокой температуры; эмиттировать же электроны будет оксид, осажденный на аноде при распылении его накаленным катодом.

Образование обратного напряжения, получающегося в выпрямителе, легче всего проследить в схеме однополупериодного выпрямителя. Напряжение на аноде кенотрона изменяется как по величине, так и по знаку (рис. 4-11,б, кривая I). Например, когда со вторичной обмотки трансформатора на анод кенотрона поступает положительный полупериод напряжения, то через кенотрон протекает ток, который на нагрузке создает падение напряжения $U_{a0}=I_a R_{II}$, почти равное амплитудному значению напряжения на трансформаторе. Напряжение же на аноде в это время будет очень мало. Оно равно разности напряжений на трансформаторе и на нагрузке (или на фильтре), так как оба источника тока включены встречной полярностью. За следующий полупериод знак напряжения на аноде кенотрона меняется на отрицательный и величина анодного напряжения (обратного) окажется равна сумме напряжений на трансформаторе и на фильтре, так как два источника тока соединены последовательно согласной полярностью.

Для нормальной работы кенотрона выпрямленное напряжение не должно превышать 30% от обратного напряжения. Например, для кенотрона 5ИЦС, у которого $U_{обр}=1450$ в, наибольшее выпрямленное напряжение будет порядка $U_0=450$ в.

4-8. МАКСИМАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ, РАССЕИВАЕМАЯ НА АНОДЕ

Электронный поток в ускоряющем электрическом поле приобретает кинетическую энергию, которая передается аноду в виде тепловой энергии, или, как принято говорить, рассеивается на аноде в виде тепла. Эта мощность определяется произведением анодного тока на анодное напряжение:

$$P_a = I_a U_a. \quad (4-8)$$

Для каждой лампы в справочниках приводятся данные предельно допустимой мощности, рассеиваемой на аноде $P_{a, макс}$, которая и считается параметром лампы. Следовательно P_a должно быть меньше $P_{a, макс}$, в противном случае анод лампы может перегреться и из него начнет выделяться газ, который нарушит нормальную работу вакуумной лампы. Если $P_a \geq P_{a, макс}$, то анод лампы может настолько перегреться, что даже расплавится. Для лучшего охлаждения анода к нему иногда добавляются металлические пластинки (ребра жесткости), увеличивающие поверхность анода.

4-9. МАТЕРИАЛ АНОДА

Материал анода маломощных (приемно-усилительных) ламп должен быть дешевым и легко обрабатываемым металлом с достаточно высокой температурой плавления. Этому требованию отвечает никель, температура плавления которого 1725° К. Рабочая температура допускается до 870° К. Для лучшего охлаждения анода его поверхность чернят. Аноды мощных ламп изготавливаются из более тугоплавкого материала, молибдена ($T_{пл}=2900^\circ$ К) и тантала ($T_{пл}=3220^\circ$ К). Находит применение для изготовления анодов и графит, который хорошо поглощает газы, в особенности водород и азот. Важным свойством графита является большая работа выхода. Поскольку механическая прочность графита

незначительна, то толщина изделия из него должна быть не менее 1,5 мм.

Размер анода зависит от допустимой рассеиваемой мощности и материала, из которого изготовлен анод. В табл. 4-1 приведены данные удельной мощности материалов и рабочая температура анодов.

Таблица 4-1

Наименование материала	Удельная мощность, $вт/см^2$	Рабочая температура, °K
Никель белый	0,25	700
Никель черпепый	1,0	770
Молибден	5,0	1 500
Тантал	8,0	1 550
Графит	50	1 700

4-10. ТИПЫ ДВУХЭЛЕКТРОДНЫХ ЛАМП

В зависимости от назначения различают три типа выпрямительных ламп: детекторные диоды; низковольтные и высоковольтные кенотроны.

Детекторные диоды могут быть как одноанодные (6Д6А), так и двуханодные (6Х2П, 6Х6С). Величина тока, выпрямленного каждым анодом, мала, порядка 1—10 ма. Обратное напряжение составляет 450—465 в. Для детекторных диодов имеет значение величина начального анодного тока, она не превышает 5—20 мка.

Катоды диодов не соединяются с подогревателем, а имеют отдельные выводы. В двуханодных диодах для уменьшения емкости между анодами помещают металлический экран, который имеет вывод на штырек цоколя.

Низковольтные кенотроны изготавливаются, как правило, двуханодными на обратное напряжение $U_{обр}=100—1700$ в и выпрямленный ток 35—125 ма (на каждый анод). Катоды низковольтных кенотронов бывают преимущественно косвенного накала, причем катод внутри лампы иногда соединяется с подогревателем во избежание пробоя изоляции между ними (5Ц4С).

Высоковольтные кенотроны изготавливаются только одноанодными на обратное напряжение $U_{обр}=12,5—40$ кв. Величина выпрямленного тока высоковольтных кенотронов, относящихся к категории приемно-усилительных ламп и питающих аноды кинескопов (1Ц1С,

1Ц7С), составляет всего от 0,3 до 2 ма. Для питания других устройств выпрямленный ток больше, но не превышает 100 ма. Маркировка таких кенотронов состоит из: буквы В (выпрямитель), цифры 1 (одноанодный) и дроби, числитель которой означает величину выпрямленного тока в амперах, а знаменатель — обратное напряжение в киловольтах. Например, маркировка В1-0,02/20 означает: высоковольтный кенотрон на обратное напряжение 20 кв и выпрямленный ток 20 ма; В1-0,1/40 — высоковольтный кенотрон на обратное напряжение 40 кв и выпрямленный ток 100 ма.

Таблица 4-2

Детекторные диоды

Маркировка	Число анодов	Катод	Начальный ток I_0 , мкА	Выпрямленный ток I_a , ма	Обратное напряжение $U_{обр}$, кВ	S , ма/в	$C_{в.к.}$, пф	Примечание
2Д1С	1	Оксидный, косвенного накала	5	0,1	0,01	0,5	0,25	Анод вверх баллона
6Д6А	2	То же	20	10	0,45	6,0	3,0	
6Х2П	2	" "	10	10×2	0,450	6,0	3,8	
6Х6С	2	" "	3—24	8×2	0,465	2,0	4,0	

Кенотроны

Маркировка	Число анодов	Катод	Выпрямленный ток I_a , ма	Обратное напряжение $U_{обр}$, кВ	Внутреннее сопротивление R_i , ком	Примечание
Низковольтные кенотроны						
5Ц3С	2	Оксидный, прямого накала	125×2	1,7	0,2	Катод соединен с подогревателем
5Ц4С	2	Оксидный, косвенного накала	62×2	1,45	0,15	
6Ц5С	2	То же	37×2	1,375	0,25	
6Ц4П	2	" "	37×2	1,0	0,25	
Высоковольтные кенотроны						
1Ц1С	1	Оксидный, прямого накала	0,5	15	7,5	
1Ц7С	1	То же	2,0	30	14,0	
1Ц11П	1	" "	0,3	20	20,0	
2Ц2С	1	Оксидный, косвенного накала	7,5	12,5	4,5	
В1-0,1/40	1	Карбидированный, прямого накала	100	40	1,0	

Внутреннее сопротивление высоковольтных кенотронов велико и находится в пределах от 1 до 20 *ком*. Катод может быть как прямого накала, так и косвенного.

Основные данные диодов и кенотронов приведены в табл. 4-2

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство и принцип действия диода.
2. Начертить схемное изображение диода с катодом прямого и косвенного накала.
3. Какие диоды называются кенотропами?
4. Система маркировки диодов и кенотронов.
5. Начертить кривую распределения потенциала в диоде для холодного и нагретого катода.
6. Начертить семейство характеристик диода: анодных (вольт-амперных) и эмиссионных.
7. Начертить схему для снятия характеристик диода.
8. Что называется током насыщения?
9. Перечислить параметры диода и указать их физический смысл.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ТРЕХЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА (триод)

5-1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРИОДА

Триодом называется электронная вакуумная лампа, имеющая три электрода: катод, анод и сетку. Сетка в триоде расположена между катодом и анодом (рис. 5-1). Конструктивно сетка выполняется в виде спирали из тонкой никелевой, молибденовой или вольфрамовой проволоочки диаметром от нескольких микрон до 1—2 *мм* в зависимости от мощности лампы. Шаг спирали зависит от конструкции лампы. Наименование «сетка» произошло от того, что первые лампы имели сетку, изготовленную из переплетенных проволочек. Такая форма сетки применяется и сейчас в лампах большой мощности, а также в маломощных лампах специальных типов, например в сверхвысокочастотных триодах.

В трехэлектродной лампе различают три электрические цепи: цепь накала, цепь анода и цепь сетки (рис. 5-2). Приведенная схема включения триода называется схемой с общим катодом, так как катод находится и в цепи сетки и в цепи анода. Общая точка O считается точкой нулевого потенциала, она обычно заземляется (потенциал земли условно принят за нуль). Напряжения на электродах лампы — сетки и анода — измеряются относительно катода, а в лампах с катодом прямого накала — по отношению к отрицательному концу нити накала.

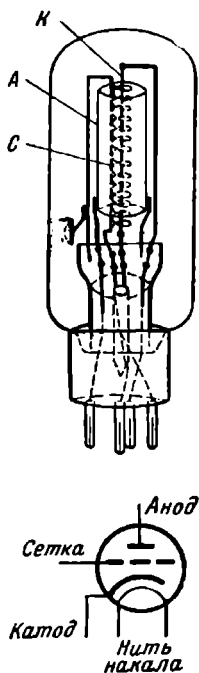


Рис. 5-1. Устройство триода и условное обозначение его в схемах.

Общая точка O считается точкой нулевого потенциала, она обычно заземляется (потенциал земли условно принят за нуль). Напряжения на электродах лампы — сетки и анода — измеряются относительно катода, а в лампах с катодом прямого накала — по отношению к отрицательному концу нити накала.

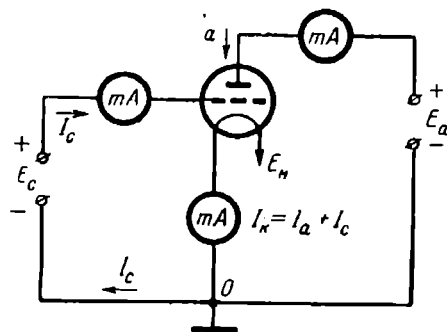


Рис. 5-2. Электрические цепи триода: анодная и сеточная. Стрелки указывают направление токов.

В диоде для изменения анодного тока необходимо изменять либо напряжение накала, либо анодное напряжение. В триоде анодным током может управлять сетка при неизменных напряжениях накала и анода. В зависимости от знака и величины приложенного к сетке напряжения она пропускает к аноду различное количество электронов. Отрицательное напряжение на сетке уменьшает анодный ток, так как между сеткой и катодом создается тормозящее поле. Электроны, не прошедшие через сетку, образуют между сеткой и катодом

электронное облачко, или отрицательный пространственный заряд. С увеличением отрицательного напряжения на сетке плотность пространственного (объемного) заряда возрастает, а анодный ток уменьшается. Наконец, при некотором значении отрицательного сеточного напряжения анодный ток достигает нуля (лампа «заперта»), объемный заряд в этом случае будет иметь

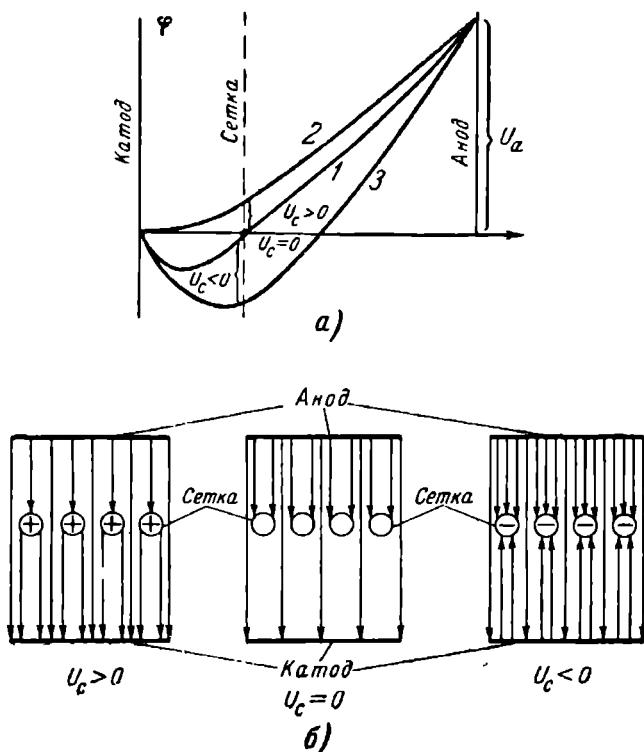


Рис. 5-3. Распределение потенциала в триоде (а) и силовых линий электрического поля при различных значениях напряжения на сетке (б).

максимальную плотность. Совершенно противоположно действует положительный потенциал сетки. В этом случае между сеткой и катодом образуется ускоряющее поле. При небольшом увеличении потенциала сетки анодный ток увеличивается, а плотность объемного заряда уменьшается. При некотором положительном па-

пряжении на сетке анодный ток достигает максимума, а объемный заряд исчезает.

Из изложенного ясно, что сетка выполняет роль управляющего электрода, регулируя величину анодного тока.

В триоде распределение потенциала в пространстве между анодом и катодом имеет отличие по сравнению с диодом. В диоде имеется ускоряющее поле анода и тормозящее поле объемного заряда у катода. В триоде добавляется еще электрическое поле, создаваемое потенциалом сетки, которое может быть как ускоряющим, так и тормозящим в зависимости от потенциала сетки. Наложение поля сетки на тормозящее поле пространственного заряда создает между катодом и сеткой различное распределение потенциала.

Графически распределение потенциала в триоде с учетом пространственного заряда показано на рис. 5-3,а: кривая 1 соответствует случаю, когда сетка имеет потенциал катода, кривая 2 — при положительном потенциале сетки и кривая 3 — при отрицательном. Там же показано (рис. 5-3,б) расположение силовых линий электрического поля при различных потенциалах сетки.

5-2. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИОДА

В триоде при постоянной температуре катода анодный ток зависит одновременно от напряжений на сетке U_c и на аноде лампы U_a :

$$I_a = f(U_c; U_a); U_n = \text{const.}$$

При наличии двух переменных величин нельзя выявить влияние каждой из них в отдельности на изменение анодного тока. Поэтому рассматривают зависимость анодного тока или только от изменения напряжения на сетке при постоянном анодном напряжении или только от изменения анодного напряжения при неизменном напряжении на сетке. Соответственно этому различают два вида характеристик анодного тока: анодно-сеточные и анодные.

Анодно-сеточными характеристиками называют графики зависимости анодного тока от напряжения на сетке лампы при постоянном анодном напряжении:

$$I_a = f(U_c); U_a = \text{const.} \quad (5-1)$$

На рис. 5-4 приведена анодно-сеточная характеристика, по которой можно определить величину анодного тока для любого значения сеточного напряжения. Для этого из точки на оси абсцисс, соответствующей заданному сеточному напряжению, нужно восставить перпендикуляр до пересечения с характеристикой. Точка пересечения проектируется на ось ординат для определения (по масштабу) величины анодного тока. По характеристике можно определить величину и знак па-

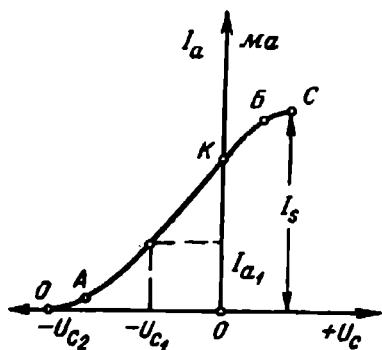


Рис. 5-4. Анодно-сеточная характеристика триода.

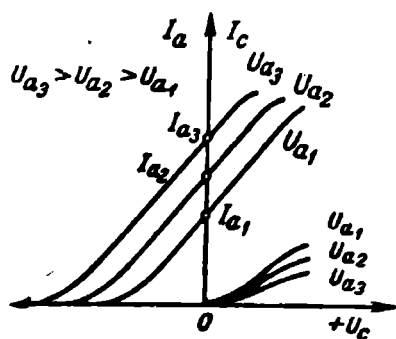


Рис. 5-5. Семейство из трех анодно-сеточных характеристик.

пряжения на сетке для получения любой заданной величины анодного тока. Для этого из точки на характеристике следует опустить перпендикуляр на ось абсцисс. Анодно-сеточная характеристика имеет три резко выраженных участка: почти прямолинейный участок AB ; нижний изгиб OA и верхний изгиб BC .

Для изучения свойств лампы необходимо иметь несколько характеристик — семейство характеристик. Семейство анодно-сеточных характеристик снимается при различных анодных напряжениях, однако для каждой данной характеристики анодное напряжение остается неизменным. На рис. 5-5 приведено семейство из трех характеристик. При увеличении анодного напряжения характеристика сдвигается влево параллельно самой себе, так как при большем анодном напряжении величина анодного тока для каждого значения сеточного напряжения увеличится. При уменьшении анодного напряжения характеристика расположится правее, так как при мень-

шем анодном напряжении величина анодного тока при одинаковых значениях напряжения сетки будет меньше.

Для снятия характеристик триода используется схема, приведенная на рис. 5-6. Анодное напряжение изменяется потенциометром R_2 , а напряжение на сетке — потенциометром R_1 .

Рекомендуется снимать анодно-сеточные характеристики в следующей последовательности. На анод подается и поддерживается постоянной заданная величина

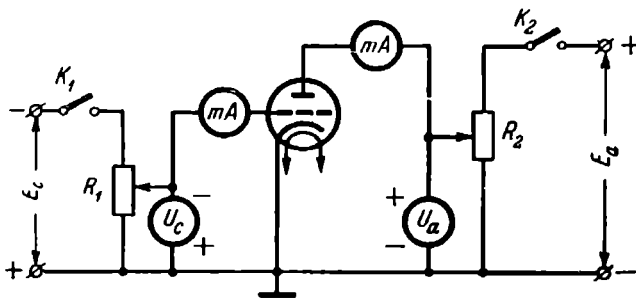


Рис. 5-6. Схема для снятия характеристик триода.

напряжения. На сетке лампы устанавливается отрицательное напряжение, равное напряжению запираения лампы $E_c = E_{зап}$, при котором анодный ток будет равен нулю. Затем уменьшают по абсолютной величине отрицательное напряжение на сетке и, изменяя его через 1—2 в, доводят до нуля, отмечая при этом величину анодного тока для каждого значения сеточного напряжения.

Часто ограничиваются характеристиками, снятыми при отрицательных напряжениях на сетке. Если же требуется иметь характеристики и в положительной области сеточных напряжений, то необходимо изменить полярность сеточного напряжения. Положительное напряжение изменяется через 0,5—1 в и доводится до такой величины, когда анодный ток не будет превышать значения, при котором мощность, рассеиваемая на аноде P_a , станет максимально допустимой. Максимальное значение анодного тока определяется формулой

$$I_{a, \max} = \frac{P_{a, \max}}{U_a}. \quad (5-2)$$

Полученные при измерениях данные записывают в таблицу, а затем по ним строят характеристики.

U_c	$I_a, \text{ма}$			
	$U_a =$	$U_a =$	$U_a =$	$U_a =$

Анодные характеристики дают представление об изменении анодного тока в зависимости от анодного напряжения при неизменном значении напряжения на сетке:

$$I_a = f(U_a); U_c = \text{const.}$$

Каждая анодная характеристика строится при постоянном напряжении на сетке. Несколько таких харак-

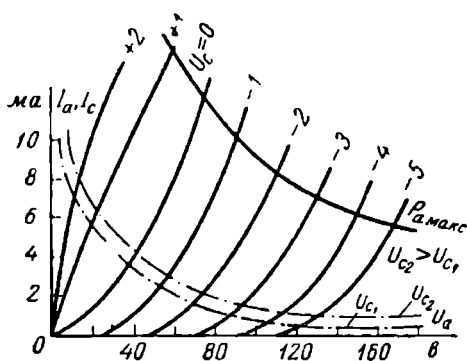


Рис. 5-7. Семейство анодных характеристик триода (сплошные линии) и сеточно-анодных (пунктирные).

теристик образуют семейство анодных характеристик (рис. 5-7).

Характеристики при отрицательных сеточных напряжениях располагаются правее начала координат, так как для получения даже ничтожно малого анодного тока к аноду необходимо приложить положительное напряжение определенной величины, компенсирующее отрица-

тельный потенциал сетки. При положительных напряжениях на сетке анодный ток уже имеется при нулевом анодном напряжении и чем больше сеточное напряжение, тем больше будет и анодный ток. Объясняется это тем, что между сеткой и катодом образуется ускоряющее поле, увеличивающее скорость электронов, и электроны, пролетая между витками сетки, достигают анода. Когда сетка соединена с катодом, то она имеет нулевой потенциал, и в этом случае триод можно считать диодом. Анодная характеристика триода при нулевом потенциале на сетке идет из начала координат.

Для получения семейства анодных характеристик рекомендуется сначала получить характеристику при нулевом сеточном напряжении, а затем для отрицательных значений ($U_c = -1$ в; -2 в и т. д.). В случае необходимости снимают характеристики и при положительных напряжениях на сетке ($U_c = +1$ в; $+2$ в и т. д.). При снятии анодных характеристик напряжение на аноде изменяют анодным потенциометром от нуля примерно через каждые 20—40 в до того наибольшего значения, при котором мощность рассеяния на аноде не превысит $P_{a.макс}$. Полученные данные помещают в таблицу, по которым и строят характеристики.

U_a	$I_a, \text{ ма}$			
	$U_c =$	$U_c =$	$U_c =$	$U_c =$

На семействе анодных характеристик можно построить линию максимальной мощности, рассеиваемой на аноде $P_{a.макс}$ (рис. 5-7), пользуясь формулой (5-2).

Характеристики сеточного тока. При нулевом и небольшом отрицательном потенциале сетки в ее цепи имеется ток, обусловленный начальной скоростью электронов и контактной разностью потенциалов, так как сетка и катод делаются из разных материалов. Но этот ток небольшой, им можно пренебречь и считать, что ток в цепи сетки появляется только при положительных напряжениях на сетке.

Характеристики сеточного тока (рис. 5-5) выражают зависимость сеточного тока от потенциала сетки при постоянном анодном напряжении:

$$I_c = f(U_c); U_a = \text{const.}$$

Чем больше анодное напряжение, тем меньше будет ток сетки, так как с увеличением напряжения на аноде увеличивается скорость электронов и задерживаться на сетке их будет меньше. При большом положительном

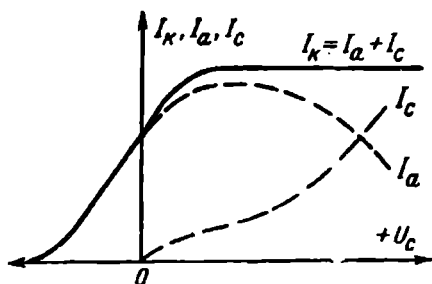


Рис. 5-8. Характеристика анодного и сеточного токов триода при больших положительных и сеточных напряжениях (ток сетки может быть больше анодного).

сеточном потенциале ток сетки может стать больше анодного тока (рис. 5-8).

Если в лампе вакуум ухудшается, то в цепи сетки возникает ток и при отрицательном напряжении на ней. Объясняется это тем, что электроны, движущиеся к аноду, ионизируют газ, и образовавшиеся положительные ионы притягиваются отрицательно заряженной сеткой. Ионный ток сетки имеет обратное направление электронному току. По величине обратного тока сетки можно судить о степени вакуума лампы.

Сеточно-анодные характеристики выражают зависимость сеточного тока от анодного напряжения при постоянном напряжении на сетке:

$$I_c = f(U_a); U_c = \text{const.}$$

На рис. 5-7 штрих-пунктиром показано семейство сеточно-анодных характеристик. С увеличением анодного напряжения ток сетки уменьшается и характеристика переходит в пологий прямолинейный участок.

5-3. СПРЯМЛЕННЫЕ (ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЕ) ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИОДА

При расчете некоторых схем на электронных лампах пользуются не реальными характеристиками, а спрямленными (идеализированными). Объясняется это тем, что значительно упрощаются расчетные формулы, а результаты расчета практически получаются достаточно точными. Спрямленные характеристики триода приведены на рис. 5-9, которые получаются путем продолжения

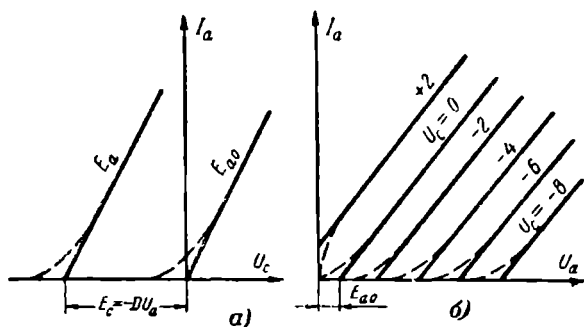


Рис. 5-9. Спрямленные (идеализированные) характеристики триода.

а — анодно-сеточные; б — анодные.

прямолинейного участка реальной характеристики до оси абсцисс.

Из двух видов семейства характеристик наиболее удобны анодные характеристики, поэтому они преимущественно и приводятся в справочниках о лампах. Но по анодно-сеточным характеристикам можно получить более наглядное изображение процессов, происходящих в лампе. Поэтому необходимо иметь характеристики как анодные, так и анодно-сеточные. В случае отсутствия каких-либо характеристик, их можно легко построить так называемым «методом переноса». Он одинаково применим и к реальным характеристикам, и к спрямленным.

Построение анодных характеристик по анодно-сеточным показано на рис. 5-10. Предварительно вычерчиваются оси координат $I_a = f(U_a)$, причем оси абсцисс обеих систем координат должны находиться на одной прямой.

Построение характеристик начинается с нулевого сеточного напряжения $U_c = 0$, где имеется ось ординат,

пересекающая все анодно-сеточные характеристики. Значения анодного тока переносятся для соответствующих анодных напряжений. Кривая, проведенная через найденные точки, и будет анодной характеристикой при нулевом сеточном напряжении. Для получения другой анодной характеристики, соответствующей иному сеточному напряжению, нужно восстановить перпендикуляр

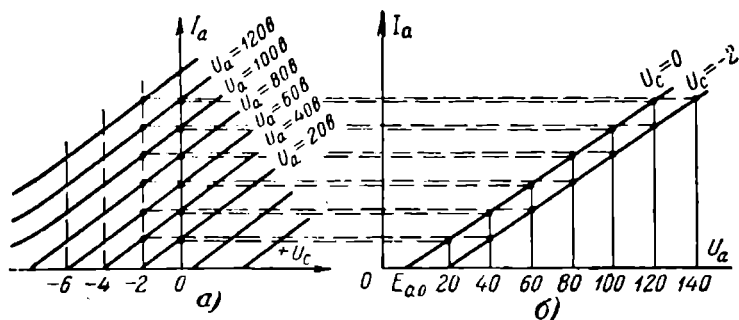


Рис. 5-10. Построение анодных спрямленных характеристик по анодно-сеточным (а) и анодно-сеточных по анодным (б).

для этого сеточного напряжения и точки пересечения перпендикуляра с характеристиками перенести на оси координат аналогично предыдущему и т. д.

Построение анодно-сеточных характеристик по анодным производится в следующем порядке: 1) находят значения анодных токов для заданного анодного напряжения путем восстановления перпендикуляра до пересечения с характеристиками; 2) найденные точки переносятся на анодно-сеточные координаты соответственно полученным сеточным напряжениям.

5.4. СТАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРИОДА И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Триод характеризуется четырьмя основными параметрами: 1) крутизна характеристики S ; 2) коэффициент усиления μ , или величина, обратная коэффициенту усиления — проницаемость D ; 3) внутреннее сопротивление R_i ; 4) добротность G . Статические параметры лампы можно определить по характеристикам анодно-сеточным или анодным, построив на них так называемый характе-

ристический треугольник. Рассмотрим определение параметров по анодно-сеточным характеристикам.

Крутизна характеристики S — это параметр, показывающий, на сколько миллиампер изменится анодный ток, когда на сетке лампы напряжение изменится на 1 в при постоянном напряжении на аноде. Крутизна характеристики имеет размерность миллиампер на вольт. Количественно крутизна характеристики может быть определена непосредственно из характеристики как отношение приращения анодного тока к приращению сеточного напряжения при постоянном анодном напряжении:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \text{ [ма/в]}; \quad U_a = \text{const.} \quad (5-3)$$

Поскольку при определении крутизны напряжение на аноде должно быть постоянно, то требуется одна характеристика.

На характеристике триода (рис. 5-11,а) возьмем какое-то напряжение на сетке, допустим, $U_{c1} = -4$ в; этому напряжению соответствует анодный ток $I_{a1} = 3$ ма. Изменим напряжение на сетке до величины $U_{c2} = -2$ в, тогда анодный ток тоже изменится и станет равным: $I_{a2} = 8$ ма. Определяя графически значения анодных токов, соответствующих заданным сеточным напряжениям, легко можно получить приращение анодного тока ΔI_a и приращение сеточного напряжения ΔU_c . Это делается по образовавшемуся прямоугольному треугольнику (характеристическому), в котором гипотенузой является участок характеристики, одним из катетов будет приращение анодного тока ΔI_a , а другим — приращение сеточного напряжения ΔU_c .

Из приведенного примера имеем приращение анодного тока: $\Delta I_a = 8 - 3 = 5$ ма. Приращение сеточного напряжения: $\Delta U_c = -2 - (-4) = 2$ в. Крутизна характеристики будет:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ ма/в.}$$

Таким образом, при изменении на 1 в сеточного напряжения анодный ток изменяется на 2,5 ма. Для при-

емно-усилительных триодов крутизна характеристики находится в пределах 1—15 ма/в.

Чем меньше будет взят участок характеристики, тем точнее будет определена крутизна на данном участке. Крутизна в данной точке характеристики может опреде-

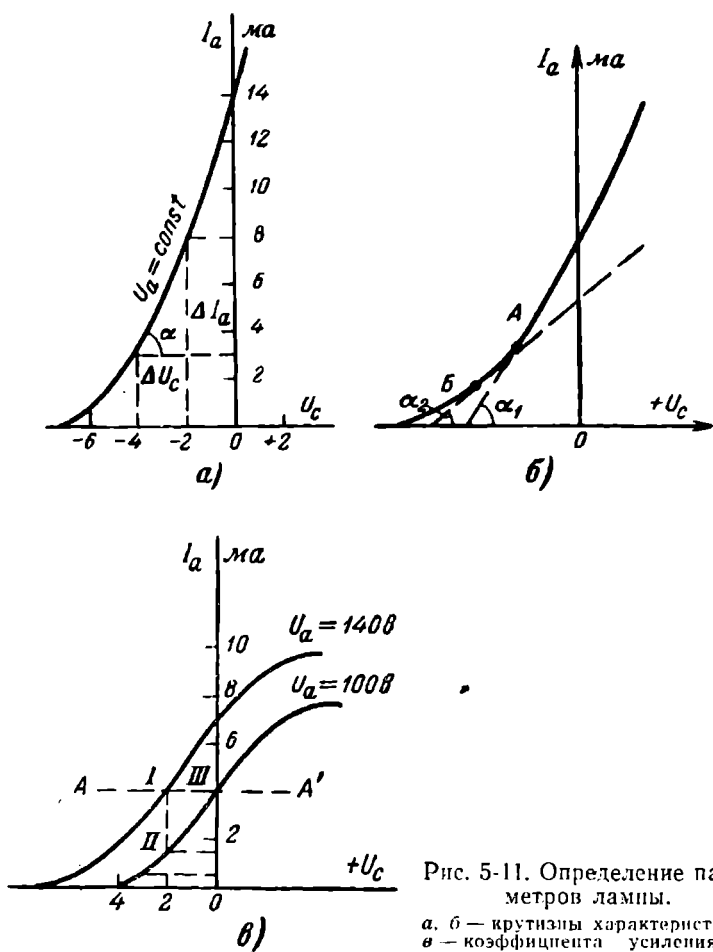


Рис. 5-11. Определение параметров лампы.

а, б — крутизны характеристики;
в — коэффициент усиления и
внутреннего сопротивления.

ляться тангенсом угла наклона касательной в данной точке характеристики к оси абсцисс (рис. 5-11,б). Так, для точки А крутизна характеристики будет пропорциональна $\text{tg } \alpha_1$, а для точки В — $\text{tg } \alpha_2$.

В дифференциальной форме крутизна характеристики имеет следующий вид:

$$S = \frac{dI_a}{dU_c}; \quad U_a = \text{const.} \quad (5-3a)$$

Крутизна характеристики зависит от поверхности катода и расстояния между сеткой и катодом. С увеличением поверхности катода крутизна увеличивается линейно. С уменьшением же расстояния сетка — катод крутизна увеличивается в квадрате. Зная величину крутизны характеристики и изменение напряжения на сетке, можно определить изменение анодного тока $\Delta I_a = S \Delta U_c$ или для прямолинейного участка характеристики:

$$I_a = S U_c. \quad (5-4)$$

Коэффициент усиления лампы μ и проницаемость D . Коэффициент усиления лампы — параметр, показывающий, во сколько раз сеточное напряжение сильнее действует на изменение анодного тока, чем анодное напряжение. Коэффициент усиления лампы можно определять из характеристик как отношение приращения анодного напряжения к приращению сеточного напряжения при постоянном значении анодного тока:

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}; \quad I_a = \text{const.} \quad (5-5)$$

Для определения коэффициента усиления воспользуемся характеристиками триода на рис. 5-11, в (линия AA' отсекает на характеристиках одинаковые значения анодного тока). Возьмем характеристику, снятую при анодном напряжении $U_a = 100$ в, и зададимся величиной напряжения на сетке, например, $U_c = 0$, тогда ток анода определится величиной $I_a = 4$ ма. Изменим напряжение на аноде (увеличим на 40 в). Ток анода при этом станет равным 7 ма, т. е. изменится на 3 ма. Для того чтобы довести анодный ток до прежнего значения $I_a = 4$ ма, требуется изменить сеточное напряжение. Из характеристики видно, что напряжение на сетке должно быть отрицательным и равным $U_c = -2$ в. Таким образом, приходим к заключению, что изменение напряжения на аноде на 40 в равноценно изменению сеточного напря-

жения на 2 в. Следовательно, коэффициент усиления лампы в разобранным случае

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = \frac{140 - 100}{0 - (-2)} = \frac{40}{2} = 20.$$

В зависимости от конструкции коэффициент усиления триода имеет значения от 4 до 100.

Из формулы $\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}$ можно определить так называемое напряжение сдвига анодно-сеточной характеристики, т. е. смещение характеристики по оси абсцисс при изменении анодного напряжения:

$$\Delta U_c = \frac{\Delta U_a}{\mu}.$$

Располагая одной анодно-сеточной характеристикой и вычисляя напряжение сдвига, можно построить семейство характеристик. Действительно, задаваясь ка-

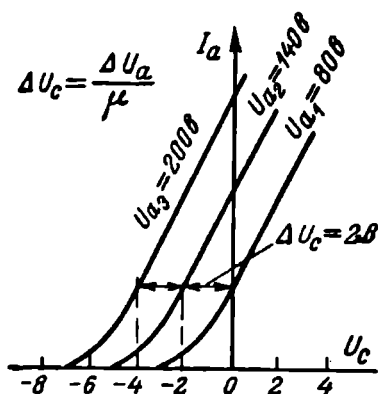


Рис. 5-12. Построение семейства анодно-сеточных характеристик по заданной характеристике и напряжению сдвига.

ким-либо анодным напряжением $U_{a1} = 80$ в, можно определить ΔU_a , а зная параметр μ ($\mu = 30$), найдем ΔU_c , т. е. находим в масштабе сеточного напряжения расстояние, на которое должна быть сдвинута характеристика, соответствующая новому значению анодного напряжения (рис. 5-12). Лампы с малым коэффициентом усиления будут иметь больший сдвиг характеристики, и характеристики расположатся левее относительно нулевого сеточного напряжения. Такие

характеристики называются «левыми» (рис. 5-13,а). Лампы же с большим коэффициентом усиления будут иметь характеристики, сдвинутые на меньшее расстояние друг от друга. Характеристики расположатся большей своей частью правее нулевого сеточного напряжения.

Такие характеристики называются «правыми» (рис. 5-13, б).

Величина, обратная коэффициенту усиления триода, называется проницаемостью:

$$D = 1/\mu [\%]. \quad (5-6)$$

Физически этот параметр означает, насколько сильно поле анода «проникает» через сетку и воздействует на электронный поток в лампе у катода. Сетка является

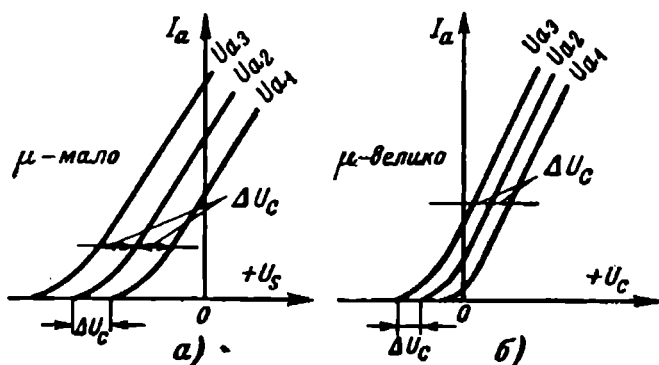


Рис. 5-13. Левые (а) и правые (б) характеристики триода.

электростатическим экраном, экранируя анод от катода. Проницаемость всегда меньше единицы и ее выражают обычно в процентах. Проницаемость зависит от плотности сетки. Лампа с густой сеткой имеет малую проницаемость, а следовательно, и большой коэффициент усиления, и, наоборот, редкая сетка дает меньший коэффициент усиления, так как проницаемость ее большая.

В рассмотренном выше примере $D = \frac{1}{20} \cdot 100 = 5\%$,

т. е. 5% всех силовых линий электрического поля, исходящих от анода, доходят (проникают) до катода, а 95% распределяются между сеткой и анодом. Можно считать, что «проницаемость днода» равна 100%. На рис. 5-14, а

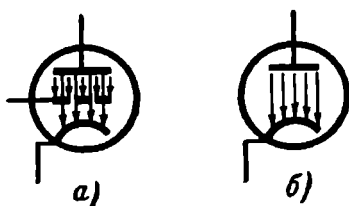


Рис. 5-14. Распределение силовых линий электрического поля в триоде (а) и диоде (б).

показано расположение силовых линий в триоде, а на рис. 5-14,б — в диоде.

Внутреннее сопротивление R_i — это параметр, показывающий, какое сопротивление представляет участок анод — катод лампы переменному току малой амплитуды.

Количественно внутреннее сопротивление лампы может быть определено из характеристик как отношение приращения анодного напряжения к приращению анодного тока при постоянном сеточном напряжении:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}; \quad U_c = \text{const.} \quad (5-7)$$

В дифференциальной форме внутреннее сопротивление

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a}; \quad U_c = \text{const.} \quad (5-7a)$$

Определим внутреннее сопротивление лампы по характеристикам рис. 5-11,б, принимая сеточное напряжение равным нулю ($U_c=0$). Тогда:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{140 - 100}{(7 - 4) \cdot 10^{-3}} = \frac{40}{3 \cdot 10^{-3}} = 13 \text{ ком.}$$

На прямолинейном участке характеристики внутреннее сопротивление лампы имеет наименьшее значение. На нижнем и верхнем криволинейных участках характеристики приращение тока будет меньше и сопротивление лампы R_i увеличится.

Сопротивление триода постоянному току R_0 — сопротивление лампы, зависящее от напряжения на сетке при заданном анодном напряжении. Определяется R_0 по закону Ома как отношение анодного напряжения к анодному току.

Так, для случая, когда напряжение на сетке $U_c=0$ и анодное напряжение $U_a=100$ в, ток анода равен $I_a=4$ ма (рис. 5-11,б). Сопротивление лампы постоянному току в этом случае будет равно:

$$R_0 = \frac{U_a}{I_a} = \frac{100}{4 \cdot 10^{-3}} = 25 \text{ ком.}$$

Подадим на сетку отрицательное напряжение $U_c = -2$ в; ток анода уменьшится и будет $I_a = 1,5$ ма, сопротивление лампы при этом увеличится и станет равным:

$$R_0 = \frac{U_a}{I_a} = \frac{100}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 60 \text{ ком.}$$

Для $U_c = -3$ в ток анода еще больше уменьшится ($I_a = 1$ ма), а сопротивление лампы увеличится:

$$R_0 = \frac{U_a}{I_a} = \frac{100}{1 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ ком.}$$

При напряжении на сетке, равном или большем по модулю напряжения запирающего, ток анода равен нулю, а сопротивление лампы постоянному току будет равно бесконечности.

Внутреннее уравнение триода. Три параметра лампы объединяются уравнением, называемым внутренним уравнением лампы:

$$\mu = SR_i. \quad (5-8)$$

Если крутизна имеет размерность в миллиамперах на вольт, то сопротивление должно быть выражено в килоомах.

Пользуясь внутренним уравнением, можно определить один из параметров лампы по двум известным. Например, триод имеет крутизну характеристики $S = 1$ ма/в, коэффициент усиления $\mu = 20$, определим внутреннее сопротивление:

$$R_i = \frac{\mu}{S} = \frac{20}{1 \cdot 10^{-3}} = 20 \text{ ком.}$$

По внутреннему уравнению лампы можно проверить правильность вычисленных параметров из характеристик ламп:

$$\mu = SR_i = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^3 = 20.$$

Следует отметить, что параметры определяются для прямолинейного участка характеристики, где они достаточно постоянны.

Добротность лампы G . Произведение двух параметров лампы μS дает четвертый параметр, называемый добротностью:

$$G = \mu S [\text{Мвт/в}^2]. \quad (5-9)$$

Добротность лампы характеризует способность лампы усиливать мощность, подведенную к ее сеточной цепи. Лампы, имеющие большую крутизну S , устанавливаются в выходном каскаде приемника, так как у них

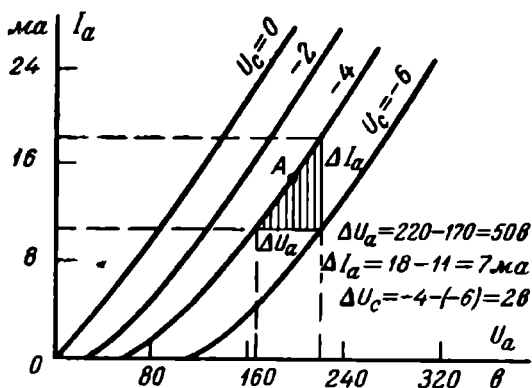


Рис. 5-15. Определение параметров триода по анодным характеристикам (триод типа 6С2С).

больше добротность G и, следовательно, будет выделяться большая мощность переменного тока в анодной нагрузке.

Определение параметров триода по анодным характеристикам. Построим характеристический треугольник (рис. 5-15) для заданной точки характеристики A ($U_a = 200$ в; $U_c = -4$ в; триод типа 6С2С). Катеты треугольника дают приращение анодного тока ΔI_a и приращение анодного напряжения ΔU_a . Таким образом, непосредственно из треугольника, построенного на одной характеристике, можно определить внутреннее сопротивление триода:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{50}{7 \cdot 10^{-3}} = 7,14 \text{ ком.}$$

Для определения крутизны характеристики S или μ необходимо приращение сеточного напряжения ΔU_c находится как разность сеточных напряжений между характеристиками, на которых построил треугольник:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = \frac{7}{2} = 3,5 \text{ ма/в};$$

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = \frac{50}{2} = 25.$$

По внутреннему уравнению можно проверить правильность полученных параметров:

$$\mu = SR_i = 3,5 \cdot 7,14 \approx 25.$$

Определение параметров ламп методом «трех отсчетов». Определение параметров лампы по снятым характеристикам требует относительно много времени, тогда как их можно определить достаточно быстро без снятия характеристики методом «трех отсчетов».

Метод трех отсчетов сводится к измерению токов анода и напряжений анодного и сеточного, соответствующих трем точкам характеристического треугольника (рис. 5-11, в). Порядок измерений следующий:

Первый отсчет. Точка *I* соответствует заданным значениям анодного напряжения $U'_a = 140 \text{ в}$ и сеточного $U'_c = -2 \text{ в}$. Анодный ток для этих напряжений будет $I'_a = 4 \text{ ма}$.

Второй отсчет (точка *II*). Оставляя неизменным сеточное напряжение, изменяем анодное напряжение (уменьшим до величины $U''_a = 100 \text{ в}$). Ток анода при этом уменьшается до значения $I''_a = 1,5 \text{ ма}$ (напряжение на аноде можно не уменьшать, а увеличивать).

Третий отсчет (точка *III*). При напряжении анода $U''_a = 100 \text{ в}$ следует изменить напряжение на сетке до получения исходной величины анодного тока $I'_a = 4 \text{ ма}$. Новое значение сеточного напряжения будет равно $U''_c = 0$.

Показания приборов заносятся в таблицу

Отчеты	U_a	U_c	I_a
Исходная точка (1-й отсчет)	U'_a	U'_c	I'_a
2-й отсчет	U''_a	U''_c	I''_a
3-й отсчет	U'''_a	U'''_c	I'''_a
Приращения	$\Delta U_a = U'_a - U''_a$	$\Delta U_c = U'_c - U''_c$	$\Delta I_a = I'_a - I''_a$

По полученным данным и вычисляются:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = \frac{I'_a - I''_a}{U'_c - U''_c};$$

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = \frac{U'_a - U''_a}{U'_c - U''_c};$$

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U'_a - U''_a}{I'_a - I''_a}.$$

5-5. РАЗБРОС ПАРАМЕТРОВ ЛАМП

Если взять несколько однотипных ламп и снять с них характеристики, то эти характеристики будут несколько отличаться одна от другой. Параметры их также не будут равны. Это явление называется «разбросом параметров».

Практически невозможно во всех экземплярах однотипных ламп получить идентичные параметры, что объясняется следующими причинами:

1. Параметры ламп зависят от размеров электродов и расстояний между ними, а эти размеры невозможно сделать абсолютно одинаковыми.

2. Технология изготовления катодов очень сложна, в особенности активированных (однородность активной массы, толщина слоя), что дает разные величины тока эмиссии.

Средние значения параметров считают номинальными или типовыми, а характеристики ламп в этом случае называются усредненными.

Разброс параметров от номинала допускается порядка $\pm 20\%$. Если в справочнике указаны параметры лампы $S=2 \text{ ма/в}$, $\mu=10$, $R_i=20 \text{ ком}$, то на самом деле параметры могут иметь следующие значения: $S=(1,6—2,4) \text{ ма/в}$, $\mu=8—12$, $R_i=(16—24) \text{ ком}$.

Режим массовой радиоаппаратуры (радиоприемники, телевизоры) при замене лампы, вышедшей из строя, другой, однотипной не должен нарушаться. В случае критичности режима какого-либо прибора производится подбор ламп для него с меньшим разбросом параметров.

5-6. МЕЖДУЭЛЕКТРОДНЫЕ СТАТИЧЕСКИЕ ЕМКОСТИ ЛАМПЫ

В триоде между электродами и их выводами существуют емкости, называемые междуэлектродными. В триоде различают три емкости (рис. 5-16,а): емкость

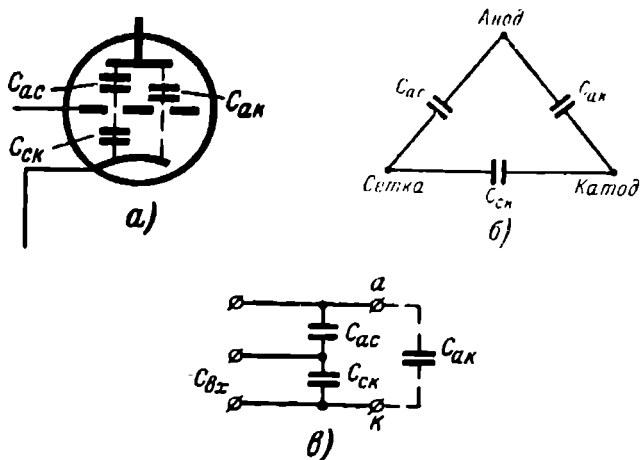


Рис. 5-16. Междуэлектродные статические емкости триода.
 а — изображение их; б — схема соединения емкостей; в — образование входной емкости.

между сеткой и катодом $C_{с.к.}$, емкость между анодом и катодом $C_{а.к.}$, емкость между анодом и сеткой $C_{а.с.}$. Междуэлектродные емкости соединены между собой по схеме, изображенной на рис. 5-16,б. Каждая из них может быть измерена следующим методом: замыкая накоротко одну из емкостей, можно измерить две другие емкости, соединенные параллельно.

Закоротив емкость $C_{с.к}$, измерим емкости со стороны анода, которые обозначим C_a :

$$C_a = C_{a.c} + C_{a.к}$$

Закоротив емкость $C_{a.к}$, измерим емкости со стороны сетки C_c :

$$C_c = C_{a.c} + C_{с.к}$$

Закоротив емкость $C_{a.к}$, измерим емкости со стороны катода C_k :

$$C_k = C_{a.к} + C_{с.к}$$

Имеем три уравнения с тремя неизвестными. Решив их, получим формулы для определения междуэлектродных емкостей:

$$\left. \begin{aligned} C_{с.к} &= \frac{C_c + C_k - C_a}{2}; \\ C_{a.к} &= \frac{C_a + C_{с.к} - C_c}{2}; \\ C_{a.c} &= \frac{C_a + C_c - C_k}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (5-10)$$

В лампе принято подразделять емкости по их назначению: входная — $C_{вх}$, выходная — $C_{вых}$ и проходная — $C_{пр}$.

Входная емкость — это емкость, измеренная между сеткой и катодом. Она называется входная, потому что участок сетка — катод считается входом лампы. Входная емкость в триоде больше емкости $C_{с.к}$ примерно на 50%, так как к ней подключены последовательно соединенные емкости $C_{a.c}$ и $C_{a.к}$ (рис. 5-16, в). Емкости в триоде $C_{с.к}$, $C_{a.к}$ и $C_{a.c}$ одного порядка.

$$C_{вх} = C_{с.к} + \frac{C_{a.c}C_{a.к}}{C_{a.c} + C_{a.к}} \approx 1,5C_{с.к}$$

Выходная емкость. Емкость между анодом и катодом называется выходная, так как анод — катод считается выходом лампы. В соответствии с предыдущим рассуждением можем считать, что $C_{вых} \approx 1,5C_{a.к}$.

Проходная емкость. Емкость между анодом и сеткой называется проходная, так как через нее «проходит» емкостный ток из анодной цепи в сеточную и наоборот: $C_{пр} \approx C_{a.c}$.

Междуэлектродные емкости, приводимые в справочниках по лампам, называются холодными емкостями, так как они измерены при отсутствии электронов в лампе, т. е. когда катод не накален (холодный). В приемно-усилительных триодах холодные емкости имеют величину порядка 2—15 пф. При работе лампы электроды ее имеют высокую температуру, разогрев электродов ведет к изменению междуэлектродных расстояний, что является одной из причин изменения междуэлектродных емкостей при разогреве лампы. Еще большее влияние на междуэлектродные емкости оказывает пространственный заряд, образуемый электронами, испускаемыми накаленным катодом. Заполнение междуэлектродных промежутков электронным облачком ведет к увеличению междуэлектродных емкостей на 30—50%. Время установления стабильного значения междуэлектродных емкостей после включения ламп зависит от их конструкции.

5-7. ЗАКОН СТЕПЕНИ ТРЕХ ВТОРЫХ ДЛЯ ТРИОДА

В триоде электроны, эмиттируемые катодом, создают ток в цепи анода и в цепи сетки. Величина анодного и сеточного токов зависит от потенциалов на этих электродах и от их геометрической формы, поэтому трудно выразить токи электродов аналитически. Однако можно сравнительно просто решить этот вопрос, если триод условно заменить эквивалентным диодом, анодом которого служит сетка триода. Понятие эквивалентный диод было введено русским ученым М. А. Бонч-Бруевичем.

Катодные токи обеих ламп (эквивалентного диода и триода) должны быть одинаковыми, но количество зарядов, наводимых на катоде электростатическим полем анода и сетки, не должно отличаться от количества зарядов, наводимых полем эквивалентного диода.

Величина заряда q_1 , индуктируемая анодом на катоде, будет равна:

$$q_1 = C_{a,k1} U_a,$$

где $C_{a,k1}$ — емкость, учитывающая электрические емкости влияния анода на катод.

В емкости $C_{a,k1}$ не учитываются всевозможные побочные емкости между анодом и катодом, например емкости между анодом и экраном или баллоном лампы, поэтому $C_{a,k1} \ll C_{a,k}$.

Величина заряда q_2 , индуктируемая на катоде сеткой, равна:

$$q_2 = C_{с.к} U_c.$$

Суммарный заряд

$$q' = q_1 + q_2 = C_{а.к1} U_a + C_{с.к} U_c.$$

Теперь определим заряд q'' , индуктированный анодом эквивалентного диода, считая приближенно, что емкость такого диода $C'_{а.к}$ равна сумме емкостей $C_{а.к1}$ и $C_{с.к}$ в триоде:

$$C'_{а.к} = C_{с.к} + C_{а.к1}.$$

Тогда

$$q'' = C'_{а.к} U_{упр},$$

где $U_{упр}$ — управляющее напряжение на аноде эквивалентного диода.

Так как по условию $q' = q''$, то

$$C'_{а.к} U_{упр} = C_{с.к} U_c + C_{а.к1} U_a.$$

Поделив обе части равенства на $C_{с.к}$, получим:

$$\frac{C'_{а.к}}{C_{с.к}} U_{упр} = U_c + \frac{C_{а.к1}}{C_{с.к}} U_a.$$

Отношение емкостей $\frac{C'_{а.к}}{C_{с.к}} = D$ есть не что иное, как проницаемость лампы (напомним, что проницаемость лампы много меньше единицы). Тогда можно написать:

$$\frac{C'_{а.к1}}{C_{с.к}} U_{упр} = U_c + D U_a.$$

Так как приняли, что $C'_{а.к} = C_{с.к} + C_{а.к1}$, то

$$\frac{C'_{а.к}}{C_{с.к}} = \frac{C_{с.к} + C_{а.к1}}{C_{с.к}} = 1 + \frac{C_{а.к1}}{C_{с.к}} = 1 + D \approx 1,$$

и окончательно приближенное выражение для управляющего напряжения на аноде эквивалентного диода, приведенного к сетке, имеет следующий вид:

$$U_{упр} = U_c + D U_a. \quad (5-11)$$

Перепишем формулу, выразив проницаемость лампы через коэффициент усиления:

$$U_{\text{упр}} = U_c + \frac{U_a}{\mu}. \quad (5-11a)$$

Формула (5-11a) подтверждает, что действие анодного напряжения в пространстве катод — сетка ослаблено по сравнению с сеточным напряжением в μ раз. Это объясняется тем, что анод отстоит от катода дальше, чем сетка, и что сетка экранирует катод.

Анодный ток триода через управляющий потенциал эквивалентного диода определяется по следующей формуле:

$$I_a = kU_{\text{упр}}^{3/2}, \quad (5-12)$$

или

$$I_a = k(U_c + DU_a)^{3/2}. \quad (5-12a)$$

5-8. ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТРИОДА

Режим лампы называется динамическим, когда в анодной цепи лампы включено сопротивление нагрузки, например, активное сопротивление R_a . В динамическом режиме напряжение на аноде U_a будет меньше напряжения источника анодного питания E_a на величину падения напряжения на нагрузке:

$$U_a = E_a - I_a R_a. \quad (5-13)$$

Это уравнение называется уравнением динамической характеристики. В статическом же режиме ($R_a = 0$) напряжение на аноде U_a всегда равно напряжению источника анодного питания E_a при любой величине анодного тока.

Динамический режим лампы характеризуется тем, что анодный ток при изменении анодного напряжения изменяется не по статической характеристике, а по динамической, пересекающей статические характеристики.

Динамические анодно-сеточные характеристики. Графическая зависимость анодного тока от сеточного напряжения при постоянном напряжении источника питания E_a называется динамической характеристикой:

$$I_a = f(U_c); \quad E_a = \text{const.}$$

Динамические характеристики снимаются точно так же, как и статические (рис. 5-17). Динамические характеристики идут выше статических, так как с увеличением анодного тока уменьшается напряжение на аноде (5-13).

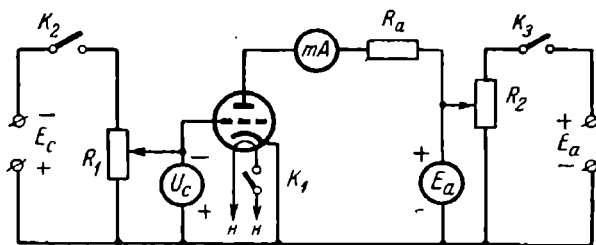


Рис. 5-17. Схема для снятия динамических характеристик триода.

Начинается динамическая характеристика из той же точки A , как и статическая, соответствующая $U_a = E_a$, потому что когда напряжение на сетке равно напряжению запирающей лампы $U_c = E_{зап}$, то анодное напряжение

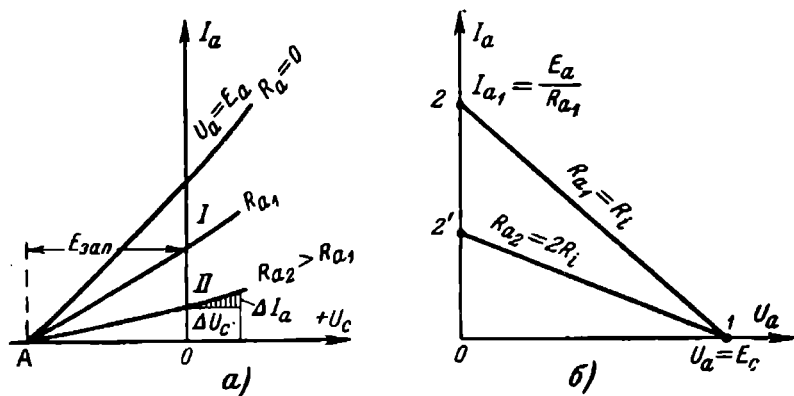


Рис. 5-18. Динамические характеристики триода.
а — анодно-сеточные; б — анодные.

будет равно напряжению источника анодного питания E_a .

Динамические анодно-сеточные характеристики для двух различных значений нагрузки приведены на рис. 5-18, а. Чем больше величина сопротивления на-

грузки, тем больше динамическая характеристика: характеристика II соответствует большей величине сопротивления нагрузки, а характеристика I — меньшей.

Крутизна динамической характеристики S_d будет меньше крутизны статической характеристики S и ее можно определить графическим путем из характеристического треугольника, а также вычислить и по формуле

$$S_d = S \frac{R_i}{R_a + R_i}, \quad (5-14)$$

где S_d — крутизна динамической характеристики;

S — крутизна статической характеристики (формула приводится без доказательства).

Определим пределы изменения крутизны динамической характеристики, для чего зададимся различными значениями нагрузки:

$$1) R_a = 0; \quad S_d = S \frac{R_i}{0 + R_i}; \quad S_d = S.$$

Крутизна динамической характеристики равна крутизне статической;

$$2) R_a = R_i; \quad S_d = S \frac{R_i}{R_a + R_i}, \quad S_d = \frac{1}{2} S.$$

Крутизна динамической характеристики в два раза меньше крутизны статической;

$$3) R_a = \infty; \quad S_d = S \frac{R_i}{\infty + R_i}; \quad S_d = 0.$$

В этом случае крутизна динамической характеристики равна нулю, т. е. динамическая характеристика расположена параллельно оси абсцисс.

Таким образом, крутизна динамической характеристики может изменяться от $S_d = 0$ до $S_d = S$ в зависимости от сопротивления нагрузки.

Динамические анодные характеристики. Построить динамические характеристики в анодной системе координат (рис. 5-18,б) можно по уравнению динамической характеристики

$$U_a = E_a - I_a R_a.$$

Уравнение динамической характеристики представляет собой уравнение прямой линии, для построения которой

необходимо определить точки на осях координат, которые она пересекает.

Для нахождения точки 1 на оси абсцисс приравняем ток анода нулю $I_a=0$. Тогда из уравнения (5-13) следует, что $U_a=E_a$. Для нахождения точки 2 на оси ординат приравняем нулю напряжение на аноде: $U_a=0$. Анодный ток будет равен $I_a=E_a/R_a$. Соединив найденные точки 1 и 2, получим динамическую характеристику. Рабочая точка на динамической характеристике не должна находиться выше линии максимальной мощности, а располагаться ниже ее. В противном случае мощность, рассеиваемая на аноде, превысит максимально допустимую: $P_a \gg P_{a,\text{макс}}$. Если увеличить сопротивление нагрузки, например в 2 раза, то, проведя рассуждение аналогично предыдущему, получим, что положение точки 1 на оси абсцисс сохранится: $U_a=E_a$, а значение тока уменьшится в 2 раза и характеристика пойдет ниже предыдущей.

5-9. ФОРМА АНОДНОГО ТОКА

Под формой анодного тока понимается графическое изображение величины анодного тока в зависимости от времени:

$$I_a=f(t) \quad \text{при} \quad E_a=\text{const.}$$

На рис. 5-19,а изображен триод, в анодной цепи которого имеется измерительный прибор — миллиамперметр и источник питания E_a . Сетка триода соединена с катодом, поэтому потенциал сетки равен нулю. Через лампу течет постоянный ток, величина его определяется по анодно-сеточной статической характеристике, соответствующей заданному напряжению E_a .

Оси координат $I_a=f(t)$ для построения на них формы тока расположены правее характеристики, причем ось времени находится на одной прямой с осью сеточного напряжения характеристики. Следовательно, при постоянном напряжении на сетке (в данном случае $U_c=0$) анодный ток будет постоянным. На графике он изображен прямой линией, идущей параллельно оси времени (для наглядности форма постоянного тока заштрихована).

Если в цепь сетки включить генератор переменного напряжения U_c (рис. 5-19,б), то анодный ток будет из-

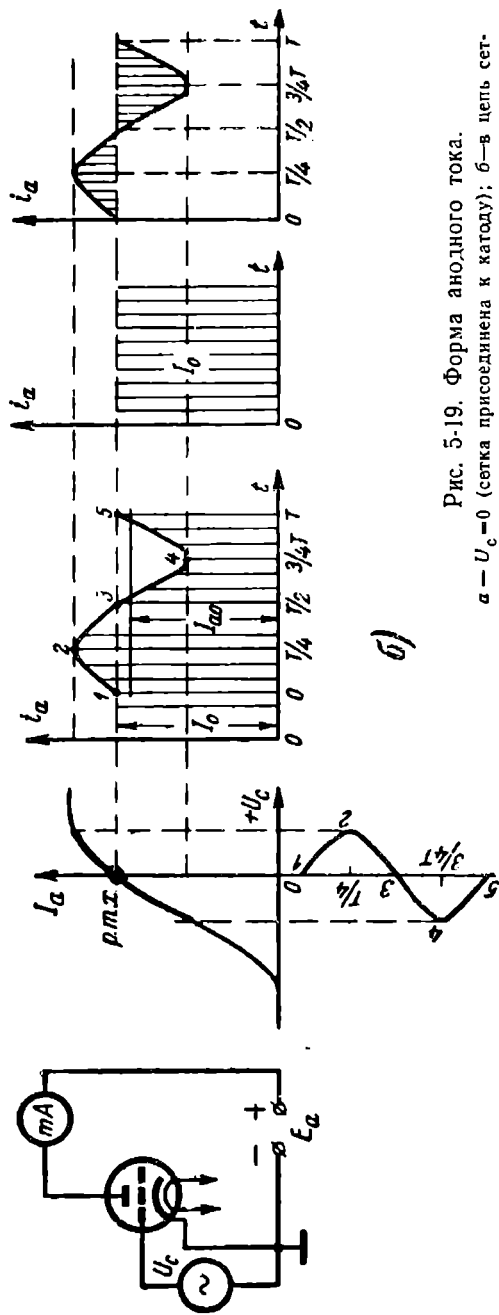


Рис. 5-19. Форма анодного тока.

а — $U_c = 0$ (сетка присоединена к катоду); б — в цепь сетки включен источник переменного напряжения.

меняться в соответствии с потенциалом сетки. Геометрическое построение формы анодного тока производится в следующем порядке:

1. Через точку на характеристике, соответствующей постоянному напряжению на сетке, проводится ордината, на которой, принимая ее за ось времени, изображают кривую переменного сеточного напряжения (постоянное напряжение на сетке согласно схеме равно нулю, так как сетка через внутреннее сопротивление генератора R_i соединяется с катодом).

2. Для начала периода и далее через каждую четверть периода определяется знак и величина напряжения, приложенного к сетке, и по характеристике для этого напряжения находится значение анодного тока.

3. Полученные таким образом точки проектируются на график анодного тока для соответствующего момента времени (последовательность построения точек за период показана нумерацией). Точки соединяются кривой, которая и представляет собой форму анодного тока.

Анализируя полученную кривую, можно сделать заключение, что при переменном напряжении на сетке анодный ток становится пульсирующим. Он является суммой двух токов: постоянного и наложенного на него переменного тока. На рис. 5-19,б заштрихованы: пульсирующий ток, постоянный ток и переменная составляющая анодного тока.

При изучении формы анодного тока принято пользоваться следующими понятиями.

Ток покоя I_0 . Током покоя называется постоянный анодный ток при отсутствии переменного напряжения на сетке.

Постоянной составляющей анодного тока I_{a0} называется среднее значение тока за период. Миллиамперметр в анодной цепи показывает эту величину.

Рабочей точкой характеристики (исходная) называется такая точка на характеристике, по отношению к которой изменяется анодный ток: увеличивается при положительном полупериоде переменного напряжения на сетке и уменьшается при отрицательном полупериоде. Рабочая точка характеристики определяется постоянным напряжением на сетке E_c . На рис. 4-20,б рабочая точка характеристики обозначена как р. т. х.

Смещение E_c . Постоянное напряжение источника тока в цепи сетки E_c , включенное минусом к сетке и плюсом к катоду, называется напряжением смещения, или просто смещением. Смещением можно установить рабочую точку в любом месте характеристики.

Амплитудные или нелинейные искажения. Когда на сетку лампы подается переменное напряжение синусоидальной формы, а переменная составляющая анодного тока из-за работы на криволинейном участке динамической анодно-сеточной характеристики получается несинусоидальной, то в этом случае лампа вносит искажения, называемые нелинейными.

Как видно из рис. 5-19,б, рабочая точка соответствует нулевому смещению и находится на верхнем изгибе характеристики. За положительный полупериод сеточного напряжения анодный ток изменяется на нелинейном участке характеристики, а за отрицательный полупериод — на линейном, вследствие чего амплитуды переменной составляющей анодного тока за оба полупериода оказываются неодинаковыми. Постоянная составляющая анодного тока в рассматриваемом случае меньше тока покоя ($I_{a0} < I_0$).

Режим А. Электронная лампа может работать в различных режимах, которые классифицируются буквами латинского алфавита.

Работа лампы в режиме класса А характеризуется неискаженной формой сигнала, т. е. переменная составляющая анодного тока точно повторяет кривую переменного сеточного напряжения. Для этого требуется выполнить следующие условия:

1. Анодный ток должен изменяться на прямолинейном участке анодно-сеточной характеристики в отрицательной ее части.

2. Рабочая точка выбирается на середине прямолинейного участка.

3. Амплитуда переменного напряжения на сетке не должна выходить за пределы прямолинейного участка характеристики при сеточном токе, равном нулю ($I_c = 0$; $U_c < 0$).

На рис. 5-20,а приведена схема включения триода со смещением от источника сеточного напряжения E_c , а на рис. 5-20,б показано построение формы анодного тока для режима А. Само построение формы анодного тока

проведено несколько упрощенно по сравнению с предыдущим.

Через выбранную рабочую точку проводится ордината, на которой изображается кривая переменного сеточного напряжения. Затем по характеристике определяет-

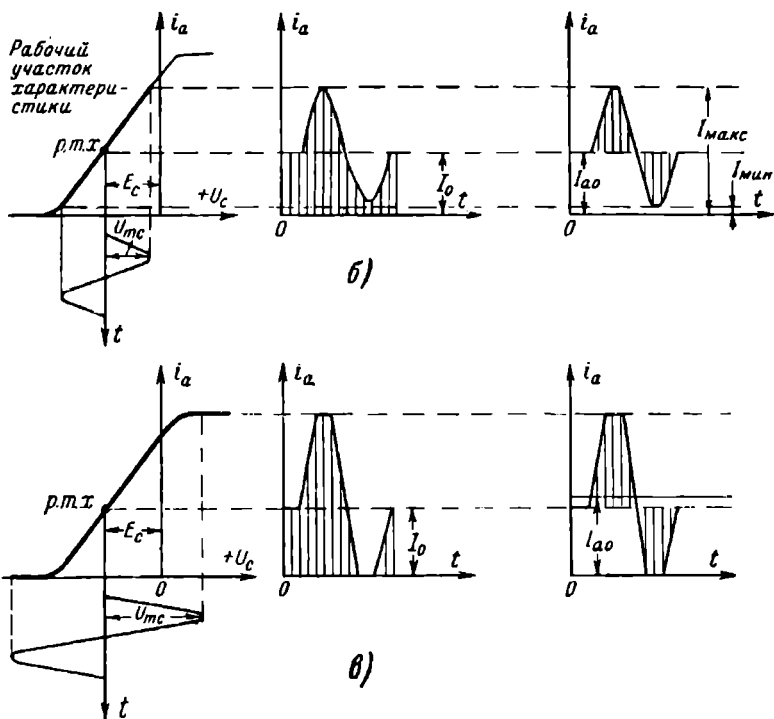
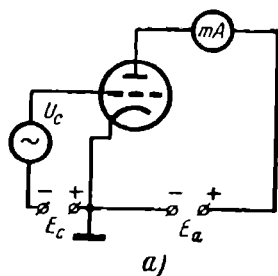


Рис. 5-20. Построение формы анодного тока по анодно-сеточной характеристике в зависимости от положения рабочей точки на характеристике и величины амплитуды сеточного напряжения.

ся ток покоя и пределы изменения токов от воздействия на сетку переменного напряжения (максимум тока при $+U_{cm}$ и минимум при $-U_{cm}$). Значения токов переносятся на координаты $I_a=f(t)$, и строится кривая пульсирующего тока (переменная составляющая тока заштрихована и помещена отдельно). В режиме А постоянная составляющая анодного тока равна току покоя ($I_{a0}=I_0$).

Форма анодного тока может быть различной в зависимости от положения рабочей точки характеристики и амплитуды переменного сеточного напряжения. Например, на рис. 5-20, в рабочая точка хотя и выбрана на середине прямолинейного участка характеристики, кривая анодного тока искажена из-за большой амплитуды переменного сеточного напряжения (режим работы лампы уже не является режимом А). Если рабочую точку установить на нижнем изгибе характеристики (режим Б), то также возникают нелинейные искажения, причем постоянная составляющая анодного тока будет больше тока покоя ($I_{a0}>I_0$).

Построим форму анодного тока в режиме А по анодным статическим характеристикам. Такое построение приведено на рис. 5-21, а. Дано: $E_a=180$ в; $R_a=4$ ком; $E_c=-4$ в; $U_{cm}=4$ в; $P_{a, макс}=2,2$ вт.

1. Прежде всего на семействе анодных статических характеристик построим динамическую характеристику. Точка на оси абсцисс, через которую пройдет динамическая характеристика, соответствует условию задания: $E_a=180$ в, а точка на оси ординат определяется уравнением

$$I_a = \frac{E_a}{R_a} = \frac{180}{4 \cdot 10^3} = 45 \text{ ма.}$$

После этого строится линия $P_{a, макс}$ по уравнению

$$I_{a, макс} = \frac{P_{a, макс}}{U_a}.$$

Если динамическая характеристика не пересекает линию $P_{a, макс}$, то, следовательно, мощность, выделяемая на аноде лампы, не превышает предельного значения. В противном случае необходимо увеличить нагрузочное сопротивление R_a .

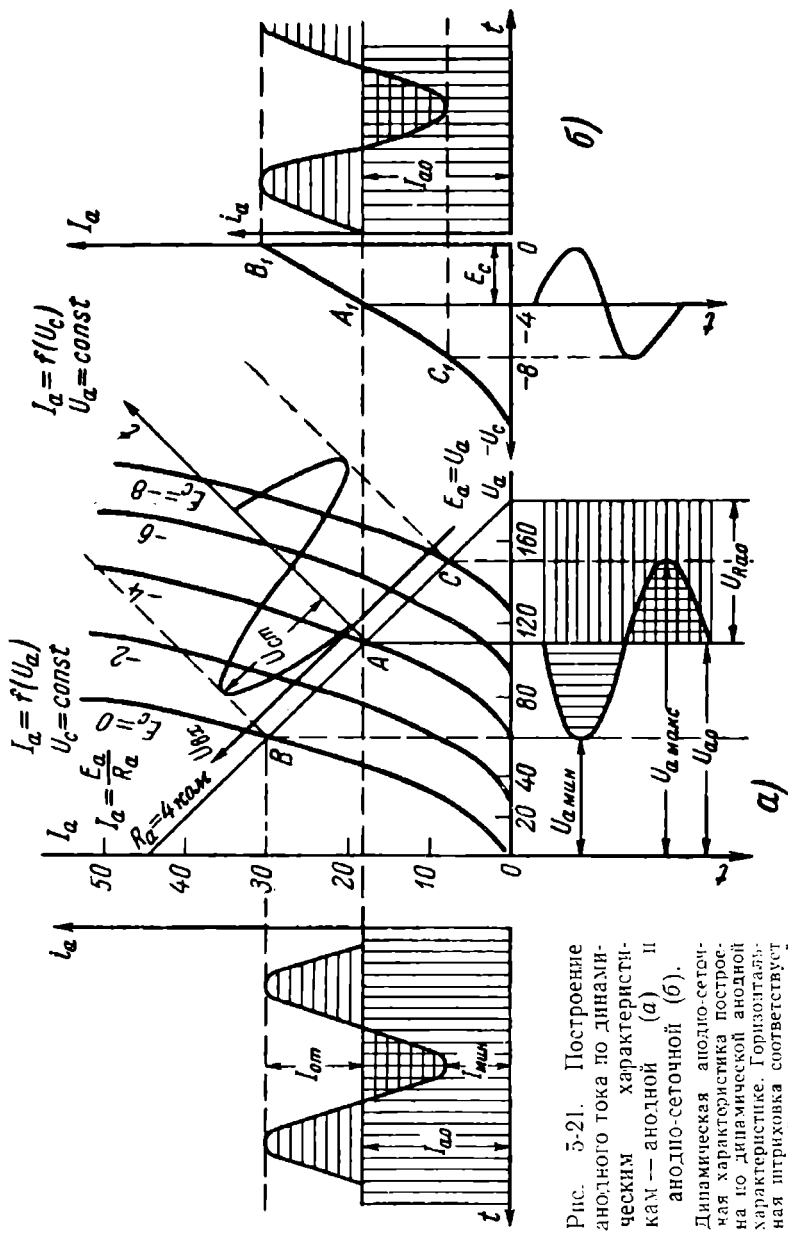


Рис. 5-21. Построение анодного тока по динамическим характеристикам — анодной (а) и анодно-сеточной (б). Динамическая анодно-сеточная характеристика построена по динамической анодной характеристике. Горизонтальная штриховка соответствует переменной составляющей а вертикальная — постоянной составляющей.

2. Определяем рабочую точку характеристики, а по ней и ток покоя I_0 . Рабочая точка находится на пересечении статической характеристики, соответствующей заданному смещению ($E_c = -4$ в), с динамической характеристикой.

3. Изображается кривая переменного сеточного напряжения на оси времени, проведенной перпендикулярно к динамической характеристике.

4. Для заданной амплитуды сеточного напряжения определяются максимальное и минимальное значения тока.

5. Найденные значения токов I_0 , $I_{a.\max}$ и $I_{a.\min}$ проектируются на оси координат $I_a = f(t)$, расположенные влево от семейства анодных характеристик. Постоянная составляющая анодного тока заштрихована вертикальной штриховкой, а переменная составляющая — горизонтальной (рис. 4-24, б).

6. Для определения напряжения на аноде и на нагрузке в режиме покоя следует опустить перпендикуляр из рабочей точки на ось напряжений. Влево от перпендикуляра будет напряжение на аноде, а вправо — напряжение на нагрузке. В процессе работы лампы напряжения на аноде и на нагрузке изменяются, но в сумме они всегда равны напряжению источника анодного питания E_a .

5-10. ПРИМЕНЕНИЕ ТРИОДА В КАЧЕСТВЕ УСИЛИТЕЛЯ

Триод может усиливать как напряжение, так и мощность электрических сигналов, поэтому усилители можно подразделить на усилители напряжения и усилители мощности.

Усиление напряжения. На рис. 5-22, а показан усилительный каскад, состоящий из лампы с сеточной (входной) и анодной (выходной) цепями. В цепь сетки включен генератор переменного напряжения U_c , условно означающий сигнал, который необходимо усилить. В анодной цепи имеется активное нагрузочное сопротивление R_a и источник питания E_a .

Принцип действия усилителя заключается в следующем. Допустим, что переменное напряжение на сетку не подается и на сетке имеется только постоянное напряжение — напряжение смещения. Тогда через лампу

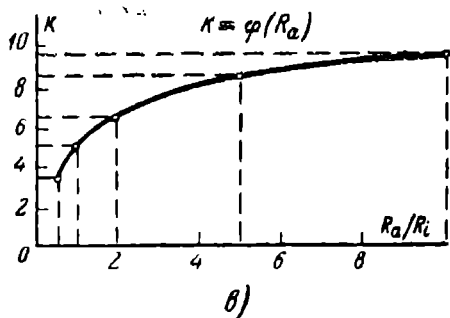
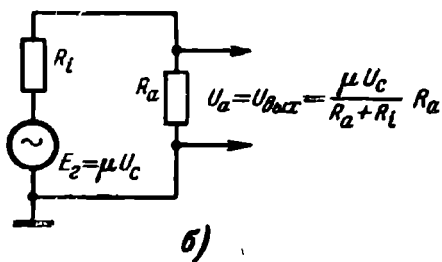
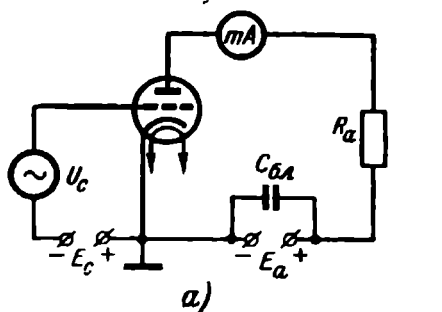


Рис. 5-22. Усилительный каскад на триоде.

а — принципиальная схема; б — эквивалентная схема электронной лампы как генератора переменного напряжения; в — зависимость коэффициента усиления каскада от величины нагрузки.

потечет постоянный ток — ток покоя I_0 . При подаче на сетку (точнее, на сетку и катод) переменного напряжения (входное) через лампу потечет пульсирующий ток. Переменная составляющая тока проходит через нагрузочное сопротивление R_a и создает на нем переменное падение напряжения, которое по форме повторяет сеточное напряжение, но будет больше его по амплитуде. Величина, показывающая, во сколько раз переменное напряжение на нагрузочном сопротивлении R_a больше напряжения, подводимого к сетке, называется коэффициентом усиления каскада. Коэффициент усиления каскада можно определить путем измерения ламповым вольтметром (высокоомным) напряжений на нагрузочном сопротивлении R_a (выходное напряжение) и напряжения, подаваемого на сетку — катод лампы (входное напряжение). Отношение напряжения выходного к входному и есть коэффициент усиления каскада:

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}. \quad (5-15)$$

Коэффициент усиления каскада можно рассчитать, заменив в усилительном каскаде лампу эквивалентным генератором переменного напряжения (рис. 5-29,б). Такая замена возможна потому, что изменение напряжения в сеточной цепи на ΔU_c производит такое же действие на анодный ток, как изменение напряжения в анодной цепи, но не на ΔU_c , а в μ раз больше, т. е. на $\mu \Delta U_c$. Это следует из определения параметра лампы $\mu = \Delta U_a / \Delta U_c$. Для прямолинейного участка характеристики, где параметры считаются неизменными, и при малых сигналах, можно приращения напряжений заменить амплитудными или действующими значениями. Таким образом, электронная лампа по анодной цепи равноценна генератору переменного напряжения с э. д. с., в μ раз большей сеточного напряжения, и внутренним сопротивлением, равным R_i лампы. Генератор работает на нагрузку R_a . В эквивалентной схеме генератора отсутствует источник питания E_a вследствие того, что он заблокирован конденсатором большой емкости, который для переменного тока имеет очень малое сопротивление. Как видно из рис. 5-22,б, схема эквивалентного генератора образует простую последовательную цепь,

к которой можно применить закон Ома. Сначала определим действующее значение переменной составляющей анодного тока:

$$I_a = \frac{\mu U_c}{R_a + R_i}. \quad (5-16)$$

Теперь можно определить падение напряжения на нагрузочном сопротивлении R_a или выходное напряжение:

$$U_{вых} = I_a R_a = \frac{\mu U_c}{R_a + R_i} R_a.$$

Поскольку сеточное напряжение U_c известно, то можно определить коэффициент усиления каскада:

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вых}}{U_c} = \mu \frac{R_a}{R_a + R_i}. \quad (5-17)$$

Из полученной формулы следует, что коэффициент усиления каскада всегда будет меньше коэффициента усиления лампы μ . Коэффициент усиления каскада для данной лампы зависит только от величины нагрузочного сопротивления R_a . Поскольку в формуле (5-17) сопротивление R_a входит и в числитель и в знаменатель дроби, то определим графически наивыгоднейшее значение нагрузки.

Возьмем для примера триод, который имеет: $\mu = 10$; $R_i = 10$ ком. Величину нагрузочного сопротивления будем изменять от $R_a = 0,5R_i$ до $R_a = 10R_i$. Для каждого заданного значения R_a определим коэффициент усиления каскада и построим график зависимости $K = f(R_a/R_i)$. Из графика (рис. 5-21, в) ясно видно, что значительно увеличивать сопротивление нагрузки нецелесообразно, так как выигрыш в усилении получается небольшой, а чем больше сопротивление нагрузки, тем больше надо брать напряжение источника питания E_a , потому что падение напряжения на сопротивление R_a от прохождения постоянной составляющей тока будет увеличиваться:

$$U_{a0} = E_a - I_{a0} R_a. \quad (5-18)$$

Из графика также можно видеть, что оптимальное (наивыгоднейшее) значение нагрузочного сопротивления для триода должно быть в 3—4 раза больше внутреннего

сопротивления, т. е. $R_{a.онт} = (3-4)R_i$. Коэффициент усиления каскада при этом составляет 75—80% от коэффициента усиления триода:

$$K = (0,75-0,8) \mu.$$

Для того чтобы каскад усиливал, необходимо иметь сопротивление нагрузки не меньше определенного значения. Найдем минимальную величину R_a , для чего в формуле (5-17) примем $K=1$ (каскад не усиливает):

$$1 = \mu \frac{R_a}{R_a + R_i}; \quad R_a + R_i = \mu R_a;$$

$$R_i = R_a (\mu - 1); \quad R_{a.мин} = \frac{R_i}{\mu - 1}.$$

Определим $R_{a.мин}$ для лампы с $\mu = 10$ и $R_i = 10$ ком:

$$R_{a.мин} = \frac{R_i}{\mu - 1} = \frac{10\,000}{10 - 1} = 1\,111 \text{ ом}.$$

Следовательно, сопротивление нагрузки должно быть больше 1 111 ом, так как в противном случае получится ослабление сигнала.

Следует отметить, что коэффициент усиления каскада иногда называют динамическим коэффициентом усиления лампы:

$$K = \mu_d = \mu \frac{R_a}{R_a + R_i}.$$

Для усиления напряжения сигнала применяются лампы с большим коэффициентом усиления ($\mu = 30-100$) и с большим внутренним сопротивлением ($R_i = 30-70$ ком).

Коэффициент усиления каскада часто выражают в логарифмических единицах усиления — децибелах. Коэффициент усиления по напряжению в децибелах определяется формулой

$$N_{дб} = 20 \lg \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 20 \lg K. \quad (5-19)$$

В табл. 5-1 приведены значения коэффициентов усиления K , выраженных в децибелах.

Таблица 5-1

K	$N_{дб}$	K	$N_{дб}$	K	$N_{дб}$	K	$N_{дб}$
1	0	2,2	7	1,6	4	10	20
1,12	1	2,5	8	1,8	5	100	40
1,26	2	2,8	9	2,0	6	1 000	60
1,4	3	3,2	10			10 000	80

Коэффициент усиления каскада по мощности. В качестве примера рассмотрим усиление мощности низкой частоты. Усиление мощности низкой частоты обычно производится в последнем каскаде усилителя (на выходе усилителя), поэтому лампы, применяемые для усиления мощности, называются иногда выходными.

Мощность, выделяемая в нагрузочном сопротивлении переменной составляющей анодного тока, определяется формулой

$$P_{\sim} = I_a^2 R_a, \quad (5-20)$$

где P_{\sim} — мощность переменного тока в нагрузке;

I_a — действующее значение переменной составляющей анодного тока;

R_a — сопротивление нагрузки.

Подставим в формулу значение тока, тогда

$$P_{\sim} = \frac{\mu^2 U_c^2}{(R_a + R_i)^2} R_a. \quad (5-21)$$

Из электротехники известно, что максимальная мощность в нагрузке получается при равенстве сопротивлений генератора и нагрузки (для рассматриваемого случая $R_i = R_a$). Подставив в знаменателе R_i вместо нагрузочного сопротивления R_a , получим:

$$P_{\sim \text{макс}} = \frac{\mu^2 U_c^2}{4R_i^2} R_a = \frac{S^2 U_c^2}{4} R_a. \quad (5-22)$$

Мощность выражается в милливаттах, если размерность крутизны миллиампер на вольт. Из полученной форму-

лы видно, что мощность зависит от величины переменного входного напряжения в квадрате, т. е. при увеличении напряжения на сетке в 2 раза мощность переменного тока в нагрузке увеличится в 4 раза. Кроме того, мощность зависит и от крутизны характеристики лампы также в квадрате. Следовательно, выходные лампы должны иметь $S=3-15$ *ма/в*. Для неискаженного усиления применяются лампы с левыми характеристиками, т. е. с малым коэффициентом усиления μ , а при большой крутизне S они должны иметь и малое внутреннее сопротивление $R_i=800-2000$ *ом*. Например, триод 6С4С, у которого $\mu=4$, $R_i=800$ *ом* и $S=5,4$ *ма/в*, применяется как выходная лампа для усиления мощности.

Коэффициент усиления каскада по мощности определяется как отношение выходной мощности на нагрузке к мощности, затрачиваемой на входе,

$$K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (5-23)$$

Коэффициент усиления по мощности может быть выражен в децибелах по формуле

$$N_{\text{дб}} = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (5-24)$$

Эта формула получается из (5-19) после замены отношения напряжений отношением мощностей.

Так как мощность $P=U^2/R$, то $U=\sqrt{PR}$. При одинаковых сопротивлениях на входе и выходе

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \sqrt{\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}} = \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

После подстановки этого выражения в формулу (5-24) и логарифмирования получим:

$$N_{\text{дб}} = 20 \frac{1}{2} \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (5-25)$$

5-11. СПОСОБЫ ПОДАЧИ НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ

Основными способами подачи на сетку лампы отрицательного напряжения смещения считаются: фиксированное или принудительное и автоматическое.

Фиксированное смещение. Как видно из схемы рис. 5-23,а, в разрыв цепи сетки последовательно с генератором переменного напряжения включен источник постоянного напряжения E_c , минус которого присоединен к сетке лампы, а плюс к катоду.

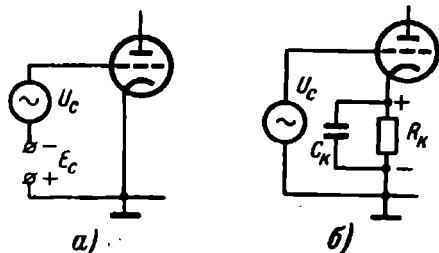


Рис. 5-23. Способы подачи напряжения смещения.

а — фиксированное; б — автоматическое на лампе с катодом прямого накала.

Автоматическое смещение. Для получения автоматического смещения в цепь катода включается активное сопротивление R_k , зашунтированное емкостью C_k , на котором при прохождении через него постоянной составляющей анодного тока I_{a0} создается

постоянное падение напряжения $E_c = I_{a0}R_k$ (рис. 5-23,б).

Это и есть напряжение смещения, минус которого подается на сетку, в результате чего потенциал катода будет выше потенциала сетки. Смещение называется автоматическим потому, что оно появляется только тогда, когда через лампу протечет ток, и исчезает при включении анодного напряжения.

Так как в динамическом режиме лампы анодный ток пульсирующий, то при прохождении его через сопротивление R_k падение напряжения на этом сопротивлении также будет пульсирующим. Смещение же должно быть постоянным. Поэтому параллельно сопротивлению R_k включается емкость C_k для пропуска переменного составляющей анодного тока. Емкостное сопротивление конденсатора C_k для самой низшей из усиливаемых частот f_n берется примерно в 10 раз меньше сопротивления R_k .

Емкость C_k определяется из формулы

$$\frac{1}{2\pi f_n C_k} = 0,1 R_k,$$

откуда

$$C_K = \frac{10^7}{6,28 f_{\text{н}} R_K} \text{ [мкф]}.$$

Для $f_{\text{н}} = 1000 \text{ гц}$ и $R_K \Rightarrow 200 \text{ ом}$

$$C_K = \frac{10^7}{6,28 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^2} \approx 8 \text{ мкф}.$$

5-12. ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕПЯХ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА И ТОКОПРОХОЖДЕНИЕ

На рис. 5-24 приведена схема усилительного каскада с автоматическим смещением, имеющая практическое применение.

При рассмотрении токопрохождения в схемах усилителей следует различать цепи постоянного и переменного

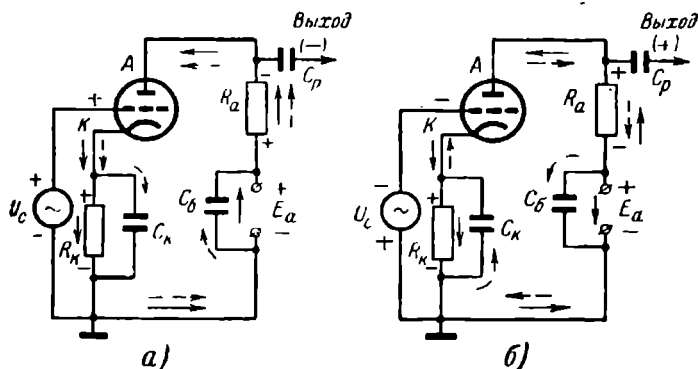


Рис. 5-24. Усилительный каскад с автоматическим смещением.

а — токопрохождение при положительном полупериоде сетевого напряжения; б — при отрицательном полупериоде сетевого напряжения.

Сплошная стрелка показывает направление постоянной составляющей анодного тока, а пунктирная — переменной составляющей.

ного токов. Источником постоянного тока служит источник анодного питания E_a . Постоянный ток протекает всегда от $+E_a$ через сопротивление нагрузки R_A , лампу и приходит к $-E_a$. Источником переменной составляющей анодного тока следует считать электронную

лампу (анод — катод лампы служат как бы зажимами генератора переменного тока). Когда на сетку подается положительный полупериод напряжения, переменная составляющая анодного тока протекает от катода через конденсаторы C_K и C_6 , через нагрузку и на анод (показано сплошными стрелками).

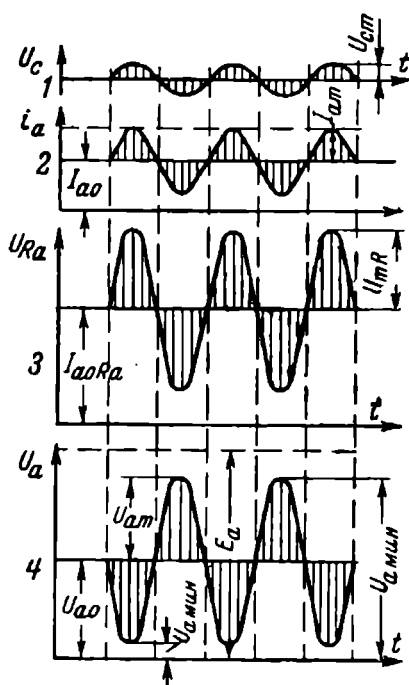


Рис. 5-25. Фазовые соотношения токов и напряжений на элементах схемы.

При отрицательном полупериоде сеточного напряжения (на сетке отрицательное напряжение) — наоборот: от анода через нагрузку на катод (пунктирные стрелки).

Вместо обычного понятия о пульсирующем анодном токе как токе, протекающем всегда только в одном направлении — от анода к катоду, является очень удобным другое толкование: считать пульсирующий ток как алгебраическую сумму постоянной составляющей и переменной составляющей токов. Постоянная составляющая протекает в лампе от анода к катоду, а переменная составляющая протекает в обоих направлениях в зависимости от знака

полупериода переменного напряжения, приложенного к сетке. В этом случае увеличение анодного тока объясняется тем, что переменная составляющая имеет одинаковое направление с постоянной составляющей; при уменьшении анодного тока переменная составляющая протекает навстречу постоянной составляющей.

На рис. 5-25 показаны кривые, характеризующие в динамическом режиме фазовые соотношения переменной составляющей анодного тока, переменного напря-

жения на нагрузке и на аноде относительно переменного сеточного напряжения (переменные составляющие токов и напряжений заштрихованы). Из приведенных кривых видно, что переменная составляющая анодного тока (кривая 2) находится в фазе с сеточным напряжением (кривая 1): анодный ток увеличивается при положительном полупериоде сеточного напряжения и уменьшается при отрицательном.

Переменное напряжение на нагрузке (кривая 3) находится в фазе в переменной составляющей анодного тока и, следовательно, с переменным сеточным напряжением, т. е. знаки напряжения на нагрузке изменяются в соответствии с направлением тока. Переменное напряжение на аноде (кривая 4) сдвинуто по фазе на 180° относительно сеточного напряжения. Сдвиг по фазе объясняется следующим. К аноду прикладываются два последовательно включенных источника тока: постоянного напряжения — источник анодного питания E_a и переменного — падение напряжения на нагрузочном сопротивлении R_a при прохождении переменной составляющей анодного тока ($I_{a\sim}R_a$).

За положительный полупериод сеточного напряжения эти два источника тока соединены одноименной полярностью, и напряжение на аноде будет минимальное:

$$U_{a.\text{мин}} = E_a - I_{a0}R_a - I_{a\sim}R_a.$$

За отрицательный полупериод источники тока соединены разноименной полярностью, поэтому напряжение на аноде достигает максимального значения:

$$U_{a.\text{макс}} = E_a - I_{a0}R_a + I_{a\sim}R_a. \quad (5-26)$$

Таким образом, переменные напряжения на аноде и на нагрузке по абсолютной величине равны ($I_{a\sim}R_a$), но по фазе противоположны. Приведенная на рис. 5-24 схема усилительного каскада с общим катодом изменяет фазу выходного напряжения по отношению к входному на 180° .

Поскольку практически используется переменное напряжение, то для отделения его от постоянного напряжения на выходе каскада ставится разделительный конденсатор C_p .

5-13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ТОКА ПОКОЯ В РЕЖИМЕ А

Пульсирующий анодный ток, как известно, состоит из постоянной и переменной составляющих. Переменное сеточное напряжение создает только переменную составляющую анодного тока. Постоянная составляющая тока во время работы в режиме А не изменяется. Величина I_{a0} зависит от напряжения смещения и постоянного анодного напряжения U_{a0} .

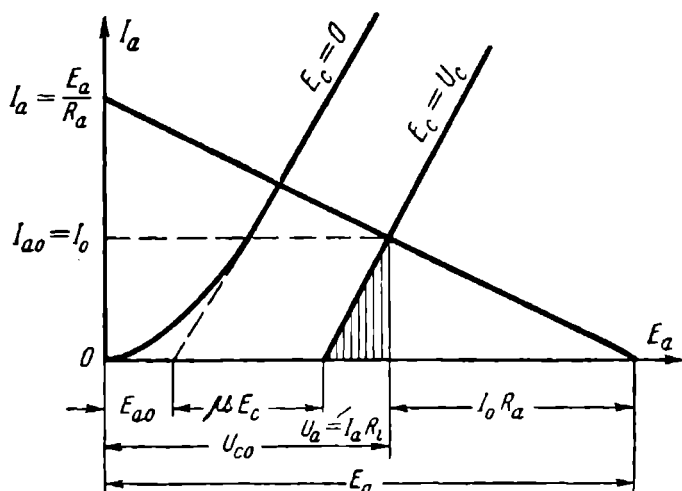


Рис. 5-26. Определение тока покоя лампы в режиме А.

Мгновенное значение анодного тока при синусоидальном сеточном напряжении выражается как

$$i_a = I_{a0} + I_{am} \sin \omega t. \quad (5-27)$$

Переменная составляющая тока определяется по формуле (5—16), если считать электронную лампу генератором переменного тока.

Точно так же и для постоянной составляющей тока лампу можно считать генератором постоянного тока. Определим э. д. с. генератора постоянного тока. Для этого возьмем из семейства анодных спрямленных характеристик триода только две: одну для нулевого сеточного напряжения, а другую для заданного смещения (рис. 5-26) (спрямленные характеристики берутся для

упрощения вывода формулы э. д. с.). Затем построим динамическую характеристику для заданного сопротивления R_a . Точка пересечения статической характеристики при смещении $-E_c$ с нагрузочной прямой является рабочей точкой. Высота перпендикуляра, опущенного из рабочей точки, характеризует ток покоя I_0 . С другой стороны, перпендикуляр является катетом характеристического треугольника, построенного на одной анодной статической спрямленной характеристике, из которого определяется только параметр R_i :

$$R_i = \frac{U_a}{I_a}. \quad (5-28)$$

При работе лампы в режиме А $I_a = I_0$ и при известных U_a и R_i можно найти I_0 :

$$I_0 = \frac{U_a}{R_i}.$$

Из треугольника (на рис. 5-26 он заштрихован) видно, что U_a определяет собой другой катет, который может быть найден из следующего выражения:

$$U_a = E_a - E_{a0} - (\mu E_c) - I_0 R_a, \quad (5-29)$$

а с учетом знака минус у E_c

$$U_a = E_a - E_{a0} + \mu E_c - I_0 R_a, \quad (5-30)$$

или

$$I_0 R_i = E_a - E_{a0} + \mu E_c - I_0 R_a.$$

Тогда формула для определения тока покоя будет иметь следующий вид:

$$I_0 R_i + I_0 R_a = E_a - E_{a0} + \mu E_c;$$

$$I_0 (R_i + R_a) = E_a - E_{a0} + \mu E_c,$$

и окончательно

$$I_0 = \frac{E_a - E_{a0} + \mu E_c}{R_i + R_a}, \quad (5-31)$$

где E_a — напряжение источника анодного питания;

E_{a0} — напряжение приведения (это анодное напряжение, отсекаемое на оси абсцисс спрямленной характеристикой при нулевом сеточном напряжении);

μE_c — напряжение компенсации (анодное напряжение, компенсирующее действие отрицательного потенциала сетки $-E_c$).

Числитель дроби представляет э. д. с. генератора постоянного тока.

При сеточном напряжении, равном нулю, формула (5-31) становится проще:

в динамическом режиме

$$I_0 = \frac{E_a - E_{a0}}{R_i + R_a};$$

в статическом режиме

$$I_0 = \frac{E_a - E_{a0}}{R_i}.$$

В динамическом режиме с автоматическим смещением уравнение для определения тока покоя имеет следующий вид:

$$I_0 = \frac{E_a - E_{a0} + \mu E_c}{R_i + R_a + R_k}. \quad (5-32)$$

Пример. Определить для триода 6С6Б ток покоя, если $E_a = 150$ в, $E_{a0} = 20$ в, $E_c = -2$ в, $\mu = 25$, $S = 5$ ма/в, $R_a = 10$ ком.

1. Определим внутреннее сопротивление триода:

$$R_i = \frac{\mu}{S} = \frac{25}{5} = 5 \text{ ком.}$$

2. Определим I_0 , подставив в формулу (5-31) числовые значения:

$$I_0 = \frac{E_a - E_{a0} + \mu E_c}{R_i + R_a} = \frac{150 - 20 + 25(-2)}{5 + 10} = \frac{80}{15} = 5,33 \text{ ма.}$$

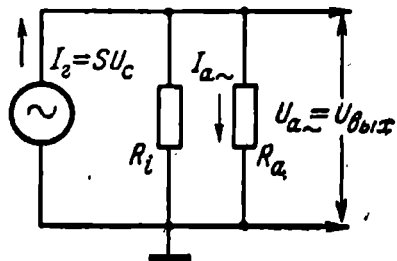
Предлагается учащимся проверить точность полученного результата путем построения нагрузочной прямой на семействе анодных характеристик и подсчитать процент ошибки. Характеристики триода 6С6Б помещены в конце учебника.

5-14. ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ГЕНЕРАТОР ТОКА

Исследования усилительных каскадов производятся при помощи схем эквивалентных генераторов напряжения и тока. Схема эквивалентного генератора напряжения показана на рис. 5-22,б, а схема эквивалентного ге-

нератора тока—на рис. 5-27. Нагрузка в последней схеме включается параллельно генератору и сопротивлению R_i .

В электрическом отношении обе схемы генераторов совершенно одинаковы и одна из них легко получается из другой. Например, в генераторе напряжения э. д. с. определяется по известной формуле: $E_T = \mu U_c$, откуда можно получить величину тока для другой схемы. Подставив вместо μ произведение SR_i , будем иметь: $E_T = SR_i U_c$.



Поделив обе части равенства на R_i , получим:

Рис. 5-27. Электронная лампа как эквивалентный генератор тока.

$$E_T/R_i = S U_c \quad \text{или} \quad I_T = S U_c.$$

Выходное напряжение в обеих схемах имеет совершенно одинаковые выражения. В схеме генератора напряжения

$$U_{\text{вых}} = I_a R_a = \frac{\mu U_c}{R_a + R_i} R_a.$$

В схеме генератора тока

$$U_{\text{вых}} = I_T R_H = S U_c \frac{R_a R_i}{R_a + R_i} = \frac{\mu U_c}{R_a + R_i} R_a,$$

где $R_H = \frac{R_a R_i}{R_a + R_i}$, так как сопротивление $R_a \parallel R_i$.

5-15. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ЛАМП

Для увеличения мощности переменного тока в нагрузке применяют параллельное включение ламп. Для этого, как видно из рис. 5-28, аноды соединяются вместе и имеют общий вывод. Также соединяются сетки и катоды. Параллельно включенные лампы можно заменить одной эквивалентной лампой с эквивалентными параметрами.

Так как анодный ток при параллельном включении ламп увеличивается, то это равноценно увеличению кру-

тизны эквивалентной лампы. Крутизна увеличивается во столько раз, сколько ламп включается параллельно. Для n ламп S будем иметь:

$$S_n = nS. \quad (5-33)$$

Внутреннее сопротивление параллельно включенных ламп уменьшается:

$$R_{in} = \frac{R_i}{n}. \quad (5-34)$$

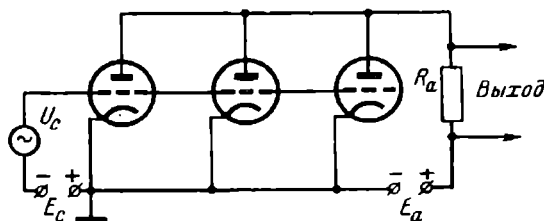


Рис. 5-28. Параллельное включение ламп.

Коэффициент усиления остается без изменения:

$$\mu_n = nS \cdot \frac{R_i}{n} = SR_i. \quad (5-35)$$

Таким образом, расчет схем при параллельно включенных лампах можно производить на одной эквивалентной лампе с ее эквивалентными параметрами. Для параллельного включения ламп следует отбирать лампы с малым разбросом параметров.

5-16. КОНСТРУКЦИЯ И ТИПЫ ПРИЕМНО-УСИЛИТЕЛЬНЫХ ТРИОДОВ

В зависимости от назначения триоды отличаются друг от друга параметрами, характеристиками и конструктивным оформлением. По назначению их можно разделить на следующие группы:

- 1) триоды для усиления напряжения низких частот (предварительное усиление);
- 2) триоды для усиления мощности низких частот (оконечное усиление);
- 3) триоды для усиления высоких частот.

Конструктивно катод, сетка и анод могут быть выполнены в виде параллелепипеда без торцовых плоскостей, цилиндра или эллиптического цилиндра.

Катоды применяются как подогревные, так и прямого накала.

Аноды ламп для усиления напряжения низкой частоты и высокой частоты, где протекает небольшой анодный ток, изготавливаются из белого никеля.

Анод высокочастотных триодов имеет небольшую поверхность для уменьшения междуэлектродных емкостей.

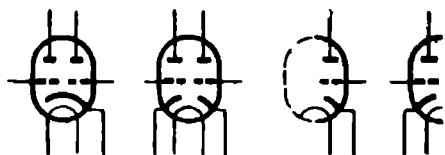


Рис. 5-29. Варианты изображения двойных триодов в схеме.

В оконечных триодах с большим анодным током применяется черненный никель, и поверхность анода увеличивается путем крепления к нему радиаторных пластин. Допустимая мощность рассеяния на аноде для таких триодов составляет 10--15 *вт*, а для триодов усиления напряжения не превышает 3 *вт*.

Большое распространение получили двойные триоды, содержащие в одном баллоне два отдельных триода. В схеме двойной триод изображается в виде двух отдельных ламп (левая половина триода и правая половина триода), причем катод может быть как отдельным для каждого триода, так и общим для обоих триодов. В лампах пальчиковой серии каждый из триодов экранируется друг от друга и экран имеет вывод на штырек цоколя для заземления.

Иногда в схемах размещаются отдельно каждая половина двойного триода, тогда баллон действующей половины триода вычерчивается сплошной линией, а другая половина баллона либо вычерчивается пунктиром (электроды триода не указываются), либо совсем не изображается. На рис. 5-29 приведены варианты изображений триодов в схеме.

Маркировка одинарных триодов имеет на втором месте условного обозначения букву С, а двойных — букву Н.

В табл. 5-2 приводятся основные данные триодов для усиления напряжения и мощности.

Таблица 5-2

Тип триода	n	S, ма/в	R _г , ком	U _а , в	P _а , вт	C _{вх} , пф	C _{вых} , пф	C _{пр} , пф
1С12П	16	0,87	21,0	60	0,25	0,85	0,72	2
2С14Б	15	1,8	8,3	90	0,75	2,1	2,8	2,0
6С6Б	25	5,0	5,0	120	1,4	3,3	3,5	1,42
6С7Б	66	4,0	16,5	250	1,45	3,3	3,4	1,0
6С2П	48	11,5	4,7	150	2,5	5,3	4,2	0,19
6С3П	50	19,5	2,56	150	3,0	6,7	1,65	2,4
6С15П	50	45	1,22	150	6,5	11,0	1,8	5,5
6С2С	20	2,55	8	250	2,75	3,0	4,5	3,8
6Н8С	20,5	2,6	7,9	250	2,75	3,0	1,2	4
6Н9С	70	1,6	44,0	250	1,1	3,4	3,2	2,8
6Н1П	35	4,35		250	2,0	3,8	1,5	1,85
6Н4П	41	1,75		300	1,5	1,55	1,5	1,6
6Н15П	38	5,6	6,8	100	1,6	2,0	0,4	1,4
6Н16Б	25	5,0		100	0,9	2,55	1,65	1,5
6Н17Б	75	3,8		200	0,9	2,8	1,55	1,6
6Н7С	35	1,6	22,8	300	6,0	—	—	—

Усиление мощности

1Н3С	11	1,8	6,1	150	1,0	—	—	—
6Н6П	20	11	1,8	300	4,8	—	—	—
6С4С	4,15	5,4	0,84	250	15,0	—	—	—

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему анодный ток триода уменьшается с увеличением отрицательного напряжения на сетке?
2. Что такое переменная составляющая анодного тока триода и в каком направлении она протекает через лампу при положительном и отрицательном полупериодах сеточного напряжения?
3. В чем заключается разница между током покоя и постоянной составляющей анодного тока?
4. Что называется рабочей точкой характеристики?
5. Для чего на сетку лампы подается смещение?
6. Какое условие требуется выполнить, чтобы переменная составляющая анодного тока была по форме подобна сигналу усиливаемого напряжения?
7. Что называется параметрами триода?

8. При уменьшении анодного напряжения на 40 в анодный ток уменьшился на 4 ма. Для получения прежней величины тока напряжение на сетке потребовалось увеличить на 2 в. Определить параметры лампы.

9. Определить крутизну характеристики лампы S , если $\mu=20$; $R_i=10^4$ ом.

10. Определить внутреннее сопротивление триода R_i , если $D=2\%$; $S=2$ ма/в.

11. В чем заключается процесс усиления сигнала триодом?

12. Чем отличается динамический режим работы триода от статического?

13. Определить коэффициент усиления схемы с одной лампой, у которой $S=5$ ма/в, $R_i=10$ ком, сопротивление нагрузки $R_a=30$ ком.

14. Определить крутизну динамической характеристики, если крутизна статической характеристики $S=10$ ма/в, $R_i=2 \cdot 10^4$ ом; сопротивление нагрузки $R_a=40$ ком.

15. Почему анод имеет большую поверхность в лампах, предназначенных для усиления мощности, по сравнению с лампами, усиливающими напряжение?

16. С каким коэффициентом усиления μ следует применить триод, чтобы получить $K=16$?

ГЛАВА ШЕСТАЯ

МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ

(Многосеточные и комбинированные лампы)

6-1. ТЕТРОД

Тетродом называется четырехэлектродная лампа с двумя сетками. На рис. 6-1 показано условное изображение тетрода. Добавочная сетка может находиться между управляющей сеткой и катодом или между управляющей сеткой и анодом. В первом случае тетрод называется с катодной сеткой или с сеткой пространственного заряда, а во втором — с экранирующей сеткой. Добавочная сетка предназначается для улучшения параметров тетрода по сравнению с триодом. Как было выяснено при рассмотрении триода, усилительные свойства лампы определяются параметром «добротность», представляющим собой произведение крутизны характеристики и коэффициента усиления.

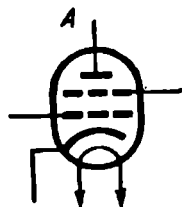


Рис. 6-1. Условное изображение тетрода.

В триоде добротность может быть 10—100 *ма/в*. Тетрод имеет добротность значительно выше, порядка 200÷400 *ма/в*. В зависимости от места расположения второй сетки можно получить увеличение крутизны *S* или коэффициента усиления лампы μ .

Тетрод с катодной сеткой (с сеткой пространственного заряда). Если на добавочную сетку подать небольшой положительный потенциал 10—20 *в*, то объемный заряд, располагающийся вокруг катода, займет большее пространство — он распространится за катодную сетку, отчего плотность объемного заряда значительно уменьшится. Катодная сетка как бы нейтрализует пространственный заряд у катода, и достаточно

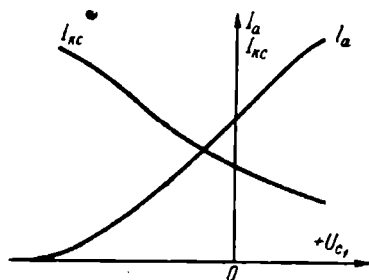


Рис. 6-2. Характеристика анодного тока тетрода и тока катодной сетки $I_{к.с.}$.

приложить к аноду сравнительно небольшой положительный потенциал, как появится анодный ток. Характеристика становится круче, крутизна характеристики повышается, внутреннее сопротивление тетрода понижается:

$$R_i = \frac{\mu}{S}. \quad (6-1)$$

На рис. 6-2 приведены характеристики анодного тока и тока катодной сетки. С уменьшением отрицательного потенциала управляющей сетки ток в цепи катодной сетки уменьшается, а анодный ток увеличивается, так как эмиссионный ток катода перераспределяется между катодной сеткой и анодом.

Недостатком тетрода с катодной сеткой является большая проходная емкость, соответствующая емкости триода. По сути дела тетрод с сеткой пространственного заряда является триодом, где роль катодной сетки заключается в приближении объемного заряда к управляющей сетке для получения большей крутизны. Лампы с катодной сеткой выпускались до 1925 г. и применялись для усиления низкой частоты в схемах с малым анодным

напряжением порядка 8—20 в. В последние годы разработана новая конструкция лампы с катодной сеткой со значительной крутизной порядка 25 ма/в.

Тетрод с экранирующей сеткой. Первая сетка тетрода — управляющая; вторая сетка называется экранирующей. Она помещается между анодом и управляющей сеткой и перехватывает часть силовых линий электрического поля, исходящих с анода, т. е. экранирует управляющую сетку от анода. Для лучшей экранировки вторая сетка выполняется с малым шагом намотки.

Уменьшение проходной емкости лампы путем введения экранирующей сетки можно проследить по эквивалентным схемам, изображенным на рис. 6-3. Усилительный каскад на лампе триод представлен эквивалентной схемой (рис. 6-3, а), где проходная емкость триода $C_{a.c}$ изображена в виде конденсатора $C-A$ (сетка — анод), а падение переменного напряжения на нагрузочном сопротивлении показано в виде генератора переменного напряжения U_{Ra} . Схема приведена только для переменного тока,

поэтому источники питания постоянного тока не показаны. Из приведенной схемы следует, что проходная емкость связывает сеточную и анодную цепи: входной сигнал создает емкостный ток $I_{a.c1}$ в анодной цепи и, наоборот, переменное напряжение на нагрузке создает емкостный ток в сеточной цепи I_{c1a} . Чем выше частота входного сигнала, тем меньше будет емкостное сопротивление конденсатора сетка — анод и тем больше будет влияние одной цепи на другую. На высоких частотах из-за этой связи усилительная схема может превратиться в генераторную.

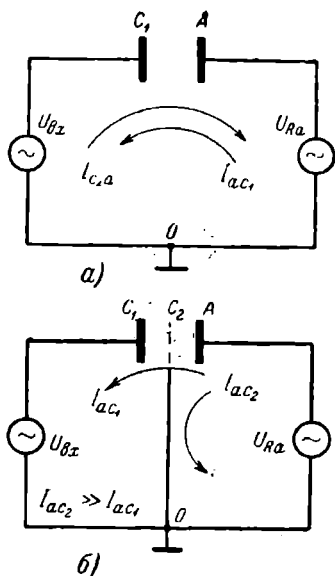


Рис. 6-3. Эквивалентная схема усилительного каскада по переменному току на триоде (а) и на тетроде (б).

В последнем случае ток входной цепи через емкость не протекает в анодную цепь.

Если поместить между пластинами конденсатора густую сетку C_2 (рис. 6-3,б) и соединить ее с точкой нулевого потенциала O , то сеточная и анодная цепи будут развязаны. В этом случае переменное напряжение U_{Ra} не сможет, как прежде, создавать большой емкостный ток в цепи управляющей сетки. Он будет в основном замыкаться через экранирующую сетку. Этой ослабленной связи анодной цепи и цепи управляющей сетки соответствует очень малая проходная емкость. Проходная

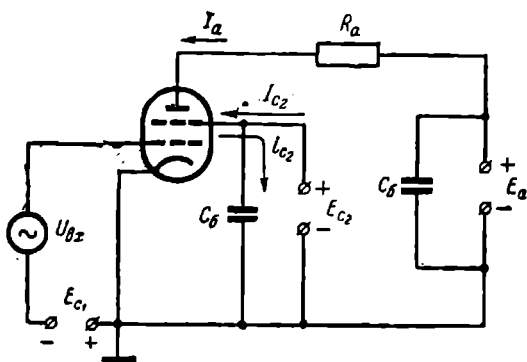


Рис. 6-4. Схема включения тетрода.

емкость тетрода по сравнению с триодом уменьшается в сотни раз (вместо 2—15 $nф$ становится 0,01—0,05 $nф$).

Включение тетрода в усилительной схеме показано на рис. 6-4. Принцип работы усилительной схемы на тетроре одинаков со схемой усилителя на триоде. На экранирующую сетку подается положительное напряжение, составляющее 0,2—0,5 от анодного. По цепи экранирующей сетки протекает ток I_{c2} , имеющий направление внутри лампы от экранирующей сетки к катоду. Ток экранирующей сетки при нормальном режиме меньше анодного тока и обычно не превышает 25% его. При подаче переменного напряжения на управляющую сетку ток в цепи экранирующей сетки становится пульсирующим. Постоянная составляющая тока экранирующей сетки протекает через источник питания $E_{с2}$, а переменная составляющая i_{c2} — через блокировочный конденсатор $C_б$. В этом случае потенциал по переменному току на экранирующей сетке станет равен нулю, что и требуется для выполнения ею функции экрана. Следует

отметить, что ток второй сетки является перабочим током и чем он меньше, тем лучше.

Характеристики и параметры тетрода. На рис. 6-5 изображена схема для снятия статических характеристик тетрода. Анодный ток в тетроде зависит от напряжений на управляющей сетке — U_{c1} , экранирующей сетке U_{c2} и аноде U_a . Изменяя напряжение на одном из электродов, напряжения на остальных электродах должны оставаться постоянными. Наибольший интерес

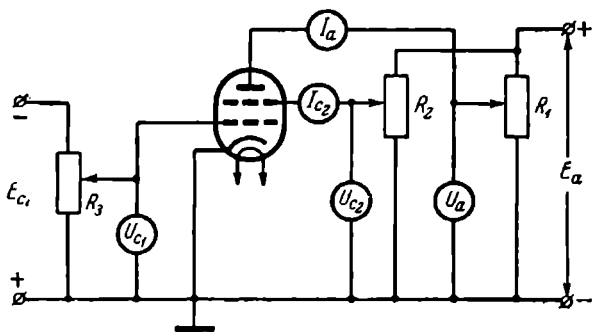
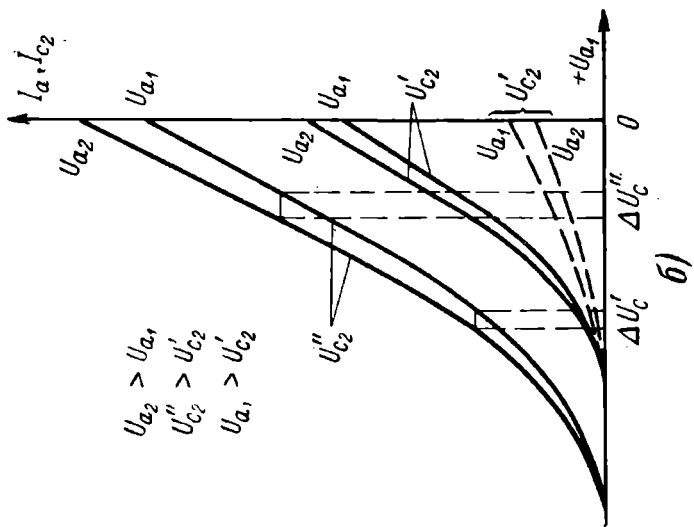
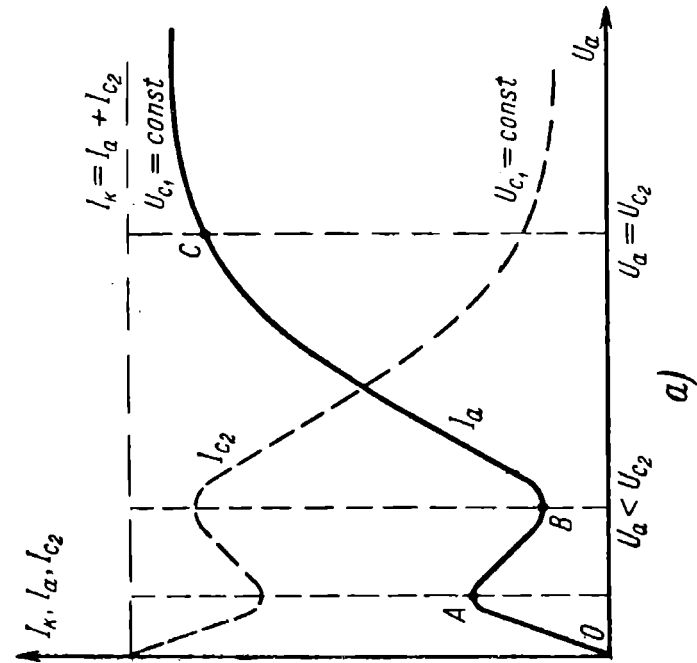


Рис. 6-5. Схема для снятия статических характеристик тетрода.

представляют анодные характеристики: $I_a = f(U_a)$ и сеточно-анодные (по второй сетке): $I_{c2} = f(U_a)$.

На рис. 6-6,а приведена анодная характеристика тетрода (сплошная линия). Рассматривая анодную характеристику, можно видеть, что она имеет провал. С увеличением анодного напряжения ток анода сначала возрастает (участок OA), затем уменьшается (AB) и снова возрастает (BC). Увеличение анодного тока на участке характеристики OA вызывается увеличением анодного напряжения (примерно до 10—20 в). Спад характеристики на участке AB объясняется появлением вторичной эмиссии электронов с анода. Первичные электроны с катода под действием приложенных напряжений к экранирующей сетке и аноду приобретают энергию, достаточную для выбивания из анода вторичных электронов, которые направляются к экранирующей сетке (к электроду с большим потенциалом), т. е. навстречу первичным электронам, вследствие чего анодный ток уменьшается. Это явление получило название «ди-



натронный эффект». Подъем характеристики (BC) происходит потому, что при повышении анодного напряжения вторичные электроны будут притягиваться анодом. Следовательно, динатронный эффект анода, выражающийся в провале анодной характеристики, возникает только при напряжении на аноде, меньшем чем на экранирующей сетке ($U_a < U_{c2}$). Когда число выбиваемых вторичных электронов значительно превышает число первичных, анодный ток может иметь обратное направление. При $U_a > U_{c2}$ характеристика приобретает пологий участок, почти параллельный оси абсцисс.

На том же рисунке пунктиром показана характеристика тока второй сетки. При нулевом анодном напряжении ток экранирующей сетки максимален, он уменьшается с увеличением анодного тока настолько, насколько увеличивается анодный ток, так как в сумме анодный ток и ток экранирующей сетки равны току катода, а ток катода остается приблизительно постоянным.

При снятии характеристик и испытании ламп, имеющих экранирующую сетку, не следует на длительное время оставлять лампу под полным экраным напряжением U_{c2} при нулевом или очень малом напряжении на аноде. В этом случае значительный ток экранирующей сетки может перегреть сетку, которая выделит газ, и лампа окажется непригодной к работе.

Анодно-сеточная характеристика тетрода показывает зависимость анодного тока от напряжения на управляющей сетке при постоянных напряжениях на аноде и экранирующей сетке:

$$I_a = f(U_{c1}); U_a = \text{const}; U_{c2} = \text{const}.$$

На рис. 6-6,б изображено семейство анодно-сеточных характеристик, состоящих из двух групп, каждая из которых снята при постоянном напряжении на экранирующей сетке, при условии, что $U_{a1} > U_{c2}$. С увеличением анодного напряжения характеристики не сдвигаются влево параллельно самим себе, как в триоде, а располагаются веерообразно. Это объясняется распределением тока катода между анодом и экранирующей сеткой. Изменения анодного напряжения слабо влияют на коэффициент токораспределения, поэтому большое изменение анодного напряжения вызывает лишь незначительное изменение анодного тока. Изменение экранного на-

пряжения вызывает смещение анодно-сеточной характеристики тетрода подобно смещению анодно-сеточной характеристики триода при изменении его анодного напряжения.

Экранно-сеточные характеристики $I_{c2} = f(U_{c1})$; $U_a = \text{const}$; $U_{c2} = \text{const}$ изображены на рис. 6-6,б пунктиром. Они начинаются из той же точки, что и анодно-сеточные. С увеличением анодного напряжения ток экранирующей сетки I_{c2} уменьшается. Объясняется это тем, что ток второй сетки I_{c2} представляет собой разность токов катода и анода ($I_{c2} = I_k - I_a$), анодный же ток с увеличением анодного напряжения возрастает.

Проницаемость тетрода, имеющего две сетки, значительно меньше проницаемости триода и равна произведению проницаемостей обеих сеток:

$$D = D_1 D_2,$$

где D — общая проницаемость тетрода;

D_1 — проницаемость управляющей сетки;

D_2 — проницаемость экранирующей сетки.

Из-за малой проницаемости тетрода катодный ток практически не зависит от анодного напряжения, и поведение анодной характеристики в основном определяется распределением тока между анодом и экранирующей сеткой. Поскольку на пологом участке анодной характеристики, являющейся рабочим участком, большие приращения анодного напряжения вызывают лишь незначительные изменения анодного тока, внутреннее сопротивление тетрода в этом режиме оказывается большим (значительно больше внутреннего сопротивления триода):

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \gg R_i \text{ (триода)}.$$

Поэтому при одинаковом значении крутизны характеристики, которая зависит от конструкции и расположения управляющей сетки, коэффициент усиления тетрода оказывается значительно больше коэффициента усиления триода, что следует из равенства, справедливого для всех электронных ламп:

$$\mu = S R_i = 100 - 500 \gg \mu \text{ (триода)}.$$

Положение анодно-сеточной динамической характеристики при $R_i \gg R_a$ мало отличается от статической, и крутизну динамической характеристики можно считать равной крутизне статической:

$$S_d = S \frac{R_i}{R_a + R_i}.$$

При $R_a \ll R_i$

$$S_d = S.$$

В схемах усилителей мощности низкой частоты тетроды не применяются из-за искажения анодного тока вследствие динаatronного эффекта. В усилителях высокой частоты они заменяются более совершенными лампами — пентодами. Тетроды находят применение только в генераторных схемах.

6-2. ПЕНТОД

Пентод — это пятиэлектродная лампа с тремя сетками. На рис. 6-7 показаны условное изображение пентода и схема его включения. Первая сетка — управ-

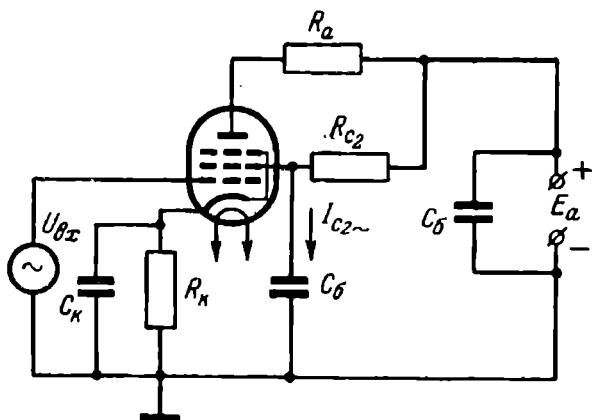


Рис. 6-7. Условное изображение пентода и схема его включения.

ляющая, вторая — экранирующая, третья сетка называется антидинаatronной, защитной или пентодной. Третья сетка помещается между экранирующей сеткой и анодом и служит для устранения динаatronного эффекта. Третья сетка может соединяться с катодом внутри лампы или иметь вывод на цоколь и соединяться с ка-

тодом снаружи лампы. В обоих случаях сетка имеет нулевой потенциал (потенциал катода).

На рис. 6-7 приведена схема включения пентода в режиме усиления. Принцип действия схемы на пентоде аналогичен схеме на лампе триод.

Подавление динатронного эффекта третьей сеткой пентода можно объяснить следующим образом. Вторичные электроны, выбиваемые с поверхности анода, имеют малую скорость. Они не могут преодолеть тормозящего

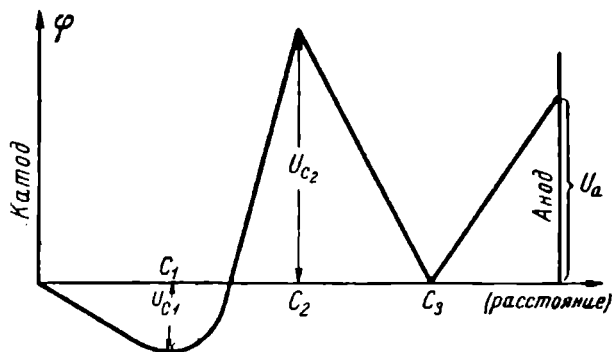


Рис. 6-8. Распределение потенциала между электродами пентода.

поля, создаваемого нулевым потенциалом третьей сетки, и возвращаются на анод.

На рис. 6-8 показано распределение потенциала между электродами пентода, когда управляющая сетка имеет отрицательный потенциал, третья сетка — нулевой, а потенциал анода ниже потенциала экранирующей сетки, т. е. рассмотрен случай, когда в лампе может возникнуть динатронный эффект. Из кривой распределения потенциала видно, что защитная сетка препятствует попаданию вторичных электронов на экранирующую сетку, иными словами, производит подавление динатронного эффекта. Для того чтобы тормозящее поле третьей сетки не уменьшило скорости движения первичных электронов, третью сетку делают редкой, а напряжение на экранирующей сетке повышают по сравнению с тетродом и доводят до 40—100% анодного напряжения. Практически на экранирующую сетку напряжение подается от общего источника, питающего как анодную

цепь, так и цепь экранирующей сетки (рис. 6-7). Сопротивление R_{c2} в цепи экранирующей сетки гасит избыток напряжения, напряжение которой

$$U_{c2} = E_a - I_{c2} R_{c2}. \quad (6-2)$$

Автоматическое смещение определяется по формуле

$$E_{c1} = (I_a + I_{c2}) R_K, \quad (6-3)$$

где I_a — анодный ток;

I_{c2} — постоянная составляющая тока экранирующей сетки;

R_K — активное сопротивление в цепи катода.

Действующее напряжение на аноде эквивалентного диода для пентода

$$U_d = U_{c1} + D_1 U_{c2} + D_1 D_2 U_{c3} + D_1 D_2 D_3 U_a, \quad (6-4)$$

где $D_1 U_{c2}$ — приведенный потенциал экранирующей сетки;

$D_1 D_2 U_{c3}$ — приведенный потенциал антидинатронной сетки;

$D_1 D_2 D_3 U_a$ — приведенный потенциал анода.

Анализируя формулу (6-4), можно сказать, что при напряжении на экранирующей сетке, равном нулю, анодный ток отсутствует, так как действующее напряжение будет почти равным нулю.

Общая проницаемость пентода очень мала. Она равна произведению проницаемости трех сеток: $D = D_1 D_2 D_3$. Защитная сетка создает дополнительную экранировку управляющей сетки, поэтому проходная емкость еще более уменьшается по сравнению с тетродом.

Анодно-сеточные и экранно-сеточные характеристики пентода имеют расположение, аналогичное соответствующим характеристикам тетрода.

На рис. 6-9 изображены анодно-сеточные характеристики пентода по третьей сетке (третья сетка имеет вывод на цоколь). Потенциалом третьей сетки можно регулировать величину анодного тока, а также запереть лампу. Напряжение запирания зависит от проницаемости третьей сетки. Для пентода 6Ж2Б напряжение запирания равно 10 в; для пентода 6Ж4 — 130 в, а для пентода 6П9 порядка — 170 в.

Семейство анодных характеристик пентода приведено на рис. 6-10. Анодная характеристика пентода не имеет провала и состоит из двух участков, резко отличающихся один от другого: начальный с быстро нарастающим анодным током и пологий, идущий почти параллельно оси абсцисс. Переход от начального участка к пологому происходит медленно. Рабочим участком характеристики можно считать только пологий линейный участок. Криволинейная часть сокращает рабочую область характеристик, что является недостатком пентода. Пологость рабочих участков характеристик не является следствием режима насыщения, а объясняется малым влиянием анодного напряжения на анодный ток и большим внутренним сопротивлением пентода.

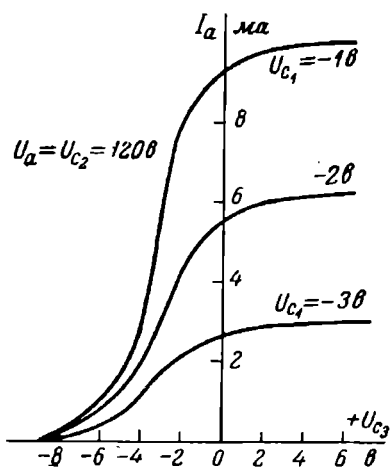


Рис. 6-9. Анодно-сеточные характеристики пентода 6Ж2Б (по третьей сетке).

влиянием анодного напряжения на анодный ток и большим внутренним сопротивлением пентода.

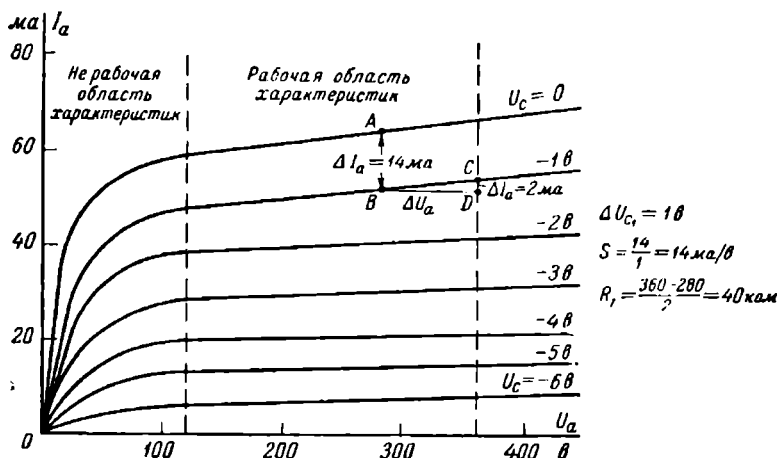
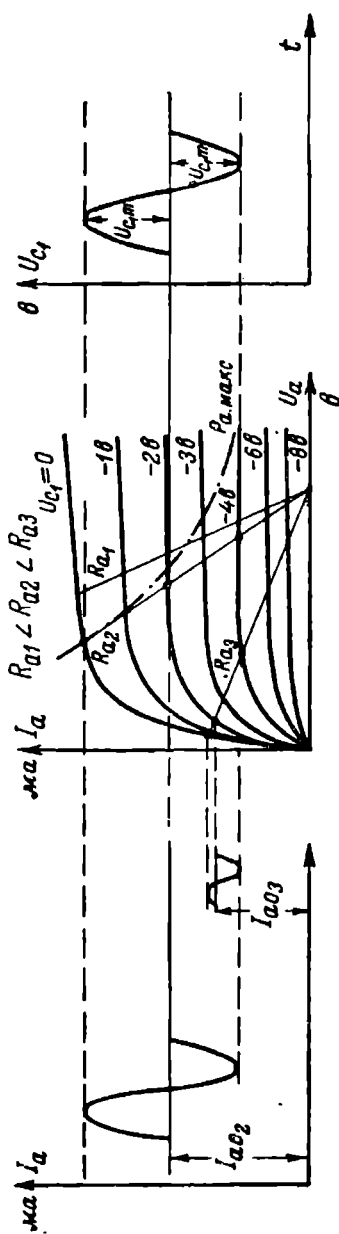


Рис. 6-10. Семейство анодных характеристик пентода.

Быстрое в
 анодного тока
 чении анодно
 ния от нуля п
 15—30 в объяс
 что между экр
 и антидинатр
 ками образуе
 тронное облач
 ный заряд)
 тормозящего
 ваемого антид
 сеткой. Это
 облачко можн
 тривать как вл
 его обычно на
 туральным (с
 катодом. Сле
 анодный ток
 анодных напр
 ществует гла
 зом за счет вл
 катода. При н
 его анодный
 определяться
 ентом тока ра
 между анодо
 рующей сетки
 в данном ре
 мало зависит
 напряжения.

На семейс
 статических
 стик показан
 динамических
 стик при ра
 сопротивлениях
 (рис. 6-11). П
 аналогично
 для лампы три
 отметить, чт
 нагрузочного
 ния составл



10% от внутреннего сопротивления пентода, так как при большем значении сопротивления динамическая характеристика захватывает криволинейные участки статических характеристик. Для неискаженного усиления динамическую характеристику следует располагать в области, где статические анодные характеристики прямолинейны. Из приведенных кривых видно, что наименьшие искажения получаются при нагрузке R_{a2} , а наибольшие — при нагрузке R_{a3} . Нагрузка R_{a1} является неприемлемой, так как динамическая характеристика пересекает кривую $P_{a.макс}$.

Параметры пентода проще определять по анодным характеристикам (рис. 6-10). Для крутизны $S = \Delta I_a / \Delta U_{c1}$ приращение анодного тока ΔI_a определяется по точкам AB ; приращение сточного напряжения равно разности напряжений характеристик, на которых находятся точки A и B . Для внутреннего сопротивления $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$ приращения анодного напряжения и тока определяются точками B и C , лежащими на одной характеристике. Коэффициент усиления μ может быть определен по формуле $\mu = SR_i$.

Параметры пентода зависят от напряжения на экранирующей сетке. С увеличением напряжения на экранирующей сетке увеличивается только крутизна характеристики S ; внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления μ уменьшаются.

В справочных данных по лампам приводятся характеристики и параметры для одного рекомендованного режима, для других режимов они будут другие.

6.3. НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ПЕНТОДЫ И ЛУЧЕВЫЕ ТЕТРОДЫ

Эти лампы применяются для усиления мощности низкой частоты, поэтому для них не имеет значения величина проходной емкости.

В целях увеличения полезной мощности в нагрузке и получения левых характеристик напряжение на экранирующей сетке устанавливают близким или равным анодному. Поскольку проницаемость низкочастотного пентода относительно велика, то коэффициент усиления не превышает 600. Крутизна характеристики находится в пределах 6—8 $ма/в$.

Помимо пентодов, в каскадах усиления мощности низкой частоты применяются так называемые лучевые

тетроды, которые имеют несколько лучшие характеристики, чем у пентода. Лучевым тетродом называется четырехэлектродная лампа (рис. 6-12,а), в которой отсутствует диатронный эффект. Устройство лучевого тетрода показано на рис. 6-12,б.

В лучевом тетроде для устранения диатронного эффекта используют объемный заряд, возникающий между экранирующей сеткой и анодом, так как он понижает потенциал поля на этом участке. Потенциал поля будет ниже потенциала анода и экранирующей сетки. Образующийся минимум потенциала создает тормозящее поле для вторичных электронов, которые не смогут его преодолеть и возвратятся к аноду. Следовательно, объемный заряд в лучевом тетроде выполняет ту же роль, что и третья сетка в пентоде, т. е. устраняет диатронный эффект, когда анодное напряжение будет меньше напряжения экранирующей сетки. С уменьшением анодного напряжения минимум потенциала M перемещается ближе к аноду (рис. 6-13).

Увеличения плотности объемного заряда в лучевом тетроде достигают фокусировкой электронного потока в виде лучей как в горизонтальной плоскости, так и в вертикальной. Для этого изменяют конструкцию тетрода. Основная фокусировка осуществляется в горизонтальной плоскости двумя экранами 4 (рис. 6-12,б), установленными между анодом 5 и экранирующей сеткой 3. Внутри лампы экраны соединяются с катодом 1 и находятся под нулевым потенциалом. Тогда электронный поток с катода направится не на весь анод, а только на часть его в виде двух лучей (рис. 6-12,в) и плотность электронного потока увеличивается. Дополнительная фокусировка производится в вертикальной плоскости за счет изготовления сеток управляющей 2 и экранирующей 3 с одинаковым шагом намотки и установлением их вствор, т. е. один виток против другого. Этим обеспечивается лучеобразное распространение электронов от катода к аноду между витками сеток (рис. 6-12,г). Таким образом, витки экранирующей сетки находятся как бы в тени витков управляющей сетки, что уменьшает ток экранной сетки. В лучевых тетродах ток I_{c2} составляет 5—10% от анодного тока, тогда как в обычных тетродах он доходит до 25—30%.

Лучевой тетрод является мощной лампой, так как

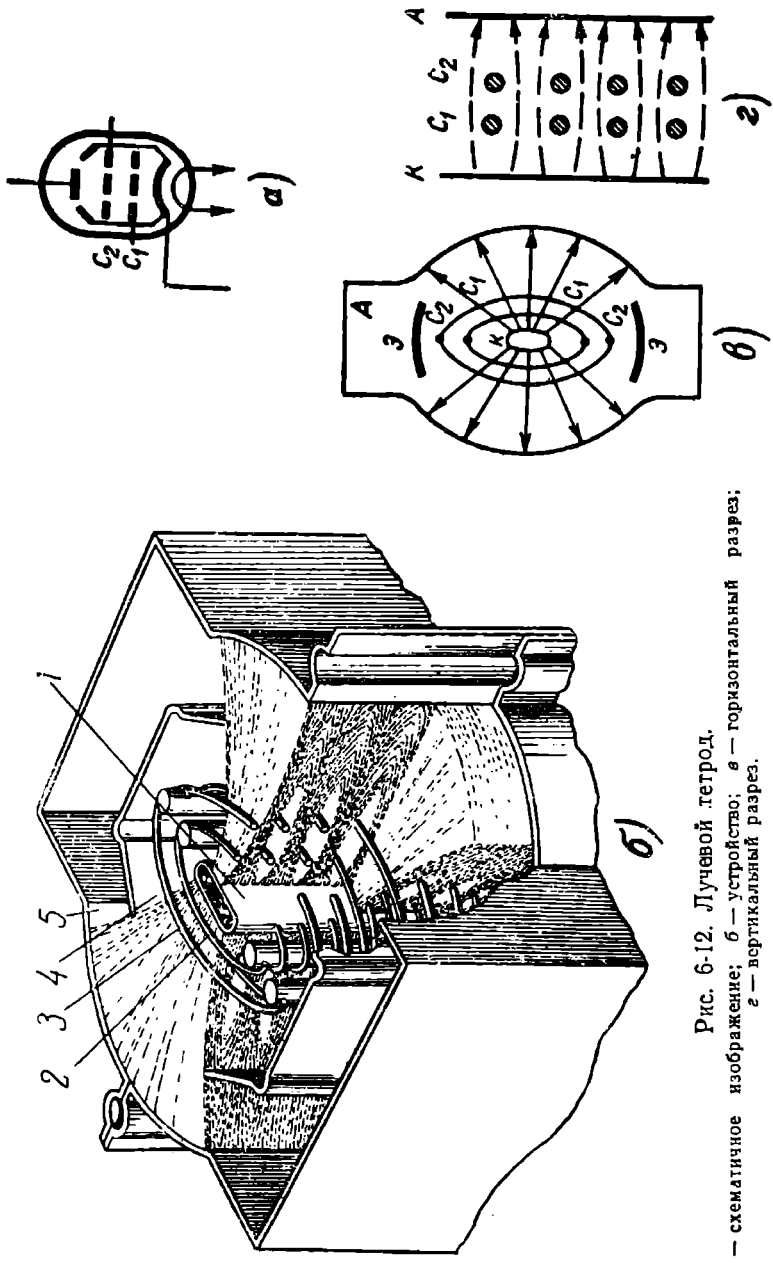


Рис. 6-12. Лучевой тетрод.
 а — схематичное изображение; б — устройство; в — горизонтальный разрез;
 г — вертикальный разрез.

при малых анодных токах динаatronный эффект полностью не устраняется. Анодные характеристики лучевого тетрода более спрямленные, чем характеристики пентоды.

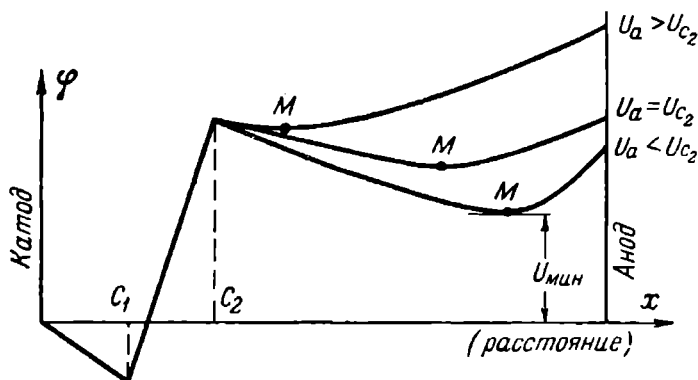


Рис. 6-13. Распределение потенциала в лучевом тетроде.

тока. Начальный участок характеристики идет круче и резко переходит в линейный рабочий участок. Характеристики при больших отрицательных напряжениях на

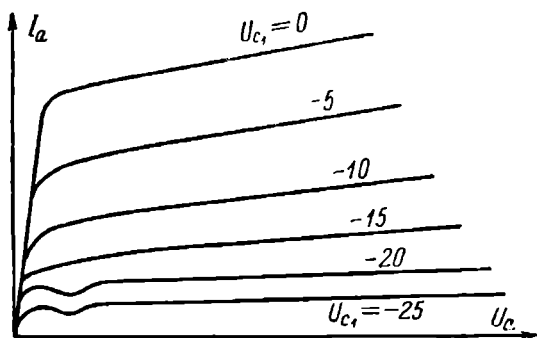


Рис. 6-14. Анодные характеристики лучевого тетрода.

управляющей сетке, когда анодный ток мал, имеют небольшое искривление (динаatronный эффект полностью не подавлен).

На рис. 6-15 приведена схема каскада усилителя мощности на лучевом тетроде.

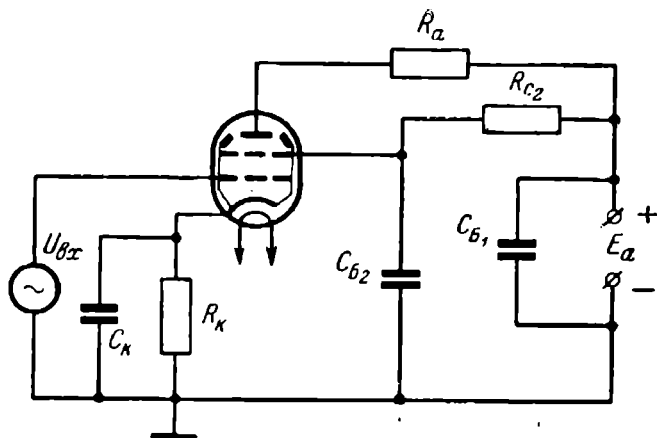


Рис. 6-15. Схема каскада усилителя мощности на лучевом тетроде.

Основные данные низкочастотных пентодов и лучевых тетродов приведены в табл. 6-1.

Таблица 6-1

Наименование лампы	Тип	$P_{в.л.ч.}, \text{вт}$	$P_a, \text{вт}$	μ	$S, \text{ма/в}$	$R_i, \text{ком}$
Выходной пентод	1П2Б	0,025	0,05	20	0,425	50
То же	6П14П	2	12	330	11,3	30
" "	6П15П	2	12,0	1 470	14,7	100
Лучевой тетрод	6П1П	3,8	12	200	4,9	42,5
То же	6П3С	6,5	20	135	6,0	22,5
" "	6П6С	4,5	13	210	4,1	52

6-4. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПЕНТОДЫ

Для усиления колебаний высокой частоты применяется пентод — усилительная лампа с малой проходной емкостью, большим коэффициентом усиления ($\mu = 500$ — 5000) и большим внутренним сопротивлением до 2 Мом . Последнее является особенно ценным потому, что нагрузкой пентода при усилении высокой частоты служит колебательный контур и лампа с большим внутренним сопротивлением, шунтируя контур, не ухуд-

шает его параметров (рис. 6-16). Высокочастотные пентоды находят применение и в предварительных каскадах усиления напряжения низкой частоты, когда на сетку подается переменное напряжение небольшой величины (до 1 в). Поскольку нагрузочное сопротивление

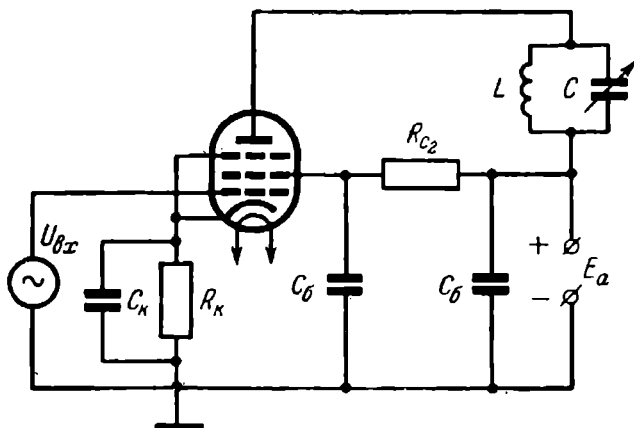


Рис. 6-16. Схема каскада усилителя высокой частоты.

пентода значительно меньше внутреннего сопротивления $R_a \ll R_i$, то в формуле коэффициента усиления величиной R_a как слагаемой можно пренебречь:

$$K = \mu \frac{R_a}{R_a + R_i} \approx \frac{\mu}{R_i} R_a \approx SR_a. \quad (6-5)$$

Если нагрузкой пентода является колебательный контур, то коэффициент усиления

$$K = SR_{к.р.}, \quad (6-6)$$

где $R_{к.р.}$ — эквивалентное резонансное сопротивление контура.

Пентоды как высокочастотные, так и низкочастотные могут работать в триодном режиме. Для этого экранирующая сетка соединяется с анодом; третья сетка, если имеется отдельный вывод, тоже подключается к аноду (рис. 6-17). Анодное напряжение при этом не должно превышать максимально допустимого напряжения на экранирующей сетке. Характеристики и параметры пен-

тогда при триодном включении будут соответствовать триоду; крутизна характеристики почти не изменяется, а коэффициент усиления и внутреннее сопротивление уменьшаются. На рис. 6-18 приведены характеристики высокочастотного пентода 6Ж7 при пентодном (а) и триодном (б) включениях.

Помимо рассмотренных пентодов с «короткой» характеристикой, имеются еще пентоды с «удлиненной»

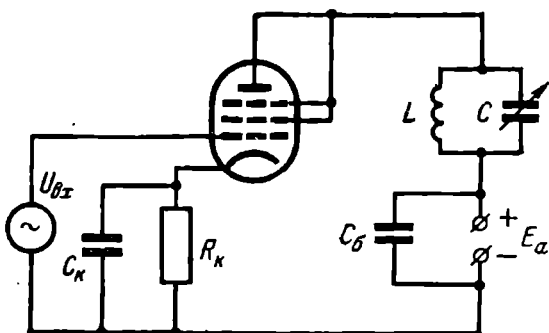


Рис. 6-17. Включение пентода в триодном режиме.

характеристикой. Они применяются для усиления высокой частоты в усилителях с автоматической регулировкой громкости (АРГ) для поддержания на выходе усилителя постоянного уровня сигнала, когда на входе его уровень изменяется. На рис. 6-19,а приведена анодно-сеточная характеристика такой лампы. Она состоит как бы из двух участков: с малой крутизной (АС) и большой крутизной (СК). Нормально рабочая точка характеристики выбирается посередине характеристики с большей крутизной (точка В). При увеличении сигнала значительно увеличилась бы переменная составляющая анодного тока и, следовательно, громкость. Для сохранения прежней громкости в схеме усилителя автоматически увеличивается смещение и рабочая точка характеристики (В) смещается на пологий участок (точка О), где при большем уровне сигнала переменная составляющая анодного тока примерно сохранит свою первоначальную величину и громкость не изменится (рис. 6-19,б).

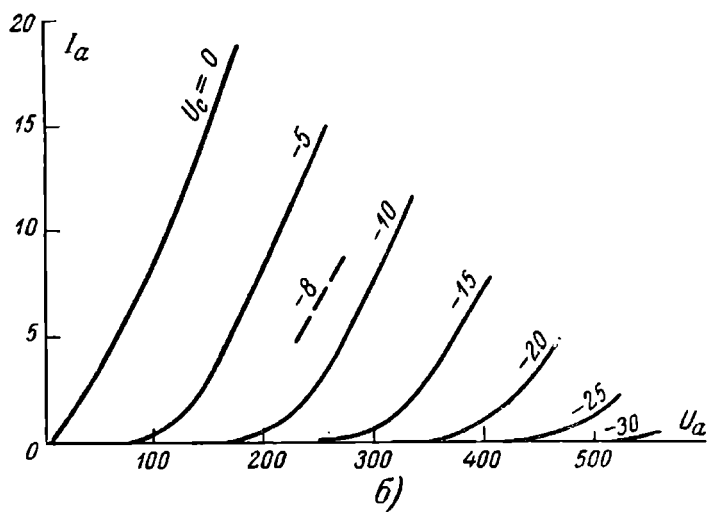
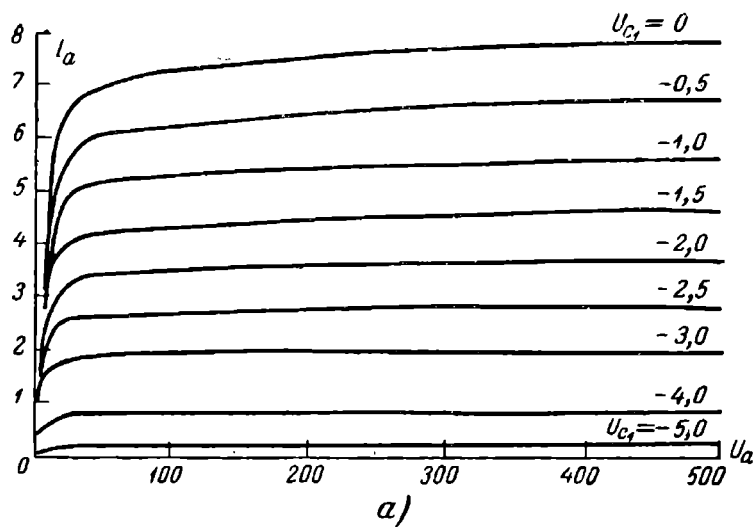


Рис. 6-18. Характеристики высокочастотного пентода 6Ж8.
 а — пентодное включение; б — триодное включение.

Удлиненная характеристика получается при намотке управляющей сетки с переменным шагом (рис. 6-19, в). Когда смещение на сетке невелико (точка В), то управляет анодным током вся сетка (преимущественно ее густая часть). Если же смещение увеличивается (точка О), то через густую часть сетки ток проходить не

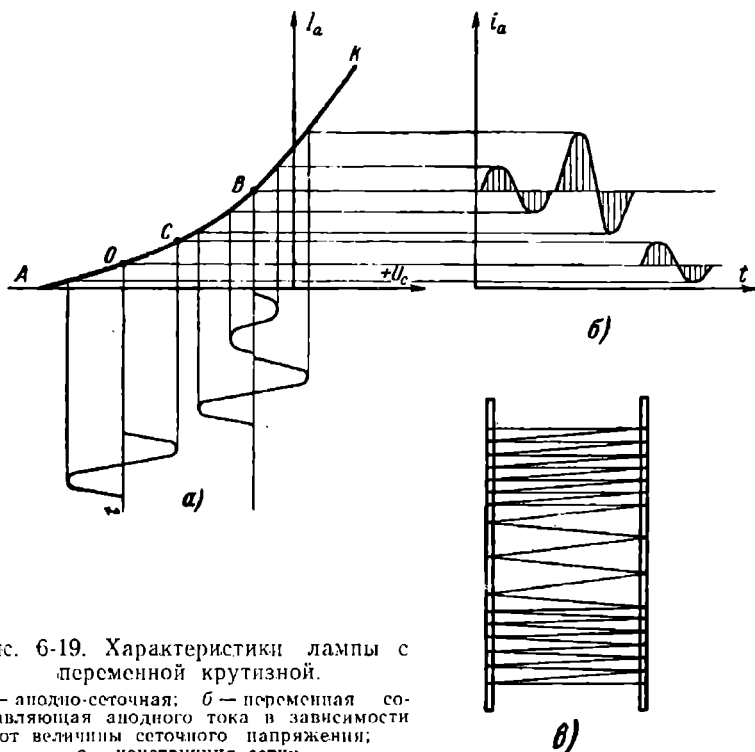


Рис. 6-19. Характеристики лампы с переменной крутизной.

а — анодно-сеточная; б — переменная составляющая анодного тока в зависимости от величины сеточного напряжения; в — конструкция сетки.

будет и управлять анодным током будет лишь редкая часть сетки.

Для высокочастотных пентодов весьма важное значение имеют междуэлектродные емкости, которые можно считать дополнительными параметрами лампы.

Входная емкость — это емкость между управляющей сеткой и катодом:

$$C_{\text{вх}} = C_{\text{с1к}} + C_{\text{с1с2}} + C_{\text{с1с2}} \quad (6-7)$$

Входная емкость имеет значения порядка 3—11 пф.

Выходная емкость — это емкость между анодом и катодом:

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{а.к}} + C_{\text{а.с2}} + C_{\text{а.с3}}. \quad (6-8)$$

Выходная емкость обычно меньше входной и бывает порядка 1,5—11 пф.

Прходная емкость — это емкость между анодом и управляющей сеткой:

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{а.с1}}. \quad (6-9)$$

Прходная емкость находится в пределах 0,003—0,01 пф.

Когда лампы со стеклянным баллоном помещаются в металлический экран, то значения емкостей увеличиваются примерно на 10%.

Основные данные высокочастотных пентодов приведены в табл. 6-2.

Таблица 6-2

Наименование пентода	Тип	\pm	S , ма/в	R_1 , ком	$C_{\text{вх}}$, пф	$C_{\text{анз}}$, пф	$C_{\text{пр}}$, пф
Высокочастотный пентод с короткой характеристикой	6Ж1Б	960	4,8	0,2	4,8	3,8	0,03
То же	6Ж3П	4 000	5	0,8	6,5	1,5	0,025
" "	6Ж5П	4 500	9	0,5	10	2,5	0,04
" "	6Ж4	9 000	9	1,0	11	5	0,015
То же (с катодной сеткой)	6Ж21П	1 020	17	0,06	5,9	1,9	0,035
То же	6Ж22П	1 950	30	0,065	9,0	2,4	0,05
Высокочастотный пентод с удлиненной характеристикой	6К4	4 230	4,7	0,9	8,5	7	0,005

6-5. ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ПЕНТОДЫ

Чем выше частота колебаний и чем больше полоса усиливаемых частот, тем меньше должен быть коэффициент усиления каскада. Большое значение при этом имеют междуэлектродные емкости лампы. Отдельные лампы сравниваются между собой по так называемому коэффициенту широкополосности γ , опре-

деляемому отношению крутизны характеристики к сумме входной и выходной емкостей лампы:

$$\gamma = \frac{S}{C_{вх} + C_{вых}} [ма/в \cdot пф]. \quad (6-10)$$

Чем больше γ , тем больше получается коэффициент усиления схемы. Уменьшить междуэлектродные емкости можно, уменьшая линейные размеры электродов, т. е. переходя к миниатюрным и сверхминиатюрным лампам. Но одного уменьшения емкости еще недостаточно для повышения γ , необходимо одновременно увеличивать и крутизну характеристики. Этого можно достигнуть различными средствами, например, уменьшением расстояния между катодом и сеткой, при этом сетку необходимо делать микроструктурной более «прозрачной», т. е. уменьшать диаметр проволочки и шаг намотки. Обычно используют оба эти метода. Значительный коэффициент широкополосности получается в электронных лампах с катодной сеткой, а также со вторичной электронной эмиссией.

Пентоды со вторичной эмиссией. Эффект вторичной электронной эмиссии, наблюдаемый в тетроде и известный как диатронный эффект, долгое время считался вредным; он подавлялся специальной конструкцией лампы (пентод, лучевой тетрод). В последние годы вторичную электронную эмиссию стали использовать в усилительных лампах с целью получения большой крутизны. Впервые лампы со вторичной эмиссией были разработаны примерно в 1935 г. и имели крутизну порядка 14 ма/в. Однако такие лампы были сложны в производстве, неустойчивы по параметрам, не идентичны и требовали высоких напряжений на электродах. Причиной этого являлась трудность изготовления вторичного катода (динода), испускающего вторичные электроны при бомбардировке его первичными электронами с термокатода. Дело в том, что из оксидного катода испаряется металлический барий, который, осаждаясь на диноде, загрязняет его, отчего уменьшается вторичная электронная эмиссия. В настоящее время выпускаются лампы со вторичной эмиссией, работающие при нормальном анодном напряжении 250 в и имеющие значительную крутизну. Например, лампа 6В1П типа пеп-

тод имеет крутизну характеристики анодного тока 30 ма/в и тока динода 20 ма/в.

Динод выполняется из материала с большим коэффициентом вторичной эмиссии σ — не менее 6. Коэффициентом вторичной эмиссии называется отношение вторичных электронов, эмиттируемых динодом к первичным термоэлектронам, падающим на него:

$$\sigma = \frac{I_{в.э.}}{I_{т.э.}} \quad (6-11)$$

На рис. 6-20 условно показано расположение электродов в лампе со вторичной эмиссией (стрелками на схеме показано направление электронов). Рассмотрим принцип

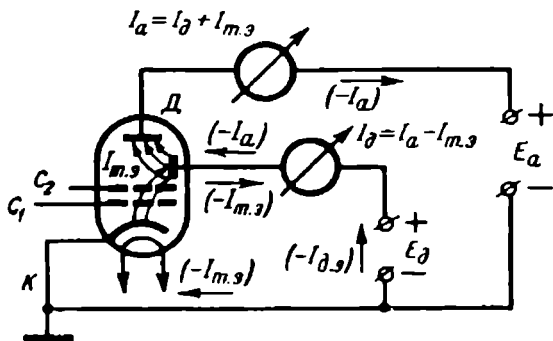


Рис. 6-20. Лампа со вторичной эмиссией: условное расположение электродов и электрические цепи.

действия лампы с вторичной электронной эмиссией. На динод, расположенный между управляющей сеткой и анодом, подается положительное напряжение меньше анодного, например, на 100 в. Электронный поток, эмиттируемый катодом, пройдя управляющую сетку, специальными электродами направляется к диноду и, бомбардируя его, выбивает вторичные электроны, которые притягиваются анодом. Следовательно, анодный ток состоит из вторичных электронов динода:

$$I_a = I_{в.э.} \quad (6-12)$$

Он примерно в 6 раз больше термоэлектронного тока, попадающего на диод:

$$I_a = \sigma I_{т.э.} \quad (6-13)$$

Ток диода равен по абсолютной величине разности токов вторичной эмиссии диода и термоэлектронного, т. е. он больше термоэлектронного тока в $\sigma - 1$ раз:

$$I_d = I_{п.э.} - I_{т.э.} = I_{т.э.}(\sigma - 1). \quad (6-14)$$

Из полученной формулы видно, что при $\sigma = 1$ тока в цепи диода не будет, а анодный ток будет равен термоэлектронному току катода. При $\sigma > 1$ во внешней цепи лампы токи диода и анода имеют противоположное направление.

На рис. 6-21 приведены примерные анодные характе-

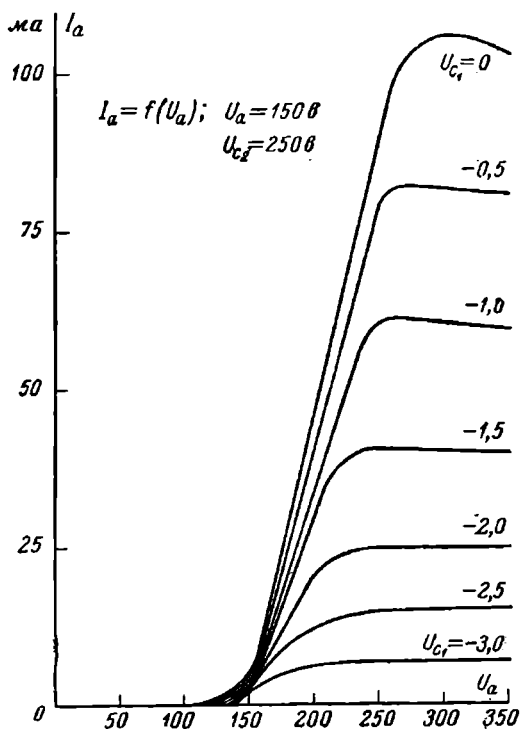


Рис. 6-21. Анодные характеристики лампы со вторичной эмиссией.

ристики лампы с использованием вторичной электронной эмиссии, а на рис. 6-22 — анодно-сеточные.

Как видно из анодных характеристик, кривая анодного тока начинается не из начала координат при $U_a=0$, а только тогда, когда анодное напряжение станет превышать напряжение на диноде ($U_a > U_d$). При анодном напряжении, равном или меньшем динодного ($U_a \leq U_d$), вторичные электроны с динода не могут преодолеть образовавшегося тормозящего поля между динодом и анодом и анодного тока не будет. Так как анодный ток возрастает в σ раз больше по сравнению с током катода, то и крутизна характеристики в лампах со вторичной эмиссией увеличивается во столько же раз по сравнению с характеристикой обычных ламп:

$$S_{в.э} = \sigma S, \quad (6-15)$$

где S — крутизна характеристики ламп без вторичной эмиссии.

При определении мощности, рассеиваемой на аноде, необходимо учитывать, что анодный ток протекает только на участке динод — анод под действием разности потенциалов, приложенных к этим электродам. Мощность, рассеиваемая на аноде,

$$P_a = J_a (U_a - U_d). \quad (6-16)$$

Основные сведения о широкополосных пентодах приведены в табл. 6-3.

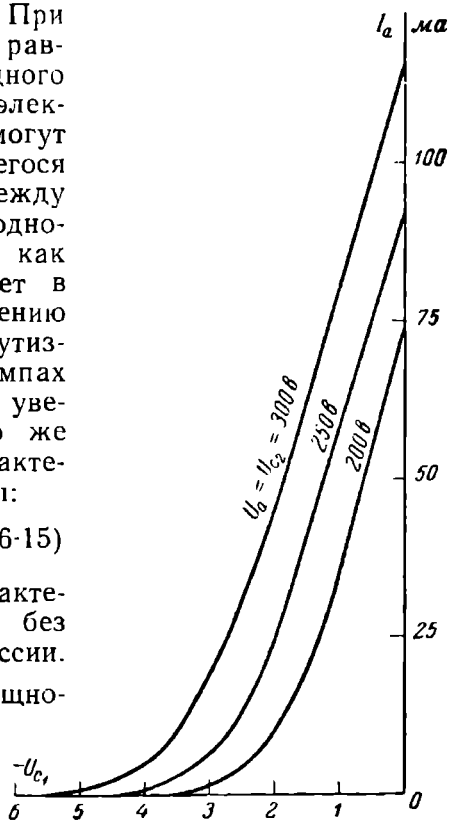


Рис. 6-22. Анодно-сеточные характеристики лампы со вторичной эмиссией.

Таблица 6-3

Наименование пентода	Тип	$S, \text{ма/в}$	$C_{вх}, \text{пф}$	$C_{вых}, \text{пф}$	$C_{пр}, \text{пф}$	$\tau = \frac{S}{C_{вх} + C_{вых}}$
Высокочастотный пентод с короткой характеристикой	6Ж1П	5,2	4,35	2,45	0,025	0,76
То же	6Ж3П	17	8	3	0,03	1,5
" "	6Ж10П	9	8	4	0,02	0,75
" "	6Ж11П	28	13	3,5	0,05	1,7
То же (с двумя раздельными анодами)	6Ж23П	14	14,0	3,5	0,07	0,8
Высокочастотный пентод с катодной сеткой	6Ж21П	20	5,9	1,9	0,03	2,5
То же	6Ж22П	30	9,0	2,4	0,05	2,63

6-6. ПЕНТОДЫ СО СТЕРЖНЕВЫМИ И ШТАМПОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

За последнее время появились лампы типа пентод, отличающиеся от обычных ламп с навитыми сетками как в конструктивном отношении, так и по принципу работы. Разработаны две конструкции ламп: со стержневыми электродами и электродами, имеющими вид плоских рамок.

Стержневые лампы выпускаются в сверхминиатюрном оформлении с катодом прямого накала. Гибкие выводы от электродов проходят через плоское доньшко или сплюснутую ножку, анод же имеет вывод через купол баллона.

На рис. 6-23,а показано расположение электродов в стержневой лампе (вид сверху). Стержни в виде отрезков проволочек попарно соединены друг с другом. Они выполняют роль сеток и анода. Ближайший к катоду электрод — это управляющая сетка, следующий за ним электрод эквивалентен экранирующей сетке, затем следует защитная сетка и самый удаленный электрод является анодом. Стержневые лампы изготавливаются только типа пентод с короткой характеристикой.

По принципу действия стержневые лампы отличаются от ламп с навитыми сетками. В стержневых лампах расположение электродов образует электронно-оптиче-

скую систему, вследствие чего электронный поток формируется в плоский луч и затем фокусируется. Результатом электростатической фокусировки луча является уменьшение токов сеток. Следует отметить, что при включении пентода в триодном режиме защитная сетка должна соединяться с катодом, так как при соединении

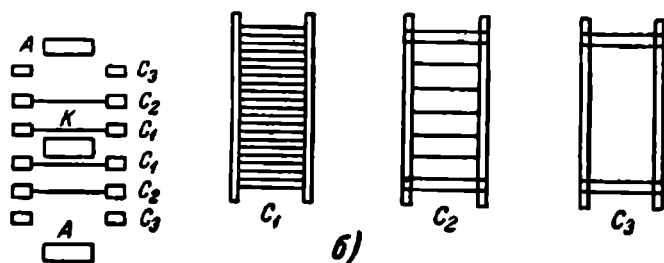
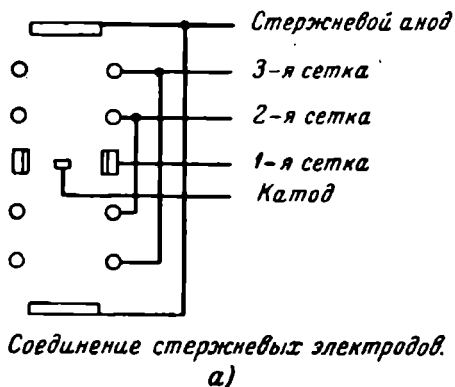


Рис. 6-23. Эскизное изображение стержневых ламп (а) и штампованных (б).

ее с анодом нарушается фокусировка. Стержневые лампы экономичны как по анодной цепи, так и по накалу. Мощность накала в них меньше примерно раза в два по сравнению с лампами с павитыми сетками.

Электроды штампованных ламп имеют вид рамок (рис. 6-23, б): C_1 — управляющая, C_2 — экранирующая; C_3 — защитная. Для уменьшения тока экранирующей сетки витки управляющей и экранирующей сеток располагаются вствор, как в обычном лучевом тетраде. При наличии защитной сетки лампа называется лучевой пентодом.

год. Большим преимуществом конструкции ламп со стержневыми и рамочными электродами является механизация их производства. Другое важное преимущество перед обычными лампами заключается в том, что все электроды выполняются из одного металла — никеля, и это позволяет при откачке легче удалять газы из всех электродов, отчего улучшается вакуум. Кроме того, лампы такой конструкции механически прочны, имеют малые междуэлектродные емкости и экономичны.

Основные данные некоторых стержневых ламп приведены в табл. 6-4.

Таблица 6-4

Тип лампы	$U_{н}, \text{в}$	$I_{н}, \text{мА}$	$U_{д}, \text{в}$	$I_{д}, \text{мА}$	$U_{сг}, \text{в}$	$S, \text{мА/в}$	$R_i, \text{ком}$	$C_{вх}, \text{пф}$	$C_{вых}, \text{пф}$	$C_{пр}, \text{пф}$
1Ж17Б	1,2	60	60	2,3	45	1,0	500	4,0	2,0	0,007
1Ж24Б	1,2	13	60	1,5	45	0,85	—	4,0	2,7	0,008
1Ж29Б	2,2	60	60		45	2,0	—	5,3	3,8	0,005

6-7. ЧАСТОТопРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ И СМЕСИТЕЛЬНЫЕ ЛАМПЫ

Под преобразованием частоты понимается процесс преобразования колебаний одной частоты (частоты сигнала) в колебания другой частоты с сохранением формы сигнала.

Для преобразования частоты сигнала требуется иметь вспомогательные колебания от гетеродина (маломощного генератора незатухающих колебаний).

Частота сигнала f_c и частота гетеродина f_r подаются на нелинейный элемент. Таким нелинейным элементом может быть лампа с двойным управлением анодного тока, т. е. лампа, имеющая две управляющие сетки, например высокочастотный пентод, где третья сетка не соединена с катодом, а имеет вывод на цоколь. В результате двойного управления анодным током в анодной цепи может быть выделено колебание с промежуточной частотой $f_{пр} = f_r - f_c$.

Лучшие результаты получаются при применении специальных ламп с семью электродами, называемые гсптодами. Гсптоды бывают частотопреобразовательными

ми и смесительными, хотя выполняют они одинаковую функцию — преобразование частоты. Названия свои геттоды получают в зависимости от схемы выполнения гетеродина. Если для схемы гетеродина используются электроды данного геттода, то такой геттод называется частотопреобразовательным. Если гетеродин выполнен на отдельной лампе, а на сетки геттода подаются сигналы для смешивания частот, то геттод называется смесительным. Сетка, на которую подается напряжение сигнала, частоту которой требуется преобразовать, называется сигнальной, другая сетка получила название гетеродинной. На рис. 6-24,а показаны геттод-смеситель 6Л7 и схема смесителя на этой лампе.

Принцип работы геттода в качестве смесителя заключается в следующем. Электронный поток, эмиттируемый катодом, направляется к аноду и, встречая на своем пути первую сетку, изменяет свою величину (модулируется) с частотой гетеродина. Далее он, проходя сигнальную сетку, начинает совершать колебания с частотой сигнала. В результате смешения частот и влияния нелинейности электронной лампы анодный ток получается сложной формы, в котором содержатся: составляющие с частотой сигнала f_c , с частотой гетеродина f_r , суммарной частоты $f_c + f_r$ и разностной (промежуточной) частоты $f_c - f_r$ или $f_r - f_c$, смотря по тому какая частота выше. Колебательный контур, являющийся нагрузкой в анодной цепи и настроенный на промежуточную частоту, выделит колебания этой частоты.

Кривая 1 на рис. 6-24,в изображает составляющую анодного тока I_c с частотой сигнала; кривая 2 — составляющую тока I_r с частотой гетеродина. Так как частоты сигнала и гетеродина отличаются друг от друга, то в некоторые моменты времени токи складываются, а в другие — вычитаются. Такие колебания с различными, но близкими амплитудами образуют биения. Огибающая кривая 3 биений (пунктир) и представляет собой колебания промежуточной частоты. Благодаря нелинейности лампы одна огибающая будет выражена более резко, чем другая, что и позволяет выделить это колебание с помощью колебательного контура.

По анодной цепи преобразовательный геттод можно считать эквивалентным двум последовательно включенным лампам: триоду и пентоду. Триодная часть геттода,

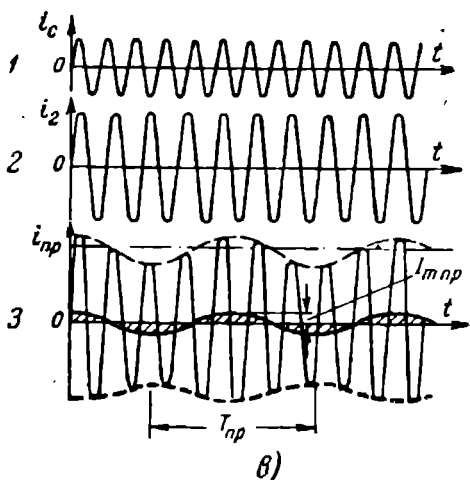
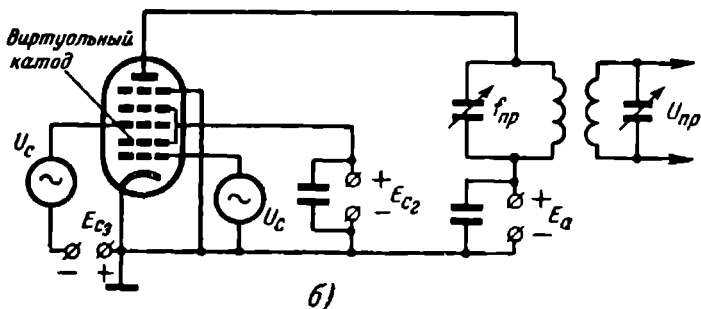
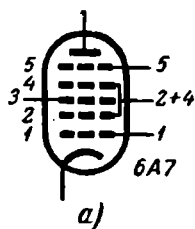


Рис. 6-24. Гептод-смеситель 6A7.

а -- условное изображение; б -- схема смесительного каскада; в -- кривые, иллюстрирующие процесс преобразования частоты.

используемая для гетеродина, состоит из катода, первой сетки — управляющей сетки гетеродина и второй — экранирующей, которая одновременно выполняет роль анода гетеродина.

Пентодная часть преобразовательного геттода имеет сигнальную сетку — третью, экранирующую сетку — четвертую, антидипатронную — пятую и анод. Катодом пентодной части является электронное облачко (виртуальный катод между второй и третьей сетками), которое образуется вследствие торможения электронов отрицательным смещением на третьей сетке. Вторая сетка — экранирующая — как бы отделяет триодную часть от пентодной.

Важнейшим параметром смесительной или преобразовательной лампы считается крутизна преобразования $S_{пр}$, под которой понимается отношение амплитуды промежуточной частоты к амплитуде напряжения сигнала:

$$S_{пр} = \frac{I_{m\text{ пр}}}{U_{m\text{ с}}} \text{ [ма/в]}. \quad (6-17)$$

Крутизна преобразования меньше крутизны статической характеристики лампы $S_{пр} \leq S/4$. Коэффициент усиления преобразовательного каскада

$$K_{пр} = S_{пр} R_{кр}. \quad (6-18)$$

Замстим, что сигнальная сетка в смесительных и частото-преобразовательных лампах часто выполняется с переменным шагом для применения ее в схемах АРГ.

Примером лампы специального назначения может служить лампа 6АЗП с двойным управлением по первой и третьей сеткам. В этой лампе электронный поток превращается в плоский луч и затем луч фокусируется двумя специальными фокусирующими электродами. На рис. 6-25 показаны конструкция и расположение электродов лампы (разрез в горизонтальной плоскости). Оксидный катод находится не в центре конструкции, как обычно, а сбоку. С противоположной стороны катода расположен анод 8 в виде прямоугольной пластинки. Анод заключен в экран 9. На анод подается положительное напряжение 75—100 в, а на экранирующую сетку 6 — напряжение такого же порядка 60—100 в. Экранирующая сетка внутри лампы соединяется с электродом-ускорителем 1. Фокусирующих электродов два. Один из

них (3) расположен около катода и почти окружает его. Другой (5) фокусирующий электрод экранирует управляющую сетку и находится внутри электрода-ускорителя. Оба фокусирующих электрода и экран анода нахо-

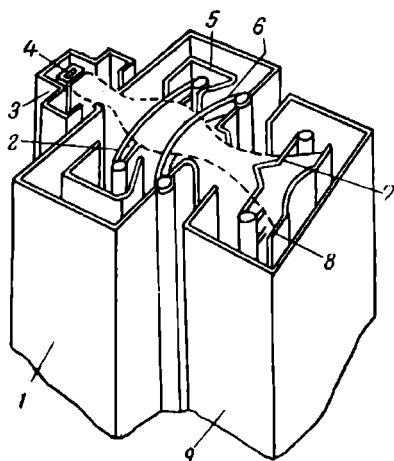


Рис. 6-25. Лампа 6АЗП лучевая с двойным сеточным управлением с фокусированным электронным потоком.

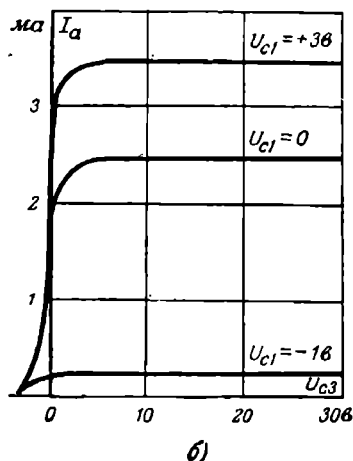
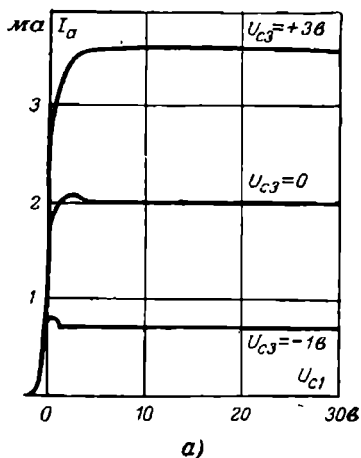


Рис. 6-26. Характеристики лампы 6АЗП.

а - анодно-сеточные (по 1-й сетке); б - анодно-сеточные (по 3-й сетке).

дятся под нулевым потенциалом, так как они соединяются с катодом. Семейство анодно-сеточных характеристик лампы 6А3П по первой и третьей сеткам приведено на рис. 6-26, а, б. Крутизна характеристики по первой сетке ($S_1=1,2 \text{ ма/в}$) больше, чем по третьей ($S_3=0,95 \text{ ма/в}$), так как первая сетка находится ближе к катоду.

6-8. КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛАМПЫ

Комбинированные лампы представляют собой несколько простых ламп, заключенных в общий баллон и работающих независимо друг от друга. Применение комбинированных ламп позволяет значительно сократить

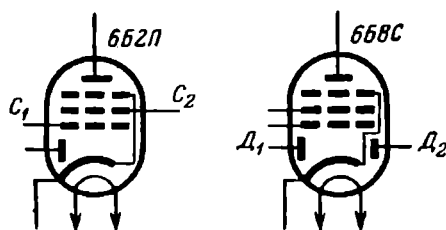


Рис. 6-27. Схематическое изображение ламп диод-пентод 6Б2П и двойной диод-пентод 6Б8С.

габариты радиоаппаратуры и уменьшить мощность питания.

Диод-пентод (6Б2П) и двойной диод-пентод (6Б8С). На рис. 6-27 показано схематическое изображение этих ламп. Пентодная часть диод-пентода может быть применена для усиления промежуточной или высокой частоты, а диод используется для детектирования сигналов, усиленных пентодной частью. В лампе двойной диод-пентод один из диодов включается как детектор, а второй — в качестве выпрямителя в схемах АРГ. На втором месте условного обозначения применяется буква Б.

Триод-пентод (6Ф1П). Триодная часть может включаться как гетеродин или как усилитель, а пентодная — либо как преобразователь на УКВ, либо как уси-

литель высокой или промежуточной частоты. На втором месте условного обозначения ставится буква Ф (рис. 6-28).

Триод-гептод (6И1П). Эта лампа используется большей частью в качестве преобразователя. Триодная часть работает как гетеродин, а гептодная — как смеситель. На втором месте условного обозначения ставится буква И (рис. 6-28).

Электронный индикатор настройки. Электронным индикатором настройки называется комбинированная лампа, состоящая из триода и электронно-лучевого индикатора, находящегося в верхней прозрачной части лампы.

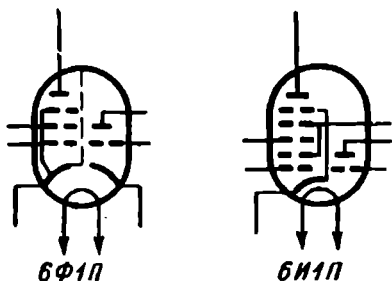


Рис. 6-28. Схематическое изображение ламп триод-пентод 6Ф1П и триод-гептод 6И1П.

Индикаторная часть представляет собой конусообразный экран, покрытый с внутренней стороны флуоресцирующим веществом — виллемитом, светящимся зеленым цветом при бомбардировке его электронами.

Катод индикатора является общим и для триода. Между катодом и экраном расположен металлический управляющий электрод в виде стержня, который соединен с анодом триодной части (рис. 6-29,а), поэтому потенциал управляющего электрода будет всегда равен потенциалу анода. Потенциал же анода зависит от величины тока анода, так как в анодной цепи включено высокоомное сопротивление (1—2 Мом), на котором происходит падение напряжения. Экран индикатора присоединяется непосредственно к плюсу источника питания и поэтому имеет постоянное напряжение.

Форма эквипотенциальных линий электрического поля между катодом и экраном индикатора зависит только от потенциала управляющего электрода. Их форма, для различных значений потенциала управляющего электрода, приведена на рис. 6-29,б. Стрелки показывают направление электронов, которые перемещаются перпендикулярно эквипотенциальным линиям поля. При отсутствии управляющего электрода эквипотенциальные ли-

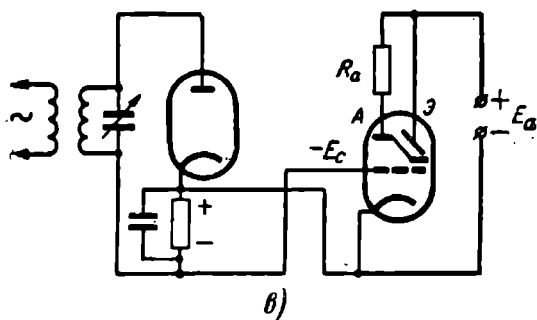
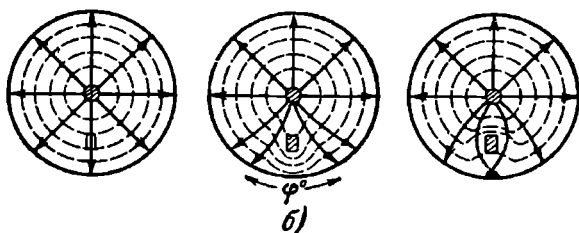
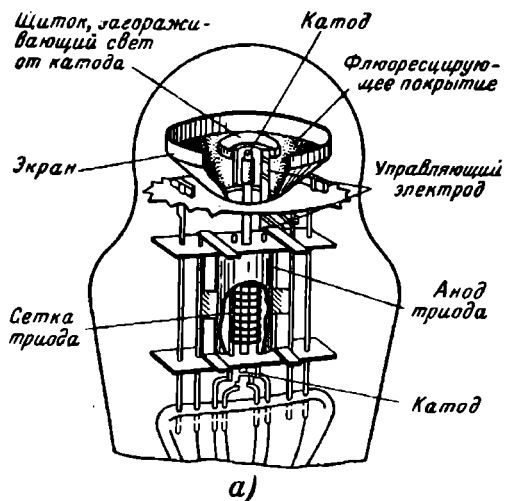


Рис. 6-29. Электрооптический индикатор настройки.
 а — положение электродов; б — форма эквипотенциальных линий э
 поля; в — схема включения электрооптического индикато
 стройки.

нии поля между экраном и катодом имеют вид концентрических окружностей и электроны, перемещаясь от катода к экрану радиально, вызывают свечение всей поверхности экрана. Аналогичный эффект будет наблюдаться и при наличии управляющего электрода, когда потенциал его равен потенциалу поля в месте нахождения управляющего электрода (рис. 6-29,б, левый).

При уменьшении потенциала управляющего электрода эквипотенциальные линии поля между экраном и управляющим электродом расположатся более густо, отчего траектории электронов искривятся. Электроны не смогут попасть на ту часть поверхности экрана, которая расположена против управляющего электрода, поэтому на экране появится широкий затемненный сектор (рис. 6-29,б, средний). Если потенциал управляющего электрода повысится, то сгущение силовых линий произойдет между катодом и управляющим электродом и траектория электронов изменится так, что электроны будут огибать управляющий электрод с обеих сторон, отчего затемненный сектор уменьшится (рис. 6-29,б, правый). Когда же потенциал управляющего электрода будет иметь какое-то промежуточное значение, то соответственно изменится ширина затемненного сектора.

Электронный индикатор применяется в радиоприемниках при настройке в резонанс на принимаемую станцию, когда на слух невозможно определить момент резонанса (рис. 6-29,в). Принцип действия электронного индикатора заключается в следующем. Если приемник расстроен, то на нагрузочном сопротивлении детекторного каскада напряжение будет мало и соответственно мало будет напряжение смещения на сетке триода-индикатора.

При малом смещении по цепи анода потечет относительно большой ток, напряжение на аноде уменьшится, а на экране появится широкий затемненный сектор. Когда приемник настроен в резонанс на частоту принимаемого сигнала, на сетку триода будет поступать больший отрицательный потенциал, анодный ток уменьшится и повысится напряжение на управляющем электроде, а затемненный сектор либо уменьшится, либо исчезнет.

Электронный индикатор настройки может быть применен в качестве безынерционного вольтметра. Величину измеряемого напряжения можно достаточно точно

определить по углу раствора затемненного сектора. В маркировке электронного индикатора настройки на втором месте условного обозначения ставится буква Е.

6-9. ВНУТРИЛАМПОВЫЕ ШУМЫ

Шумы всегда имеют место в электронных лампах, полупроводниковых приборах, а также и в активных сопротивлениях (реактивное сопротивление шумов не создаст).

Действие внутриламповых шумов проявляется в том, что при отсутствии на сетке лампы полезного сигнала, который требует усиления, т. е. при постоянных напряжениях на ее электродах, в анодной цепи протекает пульсирующий ток. Пульсации анодного тока (флуктуации), вызываемые случайными явлениями, происходящими по разным причинам. Рассмотрим эти причины.

Дробовой эффект является главной причиной собственных шумов лампы. Под дробовым эффектом понимается неравномерность испускания электронов катодом за равные промежутки времени. Катодом эмиттируются только те электроны, которые имеют энергию, достаточную для совершения работы выхода. Так как число таких электронов не является строго постоянной величиной, то и анодный ток будет непостоянным (появляются флуктуации тока).

Вторичная эмиссия электронов с электродов лампы, имеющих положительный потенциал. Так как выход вторичных электронов не является строго постоянным, то появляются флуктуации анодного тока, которые в пентоде больше, чем в триоде или пентоде в триодном включении. Вторичная электронная эмиссия может создаваться дополнительными элементами лампы, например траверсами, на которых крепятся сетки ламп, а также слюдяными прокладками, улучшающими жесткость конструкции лампы.

Неравномерность распределения эмиссионного тока катода по электродам лампы, находящимся под положительным потенциалом. Отсюда следует, что в многосеточных лампах, как гептод-смеситель и гептод-преобразователь, величина шума больше, чем в пентоде.

Ионизация молекул газа, оставшегося в баллоне лампы. В результате столкновения электронов

с нейтральными молекулами газа образуются новые заряженные частицы, совершающие беспорядочные движения. Положительные ионы, подвергая бомбардировке катод, выбивают вторичные электроны.

В немалой степени шумы зависят от режима работы лампы. В режиме пространственного заряда лампа шумит меньше, так как электроны, неравномерно вылетающие с катода, попадая в электронное облачко у катода, теряют свою скорость и оттуда будут двигаться к аноду

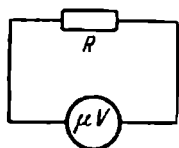


Рис. 6-30. Измерение напряжения шумов на активном сопротивлении (через сопротивление ток не протекает).

более равномерно по времени. Следовательно, уменьшения шумов можно добиться путем уменьшения анодного тока. Лампы с большей крутизной характеристики шумят меньше при относительно малом анодном токе.

За единицу измерения шумовых свойств ламп с сеткой принята величина, называемая «эквивалентное сопротивление шумов» $R_{ш}$. Принятие такой единицы измерения шумов вызвано следующими обстоятельствами.

В каждом активном сопротивлении хаотически перемещаются электроны, причем скорости движения их различны. На зажимах сопротивления без подключенного к нему источника питания будет создаваться переменное напряжение, которое можно измерить прибором (рис. 6-30). Напряжение внутренних шумов на сопротивлении R , вызванное тепловым движением зарядов, вычисляется по формуле

$$U_{ш}^2 = 4kTR\Delta f [в], \quad (6-19)$$

где $U_{ш}$ — действующее шумовое напряжение;

$k = 1,38 \cdot 10^{-3}$ дж/град — постоянная Больцмана;

R — сопротивление, ом;

Δf — полоса пропускания частот, гц.

Если сопротивление R выразить в килоомах, Δf — в килогерцах, то для комнатной температуры $+17^\circ \text{C}$ ($T = 290^\circ \text{C}$) получается более удобная расчетная формула

$$U_{ш} = \frac{1}{8} \sqrt{\overline{R\Delta f}} [\text{мкв}]. \quad (6-20)$$

Если активное сопротивление представляет собой параллельный колебательный контур, то в формулах вместо R надо подставить резонансное сопротивление контура $R_{к.р} = L/Cr$:

$$U_m = \frac{1}{8} \sqrt{R_{к.р} \Delta f}. \quad (6-21)$$

Мощность тепловых шумов, выделяемых на сопротивлении,

$$P_m = \frac{U_m^2}{R} = \frac{4kR\Delta f}{R} = 4kT\Delta f. \quad (6-22)$$

Активное шумящее сопротивление можно заменить генератором шумового напряжения, э. д. с. которого возрастает с увеличением температуры и полосы пропускания, само же сопротивление R считается нешумящим (идеальным). На рис. 6-31 показано включение такого сопротивления с генератором шумового напряжения. Таким образом, под R_m — эквивалентным сопротивлением шумов лампы — следует понимать такое активное шумящее сопротивление, включенное в цепь сетки лампы, которое создаст эквивалентное значение флуктуаций анодного тока в нешумящей лампе.

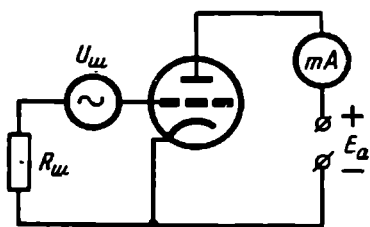


Рис. 6-31. Шумовое сопротивление лампы в виде генератора шумового сопротивления и идеального активного нешумящего сопротивления.

Шумовое сопротивление триода

$$R_m = \frac{2,5 \div 3}{S} [\text{ком}]. \quad (6-23)$$

Для многосеточных ламп шумовое сопротивление примерно раз в 5—10 больше, чем для триода. Лампы, работающие в режиме преобразования, имеют еще большее шумовое сопротивление, так как крутизна преобразования меньше крутизны усиления.

В радиоприемниках с высокой чувствительностью, например радиолокационных, первой лампой должна быть лампа малошумящая. Такой лампой является триод либо пентод в триодном режиме.

В табл. 6-5 приведены некоторые типы электронных ламп с указанием их шумовых сопротивлений.

Таблица 6-5

Тип триода	Шумовое сопротивление $R_{ш}$, ком	Тип пентода	$R_{ш}$, ом		Крутизна S , ма/в
			Триодное включение	Пентодное включение	
6С3П	200	6Ж2	200	720	—
6С2С	400	6Ж1П	385	3 700	—
6С15П	400	6Ж3	—	2 800	—
6Н3П	700	6Ж9П	—	350	17,5
		6Ж11П	—	250	27
		6Ж21П	—	1 000	20
		6Ж22П	—	500	30
		6Ж5Б	—	1 000	10
		6В1П	—	1,8 Мом (по аноду) и 2,3 Мом (по диоду)	—

В диоде, работающем в режиме насыщения, действующее значение флуктуационного (шумового) тока

$$I_{ш}^2 = 2eI_s\Delta f, \quad (6-24)$$

где e — заряд электрона;
 I_s — ток насыщения диода;
 Δf — полоса частот.

В диоде, работающем в режиме пространственного заряда, когда вокруг катода образуется электронное облачко, шум получается более слабым, чем в режиме насыщения. В режиме насыщения анодный ток диода мало зависит от анодного напряжения. Диод может быть применен в качестве генератора шума для измерения шумовых свойств приемника, причем диод должен работать в режиме насыщения. Шумовой диод 2Д2С имеет торируемый катод, и ток насыщения его получается при небольшом анодном напряжении.

Следует отметить еще одну причину возникновения шумов на низких частотах — это «явление мерцания» в лампах с оксидным катодом, в котором оксидный слой интенсивно эмиттирует электроны только с участков, покрытых металлическим барьером, стронци-

ем, цезием. При работе лампы эти участки «блуждают» по поверхности катода, что и вызывает неравномерность анодного тока.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается основное назначение экранирующей сетки в тетроде или пентоде и как она влияет на изменение параметров лампы?
2. Что понимается под динаotronным эффектом и какими методами он устраняется?
3. В чем заключается изменение конструкции лучевого тетрода по сравнению с обычным?
4. Какими средствами достигается в высокочастотных пентодах переменная крутизна анодно-сеточной характеристики?
5. Как объяснить, что на сдвиг анодно-сеточной характеристики изменение напряжения на экранирующей сетке влияет сильнее чем изменение напряжения на аноде.
6. В чем заключается преимущество комбинированных ламп?
7. Почему в лампе со вторичной электронной эмиссией крутизна получается больше, чем в обычной лампе?
8. Почему пологий участок анодной характеристики пентода не является током насыщения?
9. Как изменяются анодные характеристики и параметры пентода при включении его в триодном режиме?

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЛАМПЫ УКВ И СВЧ

7-1. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

До сих пор, рассматривая характеристики, параметры и условия работы ламп, мы не упоминали о величине частоты переменных напряжений, подводимых к электродам ламп. Такое рассмотрение справедливо лишь для диапазона частот вплоть до нескольких десятков мегагерц. В диапазоне частот свыше 30 Мгц на работу электронных ламп существенно влияет ряд факторов, которые прежде не учитывались. К их числу следует отнести прежде всего влияние времени пролета электронов в междуэлектродном пространстве (инерция электронов), влияние междуэлектродных емкостей, распределенных индуктивностей вводов к электронным лампам и др. Все эти причины ухудшают параметры ламп на высоких частотах, затрудняют использование их в этом

диапазоне, а на более высоких частотах (свыше 1 000 Мгц) применение обычных электронных ламп оказывается практически невозможным. Поэтому для работы в диапазоне ультракоротких—метровых ($\lambda=10-1$ м) и дециметровых ($\lambda=1-0,1$ м) волн разработаны специальные электронные лампы, а в сантиметровом ($\lambda=10-1$ см) и миллиметровом диапазонах используются особые электронные приборы [клистроны, магнетроны, лампы бегущей волны (ЛБВ) и лампы обратной волны (ЛОВ)], которые изучаются на соответствующих курсах (радиолокация, радиоприемные и радиопередающие устройства).

Входное сопротивление лампы. Входным сопротивлением лампы называется сопротивление промежутка сетка — катод:

$$R_{вх} = \frac{U_{см}}{I_{см}}, \quad (7-1)$$

где $U_{см}$ — амплитуда напряжения генератора сигнала;
 $I_{см}$ — амплитуда активной составляющей тока сетки.

Это сопротивление представляет собой на длинных, средних и коротких волнах в режиме А бесконечно большую величину, так как в цепи сетки не будет ни конвекционного тока (тока за счет электронной эмиссии), ни паведенного тока. Емкостное сопротивление $X_{с.к} = 1/\omega C_{с.к}$ на этих частотах также велико. Если колебательный контур в анодной цепи является нагрузочным сопротивлением, то коэффициент усиления каскада при условии, что нагрузочное сопротивление значительно меньше внутреннего сопротивления лампы,

$$K = SR_{к.р}, \quad (7-2)$$

где S — крутизна характеристики, a/θ ;
 $R_{к.р} = L/Cr$ — активное резонансное сопротивление контура.

Влияние индуктивности катодного вывода. При усилении сигналов на дециметровых волнах необходимо учитывать влияние как междуэлектродных емкостей лампы, так и индуктивностей выводов электродов. На рис. 7-1,а изображена лампа с учетом ее реактивных сопротивлений, а на рис. 7-1,б — схема усиления СВЧ на триоде.

Из всех индуктивностей выводов электродов особо важное значение имеет индуктивность вывода катода L_K , которая входит в общую цепь анода и сетки. Она связывает анодную и сеточную цепи. Физически это означает, что часть энергии из сеточной цепи переходит в анодную. Для определения влияния L_K на входное сопротивление лампы построим векторную диаграмму токов и напряжений в цепи сетки (рис. 7-2).

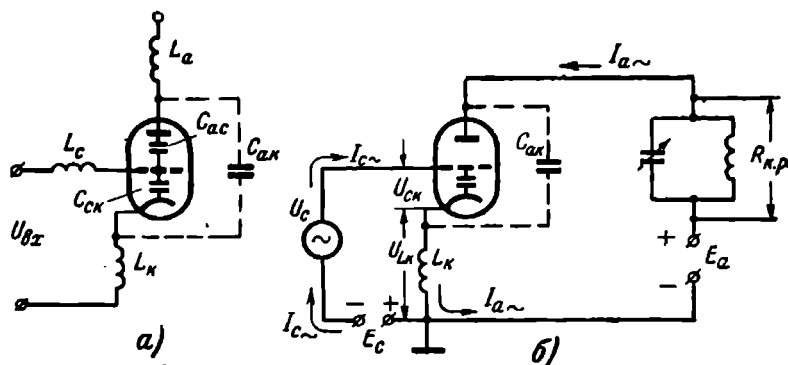


Рис. 7-1. Усиление каскада на СВЧ.

а — триод с учетом реактивных сопротивлений; б — схема усилителя.

Так как активные сопротивления контура $R_{к.п}$ и внутреннее сопротивление лампы R_i значительно больше индуктивного сопротивления L_K , т. е.

$$R_{к.п} + R_i \gg \omega L_K, \quad (7-3)$$

то переменная составляющая анодного тока I_a будет иметь активный характер и совпадет по фазе с переменным сеточным напряжением $U_{c.к}$. На векторной диаграмме векторы I_a и $U_{c.к}$ отложим вверх. Падение напряжения на индуктивности L_K , равное $U_{L_K} = I_a \omega L_K$, будет опережать вектор тока I_a на 90° . Через индуктивность L_K протекает еще сеточный ток $I_{cк}$. Поскольку $\frac{1}{\omega C_{с.ш}} \gg \omega L_K$, то сеточный ток имеет емкостный характер и будет опережать вектор анодного тока на 90° . Напряжение на входе $U_{вх}$ равно геометрической сумме напряжений U_{L_K} и $U_{c.к}$.

Из векторной диаграммы видно, что угол сдвига между напряжением $U_{вх}$ и током $I_{с.к}$ не равен 90° . Следовательно, входное сопротивление имеет активную составляющую, которую можно определить по формуле

$$R_{вх L_k} = \frac{1}{\omega^2 S C_{с.к} L_k}. \quad (7-4)$$

Из этой формулы следует, что входное сопротивление уменьшается с увеличением частоты ω (в квадрате), крутизны лампы S , емкости сетка—катод $C_{с.к}$ и индуктивности катодного вывода L_k .

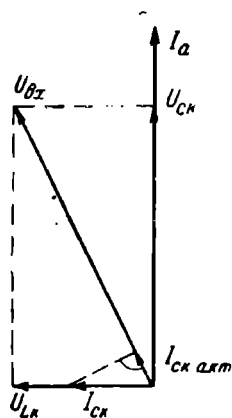


Рис. 7-2. Векторная диаграмма токов и напряжений в цепи сетки.

Влияние на входное сопротивление лампы инерции электронов. Электроны имеют массу и, следовательно, конечную скорость. На СВЧ, когда период колебаний переменного сеточного напряжения становится соизмеримым с временем пролета электронов от катода до анода, появляется отставание анодного тока от напряжения на сетке, а в цепи сетки появляется индукционный (наведенный) ток, увеличивающий расход мощности сигнала в цепи сетки и снижающий входное сопротивление лампы. Допустим, что на сетку поступает положительный полупериод переменного напряжения, тогда от катода к аноду начнет перемещаться большое количество электронов, т. е. уплотненный объемный заряд. Но, когда этот заряд подойдет к сетке, переменное напряжение на ней успевает измениться на отрицательное и от катода к аноду начнет двигаться меньшее количество электронов, т. е. менее плотный объемный заряд. Уплотненный объемный заряд, двигаясь к сетке, будет наводить на ней заряды, которые во внешней цепи создадут ток, совпадающий с положительным полупериодом переменного напряжения. При удалении уплотненного объемного заряда в сторону анода (после прохождения витков сетки) он будет индуцировать в цепи сетки ток противоположного направления, совпадающий по фазе

тока, совпадающий с положительным полупериодом переменного напряжения. При удалении уплотненного объемного заряда в сторону анода (после прохождения витков сетки) он будет индуцировать в цепи сетки ток противоположного направления, совпадающий по фазе

с отрицательным полупериодом переменного напряжения на сетке. Наличие такого тока в цепи сетки, совпадающего по фазе с напряжением сигнала, вызывает расход мощности источника усиливаемого сигнала, что равноценно уменьшению входного сопротивления лампы.

Время пролета $\tau_{пр}$ электронов от катода к аноду определяется главным образом участком сетка — катод, так как между этими электродами имеется малая разность потенциалов, отчего скорость движения электронов от катода к сетке меньше скорости движения электронов от сетки к аноду. Отношение времени пролета электронов $\tau_{пр}$ к периоду колебаний входного сигнала, выраженное в радианах, называется углом пролета:

$$\psi = \frac{\tau_{пр}}{T} 2\pi. \quad (7-5)$$

Входное активное сопротивление, создаваемое инерцией электронов, определяется по формуле

$$R_{вх \tau_{пр}} = \frac{1}{k S \tau_{пр}^2 \omega^2}. \quad (7-6)$$

Из формулы видно, что входное сопротивление, обусловленное временем пролета электронов (инерция электронов), уменьшается пропорционально квадрату частоты, квадрату времени пролета и крутизне характеристики S . Коэффициент k зависит от конструкции лампы.

Общее активное входное сопротивление, вызванное катодной индуктивностью и временем пролета электронов, определяется формулой

$$R_{вх} = \frac{R_{вх L_n} R_{вх \tau_{пр}}}{R_{вх L_k} + R_{вх \tau_{пр}}}. \quad (7-7)$$

Из формул (7-4) и (7-6) следует, что для увеличения $R_{вх}$ следует применять лампы с малой крутизной характеристики. Но крутизна характеристики лампы определяет величину коэффициента усиления каскада, поэтому для увеличения активного входного сопротивления лучше применять лампу с возможно большей крутизной характеристики, но с меньшими междуэлектродными емкостями и меньшими индуктивностями выводов электродов.

7-2. ТИПЫ ЛАМП, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА СВЧ

Первой лампой для СВЧ была изготовлена лампа типа «желудь» ($f=400$ Мгц; $\lambda=75$ см). Она имеет малые размеры электродов для уменьшения междуэлектродных емкостей и малые расстояния между электродами для уменьшения $\tau_{пр}$. Выводы электродов из толстых проволочек (для уменьшения индуктивности) располо-

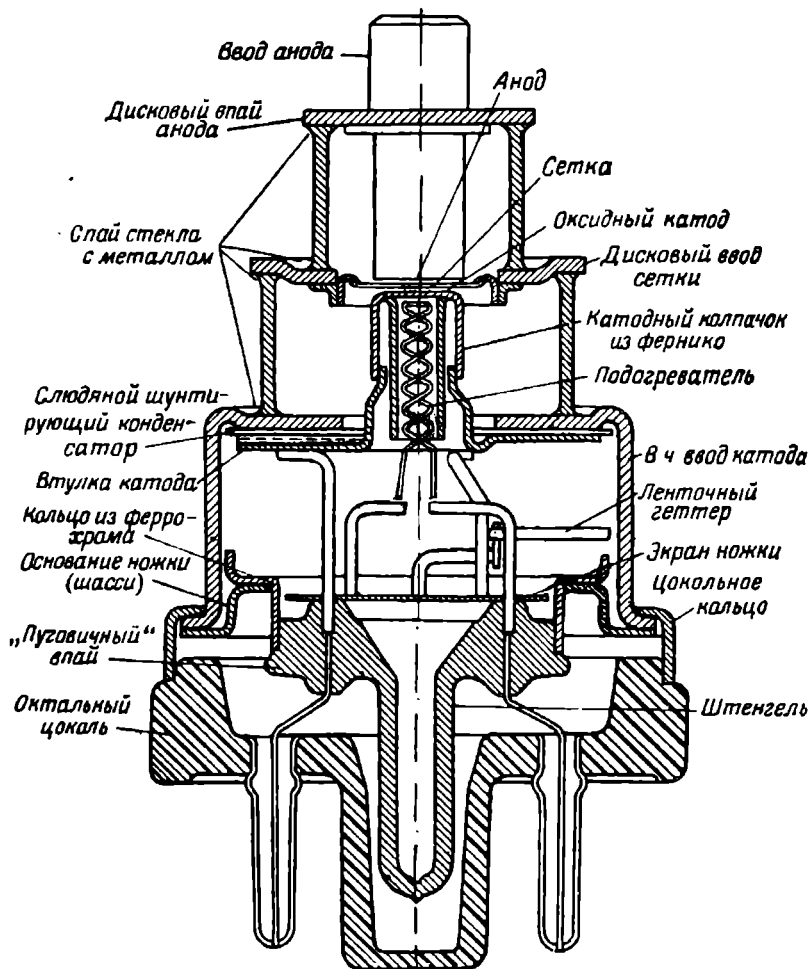


Рис. 7-3. Маячковая лампа (с дисковыми выводами). Увеличено в 3 раза.

жены по окружности, что также уменьшает и между-
электродные емкости.

Современные цельностеклянные лампы миниатюр-
ные (пальчиковой серии) и сверхминиатюрные, а также
стержневые лампы работают на частотах до 200 Мгц
($\lambda=1,5$ м). Для работы на СВЧ при $\lambda=10\div 20$ см
($f=3\,000\div 1\,500$ Мгц) применяются: маячковый триод
6С5Д (название произошло от внешнего сходства

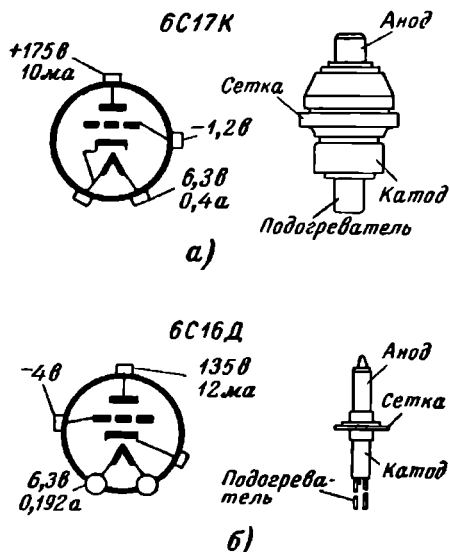


Рис. 7-4. Внешний вид ламп СВЧ.
а — 6С17К титанокерамический триод; б —
триод 6С16Д с дисковыми выводами, ка-
рандашного типа.

с морским маяком) и металлокерамические лампы.
В лампе 6С5Д сетка изготовлена из металлического по-
лотна. Расстояние между электродами составляет
0,1 мм, что уменьшает время пролета электронов. Для
уменьшения индуктивности выводов электродов выво-
ды делаются дисковыми. Колебательным контуром слу-
жит коаксиальная линия. Титанокерамический триод
типа (6С17К) (рис. 7-4,а) предназначен для работы на
частоте 3 000 Мгц ($\lambda=10$ см). Радиокерамика уменьшает
диэлектрические потери. На рис. 7-4,б изображен триод
«карандашного» типа 6С16Д.

В диапазоне СВЧ пентод не применяется из-за большого времени пролета электронов и большого уровня внутриламповых шумов. Пентод иногда находит применение только в триодном включении, когда $\tau_{пр}$ и $F_{ш}$ становятся меньше.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие затруднения встречаются при усилении колебаний сверхвысоких частот на обычных лампах?
2. Что означает «время пролета электронов»?
3. В каких лампах и какими средствами уменьшают время пролета электронов?
4. Какое значение имеет применение в лампах СВЧ радиокемики вместо стекла?
5. Почему при усилении колебаний СВЧ отдают предпочтение лампам типа триод перед лампами типа пентод?

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ГЕНЕРАТОРНЫЕ И МОДУЛЯТОРНЫЕ ЛАМПЫ

8-1. ПРИНЦИП ГЕНЕРИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ

Под генерированием колебаний понимается процесс создания незатухающих колебаний ламповым генератором, состоящим из электронной лампы, колебательного контура и источника питания. Электронная лампа является преобразователем энергии источника постоянного тока в энергию переменного тока высокой частоты. Колебательный контур служит нагрузочным сопротивлением лампы, и в нем выделяется мощность высокой частоты; частота же колебаний определяется параметрами контура: емкостью конденсатора C_k [ф] и индуктивностью катушки L_k [гн]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [гц]}. \quad (8-1)$$

На рис. 8-1 приведена принципиальная схема лампового генератора, работа которого заключается в следующем. При замыкании в анодной цепи ключа K конденсатор контура C_k заряжается до напряжения E_a , после чего он начнет разряжаться через катушку индуктивности L_k и в контуре возникнут затухающие колеба-

ния, так как колебательная энергия в контуре затрачивается на активные сопротивления контура. Для получения незатухающих колебаний необходимо часть энергии из анодной цепи подавать обратно в цепь сетки, что осуществляется катушкой обратной связи $L_{св}$, индуктивно связанной с катушкой контура L_k .

Рассмотренная схема называется генератором с самовозбуждением или автогенератором.

На рис. 8-2 приведена другая схема генератора, называемая генератором с внешним возбуждением или усилителем мощности. На сетку лампы такого генератора подается переменное напряжение (напряжение возбуждения) от какого-либо генератора, например от

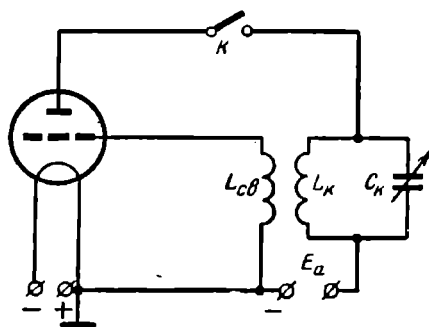


Рис. 8-1. Схема лампового генератора с самовозбуждением.

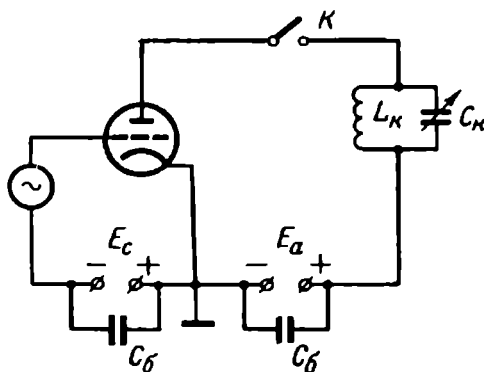


Рис. 8-2. Схема генератора с внешним возбуждением.

автогенератора. Контур в анодной цепи настраивается в резонанс на частоту возбуждителя, причем на резонансной частоте он имеет чисто активное и притом максимальное сопротивление. В контуре будет выделяться

мощность. Мощность, выделяемая в контуре, может быть определена по одной из формул

$$P_{\kappa} = I_{a\sim}^2 R_{\kappa, p}; \quad (8-2)$$

$$P_{\kappa} = I_{\kappa\sim}^2 r, \quad (8-3)$$

где $I_{a\sim}$ — действующее значение переменной составляющей анодного тока;

$I_{\kappa\sim}$ — действующее значение колебательного тока в контуре;

$R_{\kappa, p}$ — резонансное сопротивление контура;

r — сопротивление активных потерь контура.

8-2. ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРНЫХ ЛАМП

Наиболее важными параметрами генераторной лампы являются:

1) коэффициент полезного действия генератора по анодной цепи;

2) мощность, рассеиваемая на аноде P_a .

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) есть отношение колебательной мощности контура к мощности, подводимой к генератору:

$$\eta = \frac{P_{\kappa}}{P_0}, \quad (8-4)$$

где P_0 — мощность, подводимая к генератору от источника анодного питания E_a .

Мощность, подводимая к генератору, определяется произведением постоянной составляющей анодного тока на напряжение источника анодного питания:

$$P_0 = I_{a0} E_a. \quad (8-5)$$

Следовательно, мощность, рассеиваемая на аноде лампы, равна разности мощностей, подводимой к генератору P_0 , и колебательной мощности P_{κ} :

$$P_a = P_0 - P_{\kappa}.$$

Тогда к. п. д. генератора

$$\eta = \frac{P_{\kappa}}{P_0} = \frac{P_0 - P_a}{P_0} \quad (8-6)$$

или

$$\eta = \frac{P_{\kappa}}{P_0} = \frac{P_{\kappa}}{P_{\kappa} + P_a}. \quad (8-7)$$

Генераторные лампы имеют большой коэффициент усиления $\mu = 30-50$, поэтому характеристики генераторных ламп правые и работа происходит с сеточными токами.

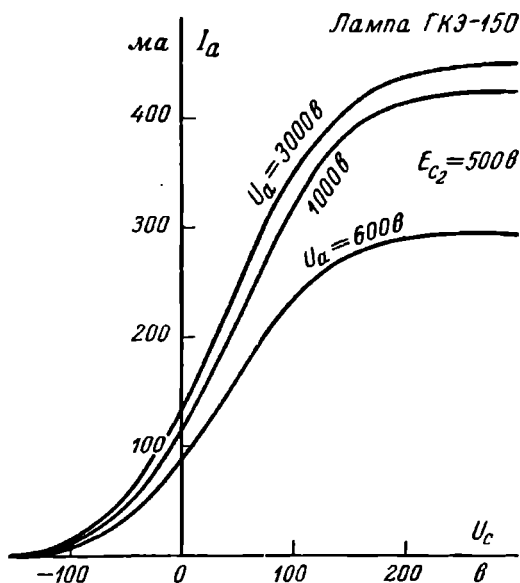


Рис. 8-3. Анодно-сеточные характеристики генераторной лампы тетрод.

На рис. 8-3 приведено семейство анодно-сеточных характеристик генераторной лампы.

Технический расчет лампового генератора производится не по реальным анодно-сеточным характеристикам, а по спрямленным, так называемым идеализированным, характеристикам. На рис. 8-4 приведены спрямленные анодно-сеточные и анодные характеристики. Анодное напряжение, при котором спрямленная анодно-сеточная характеристика проходит через начало координат, называется напряжением приведения и обозначается $E_{до}$. Напряжение запираения спрямленных характеристик называется геометрическим смещением E'_c .

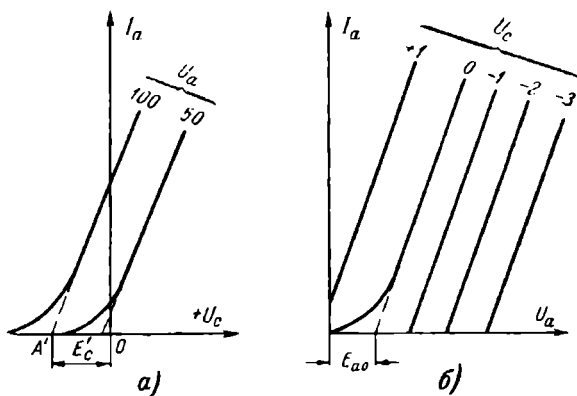


Рис. 8-4. Статистические спрямленные (идеализированные) анодно-сеточные (а) и анодные (б) характеристики.

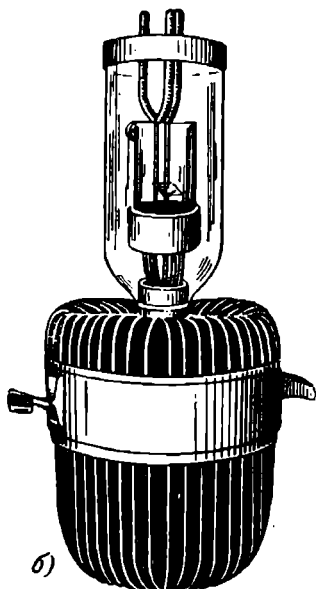
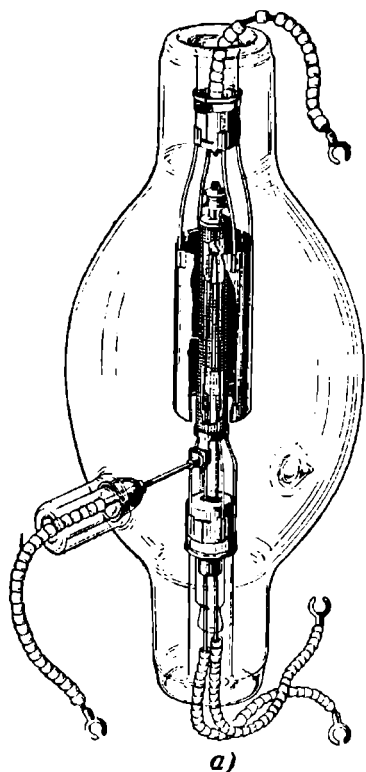
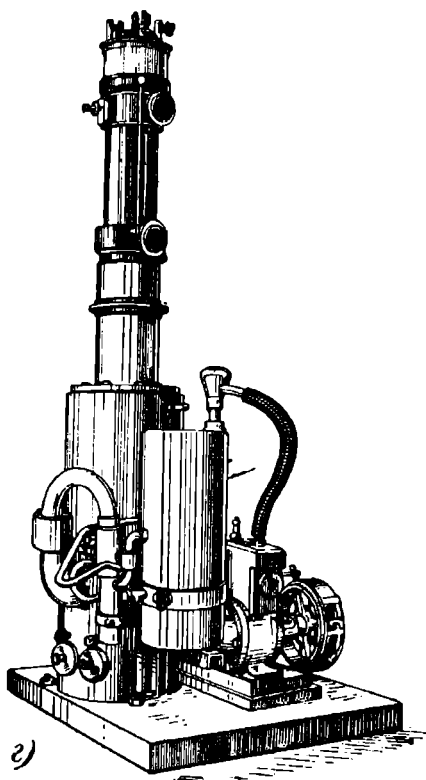
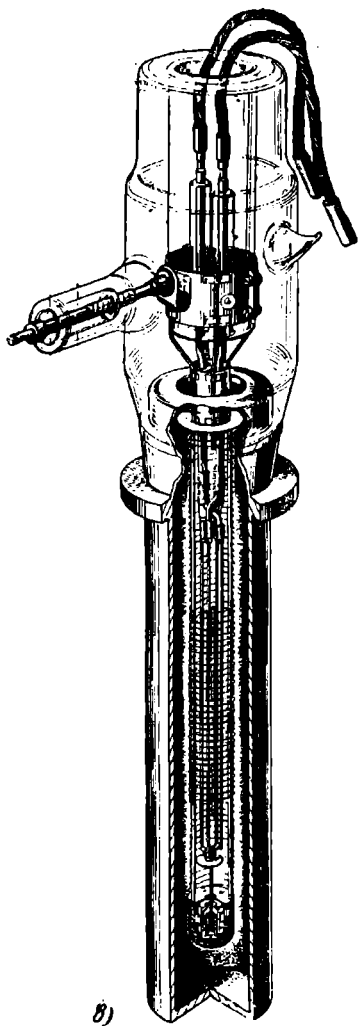


Рис. 8-5. Внешний вид мощ.
а — с лучистым охлаждением;
б — разбор

8-3. КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕНЕРАТОРНЫХ ЛАМП ПО МОЩНОСТИ

Генераторные лампы по мощности распределяются на три класса.

1. Маломощные с колебательной мощностью до 25 вт. По своей конструкции лампы для маломощных генераторов не отличаются от обычных приемно-усилительных ламп.



ных генераторных ламп.

б — с принудительным воздушным охлаждением; в — с водяным охлаждением;
ная лампа.

2. К генераторным лампам средней мощности относятся лампы с мощностью от 25 в и до 1 кВт. Генераторные лампы типа тетрод или типа пентод имеют охлаждение лучеиспусканием (рис. 8-5,а).

3. К мощным генераторным лампам относятся лампы с колебательной мощностью свыше 1 кВт. Мощные лампы (обычно триоды) изготавливаются с принудительным воздушным охлаждением (рис. 8-5,б), мощность лампы до 100 кВт, или водяным охлаждением (рис. 8-5,в) — до 500 кВт. Лампы с мощностью до 1500 кВт изготавливаются разборными, охлаждение анода водяное. Вакуумный насос находится в действии во время работы лампы (рис. 8-5,г). Разборные лампы большой мощности оправдывают себя, так как позволяют производить замену деталей (чаще всего катода). Для получения большой мощности генератора на анод подается высокое напряжение 10—25 кВ.

8-4. РЕЖИМ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРНЫХ ЛАМП

Непрерывный режим. В этом режиме ток через лампу протекает во все время ее работы и она непрерывно генерирует электрические колебания.

Импульсный режим. В этом режиме лампа периодически генерирует электрические колебания в течение очень коротких промежутков времени (обычно 1 мксек).

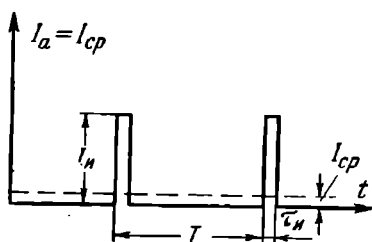


Рис. 8-6. График постоянной составляющей анодного тока генераторной лампы в импульсном режиме.

Длительное время между рабочими промежутками (импульсами) лампа остается запертой. В это время анодный ток лампы равен нулю.

На рис. 8-6 приведен график постоянной составляющей анодного тока генераторной лампы, работающей в импульсном режиме.

Импульсный режим лампы характеризуется: 1) длительностью импульса τ_n ; 2) периодом повторения импульса T или частотой повторения (частота следова-

ния) импульса $F=1/T$ и 3) скважностью $Q=T/\tau_{\text{н}}$ или коэффициентом заполнения $s=\tau_{\text{н}}/T=1/Q$.

Различают два вида колебательной мощности лампы при работе в импульсном режиме — импульсную и среднюю, которые связаны соотношениями:

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{н}}}{Q}; \quad (8-8)$$

$$P_{\text{н}} = QP_{\text{ср}}. \quad (8-9)$$

Средняя мощность, рассеиваемая на аноде, меньше мощности в импульсе:

$$P_{\text{а.ср}} = \frac{P_{\text{а.н}}}{Q}. \quad (8-10)$$

Наибольшая величина полезной колебательной мощности, отдаваемой лампой,

$$P_{\text{к}} = 0,2 I_{\text{с}} E_{\text{а}} \text{ [квт]}, \quad (8-11)$$

где $I_{\text{с}}$ — ток насыщения лампы с вольфрамовым катодом или максимально допустимый анодный ток с активированным катодом;

$E_{\text{а}}$ — напряжение источника анодного питания.

Увеличение колебательной мощности генераторной лампы ограничивается мощностью, рассеиваемой на аноде лампы в виде тепла.

От лампы, работающей в импульсном режиме, можно получить большую полезную мощность в импульсе. Объясняется это тем, что потери на разогрев анода происходят за тот промежуток времени, пока через лампу протекает анодный ток, в остальное же время анод охлаждается. Для получения возможно большей мощности в импульсе на анод подается напряжение до 60 кв.

Полезная мощность лампы, определяемая по формуле (8-2), называется средней колебательной мощностью. Мощность в импульсе будет в Q раз больше средней мощности:

$$P_{\text{н}} = P_{\text{ср}} Q. \quad (8-12)$$

Если допустить, что частота следования импульса за секунду $F=1\,000$, а время длительности импульса $\tau=1$ мксек, то скважность

$$Q = \frac{1}{\frac{F}{\tau}} = \frac{T}{\tau} = \frac{10^{-3}}{10^{-6}} = 1\,000.$$

Следовательно, при средней мощности лампы $P_{\text{ср}}=2$ вт мощность в импульсе станет равной $P_{\text{и}}=2$ квт. Большая мощность в импульсе может быть получена, если катод обеспечит большой ток эмиссии за короткий промежуток времени. Таким катодом является оксидный катод и другие высокоэффективные катоды.

8-5. РАБОТА ГЕНЕРАТОРНЫХ ЛАМП НА УКВ И СВЧ

На частотах до 30 Мгц ($\lambda > 10$ м) на работу генератора влияют только междуэлектродные емкости лампы так как они входят в емкость контура. Через выводы электродов протекает колебательный ток, поэтому в самой ламповой конструкции расходуется значительная часть высокочастотной энергии. С учетом поверхностного эффекта выводы электродов должны быть достаточного сечения. На частотах свыше 30 Мгц ($\lambda < 10$ м) на работе лампы сказывается и индуктивность выводов, особенно катодного, уменьшающая входное сопротивление лампы.

На дециметровых волнах (СВЧ) оказывает вредное действие время пролета электронов, влияющее на входное сопротивление и на фазовый сдвиг между напряжением возбуждения и переменной составляющей анодного тока. В результате уменьшается к. п. д. лампы, так как уменьшается колебательная мощность и увеличивается мощность, рассеиваемая на аноде. В паспортных данных для ламп, работающих в диапазоне УКВ и СВЧ, указываются две частоты, на которых рекомендуется работа данной лампы. Одна частота номинальная, а другая — повышенная. Так, например, для генераторного лучевого пентода ГУ-50 номинальная частота $f=25$ Мгц ($\lambda=12$ м) и анодное напряжение $E_a=1\,000$ в. Колебательная мощность в контуре $P_{\text{к}}=85$ вт, к. п. д.=71%. На повышенной частоте $f=120$ Мгц ($\lambda=2,5$ м) анодное напряжение

понижается до 600 в, колебательная мощность понижается до 40 вт, а к. п. д. достигает 51%. Основные данные некоторых типов ламп приведены в табл. 8-1.

Таблица 8-1

Тип лампы	Материал катода	$U_n, в$	$I_n, а$	$U_a, в$	P_k	$f_{max}, Мгц$	$S, ма/в$
ГУ-50, лучевой пентод	Оксидный	12,6	0,765	1 000	60 вт	120	4
ГУ-36Б, тетрод	Карбидированный	6,3	200	10 000	10 квт	250	50
ГУ-5А, триод	Карбидированный	12,6	23	5 000	3,5 квт	110	15
ГК-1А, триод	Вольфрамовый	31,5	580	10 000	250 квт	25	90

Примечание. Буква А означает принудительное водяное охлаждение и буква Б — принудительное воздушное охлаждение.

8-6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ГЕНЕРАТОРНЫЕ ЛАМПЫ ДЛЯ ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Таковыми лампами являются металлокерамические лампы, которые по своей конструкции похожи на при-мно-усилительные маячковые лампы. В металлокерами-

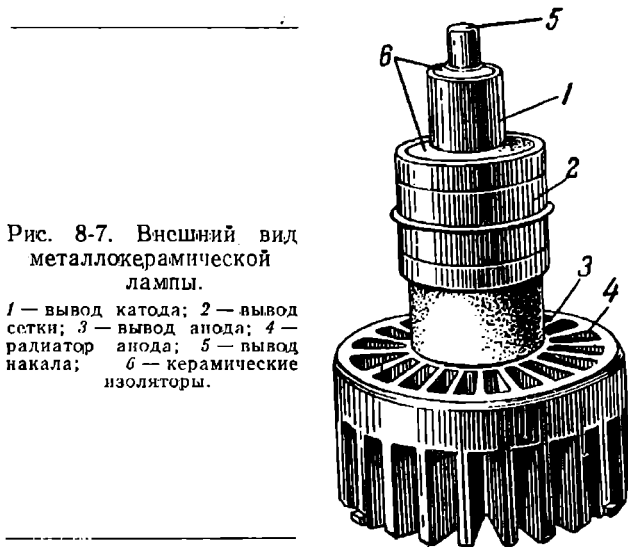


Рис. 8-7. Внешний вид металлокерамической лампы.

1 — вывод катода; 2 — вывод сетки; 3 — вывод анода; 4 — радиатор анода; 5 — вывод накала; 6 — керамические изоляторы.

ческих лампах расстояние между электродами мало, что уменьшает время пролета электронов. Выводы от электродов цилиндрические. Большая поверхность выводов электродов уменьшает их индуктивность. В отличие от ламп маячкового типа в них стекло заменено радио-керамикой, которая выдерживает большую температуру нагрева баллона и уменьшает диэлектрические потери в диэлектрике. Анод имеет радиатор для принудительного воздушного охлаждения. На рис. 8-7 показан внешний вид металлокерамической лампы. Маркировка некоторых типов металлокерамических ламп и их основные данные приведены в табл. 8-2.

Таблица 8-2

Тип лампы	λ , см	Наибольшее напряжение анода, кВ		Выходная мощность	
		Режим непрерывного генерирования	Режим импульсный	Режим непрерывного генерирования, Вт	Импульсный режим, кВт
ГИ-6Б	18	2,5	9	130	—
ГИ-7Б	11	2,5	9	120	—
ГИ-12Б	9	0,8	2	3	—
ГИ-70Б	9	2,5	9	120	11

8-7. МОДУЛЯТОРНЫЕ ЛАМПЫ

Модуляторные лампы — это мощные усилительные лампы низкой частоты с левыми характеристиками и, следовательно, с малым коэффициентом усиления порядка $\mu = 6 \div 8$. Предназначены модуляторные лампы для модуляции, т. е. для изменения амплитуды высокочастотных колебаний радиовещательных станций. Модуляторные лампы применяются еще на трансляционных узлах для усиления колебаний низкой частоты. По мощности они могут быть как маломощными, так и мощными с принудительным воздушным и водяным охлаждением.

Импульсные модуляторные лампы предназначены для управления работой различных импульсных генераторов. Модуляторная лампа в исходном состоянии заперта отрицательным напряжением, поданным на управляющую сетку, и отпирается положительным импульсом.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие требования предъявляются к генераторным лампам?
2. Какой вид имеют анодно-сеточные характеристики генераторных ламп?
3. Чем отличается импульсный режим генератора от обычного непрерывного режима?
4. Как связывается мощность импульсного генератора со скважностью?
5. Чем объясняется, что мощность лампы в импульсном режиме может значительно превышать мощность ее при непрерывном генерировании?

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

9-1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ В ТЕХНИКЕ И НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Полупроводниками называются вещества, которые по электропроводности находятся между проводниками и изоляторами.

Удельное сопротивление проводников составляет от 10^{-4} до 10^{-5} *ом·см*, изоляторов от 10^{10} до 10^{15} *ом·см*, а полупроводников от 10^{-5} до 10^{10} *ом·см*. Полупроводники представляют собой такие химические элементы, как, например, углерод, кремний, германий (4-я группа периодической системы Менделеева), фосфор, мышьяк, сурьма (5-я группа), селен (6-я группа), а также различные окислы и химические соединения, например, с серой (сульфиды), с селеном (селениды) и др. Они, как правило, имеют кристаллическое строение. Но полупроводниковыми свойствами обладают и некоторые соединения двух или трех металлов различных групп и синтетические вещества — полимеры. В электронных полупроводниковых приборах, выпускаемых промышленностью, применяются преимущественно полупроводники: германий и кремний.

Сопротивление проводников и полупроводников изменяется как от окружающей температуры, так и от примесей в них, но влияние этих факторов различно. При увеличении температуры сопротивление проводников увеличивается, а полупроводников — уменьшается.

Примеси в проводнике увеличивают сопротивление, а в полупроводнике — уменьшают. Чем больше концентрация примесей, тем меньше сопротивление. Даже небольшая примесь, порядка 0,0001%, значительно, в сотни раз, уменьшает сопротивление беспримесного полупроводника (монокристалла). Многие полупроводники при освещении их или под действием рентгеновского излучения уменьшают сопротивление.

Первым полупроводниковым прибором, применяемым в радиотехнике еще в 1900 г. А. С. Поповым, был кристаллический детектор, состоящий из пластинки графита и острой металлической иглы. В дальнейшем применялись естественные кристаллы цинкита, галспита, халькопирита и др. Неустойчивый контакт детектора затруднял пользование им и с изобретением двухэлектродной электронной лампы последняя вытеснила его. Кристаллический детектор был забыт.

Радиолокация, работающая на дециметровых и сантиметровых волнах, снова обратилась к кристаллическому детектору, так как большая емкость вакуумного детектора ($C=2\div 4\text{ нф}$) шунтировала сигнал и уменьшала его действие, а емкость сверхвысокочастотного кристаллического детектора не превышает 0,02 нф. Такие детекторы в радиолокации применяются и в настоящее время.

В 1922 г. Олег Лосев, сотрудник Нижегородской лаборатории, разработал схему радиоприемника «кристадин», в которой естественный кристалл цинкит генерировал колебания высокой частоты. Но работа кристадина этого приемника была не надежна опять же из-за неустойчивости контакта детектора. Усиление сигнала производилось с большим эффектом вакуумным триодом, и кристадином перестали пользоваться. Физический процесс генерации с помощью кристалла физики в то время не могли объяснить.

В 1948 г. в Америке был изобретен американскими физиками Бардиным, Браттейном и Шокли полупроводниковый триод, получивший название транзистор, за что им была присуждена Нобелевская премия. За последние годы полупроводниковые приборы настолько были усовершенствованы, что нашли широкое применение в технике.

За границей и нашей промышленностью выпуска-

ются радиоприемники и телевизоры, в которых вакуумные приборы, кроме телевизионных трубок, заменяются полупроводниковыми. Полупроводниковые приборы успешно конкурируют с вакуумными и имеют перед последними ряд преимуществ. Прежде всего для них не требуется вакуума, поэтому они прочны. Срок службы их исчисляется десятками тысяч часов и, очевидно, будет превышать срок службы других деталей и всей аппаратуры. Полупроводниковые приборы не имеют накаленного катода, и поэтому они экономичнее вакуумных. Полупроводниковые приборы работают при небольших напряжениях источника питания, поэтому применяемые радиодетали могут быть миниатюрны, а так как и сами полупроводниковые приборы миниатюрны, то аппаратура с применением их малогабаритна.

Для получения еще меньших размеров радиоаппаратуры, повышения надежности ее работы и автоматизации сборки применяются «микромодули», представляющие собой тонкие изоляционные пластинки небольшого размера, на которых смонтированы микроэлементы: диоды, транзисторы (рис. 9-1,а), сопротивления, конденсаторы (рис. 9-1,б). Затем микромодули соединяются в виде столбика-этажерки (рис. 9-1,в), закрепляются на общем основании и образуют микросхему (рис. 9-1,г).

Новым направлением в полупроводниковой технике является получение «твердых схем», где все элементы не только миниатюрны, но изготавливаются из полупроводника в самом кусочке кристалла небольшого размера, примерно $4,5 \times 2 \times 0,3$ мм. Твердые схемы в изготовлении значительно сложнее, чем микромодульные, но зато объем радиоустройства получается во много раз меньше.

Несмотря на перечисленные достоинства, полупроводниковые приборы, имеют и серьезные недостатки. Самым главным из них является зависимость параметров от окружающей температуры, что влияет на усиление и выходную мощность усилителя. При повышенной температуре ($+150^\circ\text{C}$) работа их совершенно прекращается. Кроме того, полупроводниковые приборы имеют очень большой разброс параметров, что затрудняет замену одного прибора аналогичным без изменения его режима.

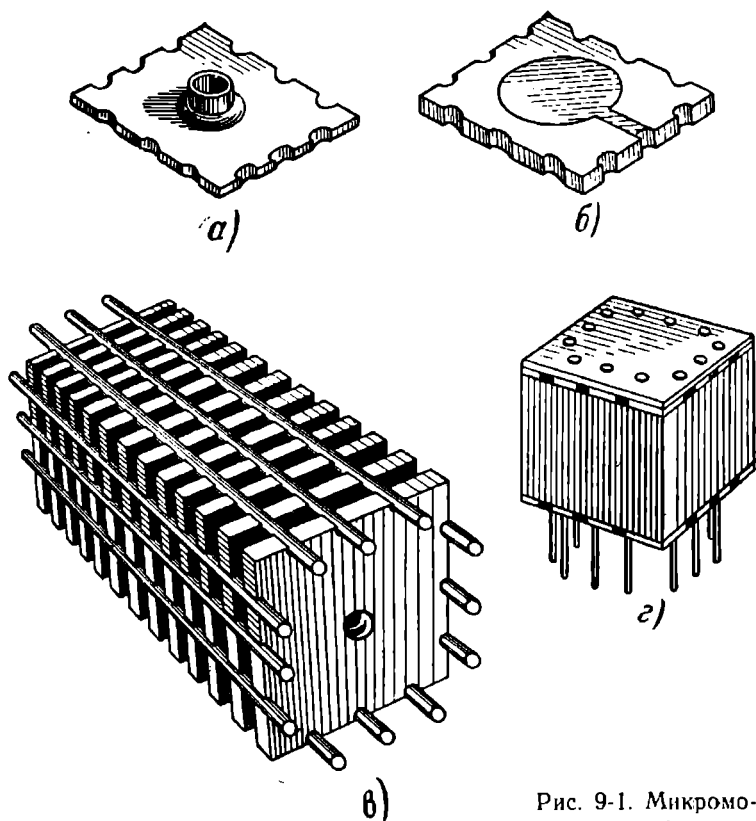


Рис. 9-1. Микро-
дули.

9-2. КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Германий и кремний, применяемые главным образом для изготовления полупроводниковых приборов, имеют кристаллическое строение. Атомы вещества, расположенные в определенном порядке, как правило, по вершинам геометрических фигур (например, тетраэдра) образуют пространственную кристаллическую решетку. Для более наглядного представления о физических явлениях в кристаллах принято вместо пространственной решетки пользоваться плоскостным ее изображением (рис. 9-2). Атомы кристалла изображаются окружностями, расположенными в узлах решетки. Цифра в окружности означает валентность атома. Валентные электроны изображаются линиями.

Валентные электроны каждого атома образуют электронные связи с четырьмя соседними атомами. Между двумя атомами осуществляется парная электронная связь (по одному электрону от каждого атома), которая называется ковалентной. Суть ковалентной связи сводится к тому, что электроны вращаются не вокруг

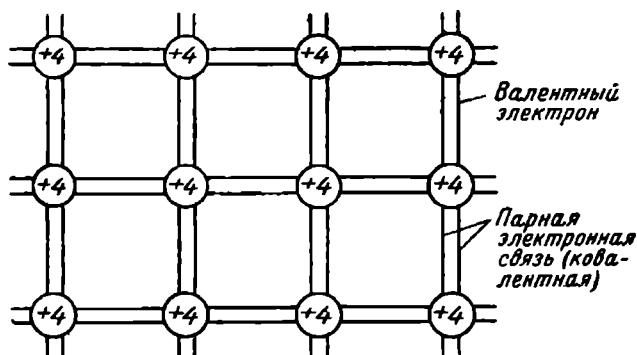


Рис. 9-2. Кристаллическая решетка беспримесного четырехвалентного кристалла германия или кремния.

одного атома, а по электронным оболочкам, являющимся общими для нескольких атомов. При наличии всех электронных связей между атомами, т. е. при заполненных связях, кристалл становится диэлектриком и атом будет нейтрален, так как его положительный заряд уравновешивается электронами. Это происходит только при температуре абсолютного нуля 0°K .

9-3. ПРОВОДИМОСТЬ БЕСПРИМЕСНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА

Для того чтобы монокристалл стал электропроводным, необходимы носители тока, которые образуются при нарушении электронной связи путем отрыва валентного электрона, при сообщении ему добавочной энергии: тепловой, световой, электрического поля и др. Величина энергии зависит от материала полупроводника: для германия она равна $0,72\text{ эв}$, а для кремния — $1,1\text{ эв}$. Уже при комнатной температуре узлы кристаллической решетки приходят в колебательное движение и получающаяся при этом тепловая энергия оказывается достаточной для того, чтобы освободить от валентных связей

некоторое количество электронов (количество их увеличивается с возрастанием температуры), которые при наличии электрического поля в кристалле перемещаются (дрейфуют) между атомами в направлении против силовых линий поля, создавая ток в кристалле (рис. 9-3). Такие электроны условимся называть электронами проводимости в отличие от свободных электронов, которые перемещаются в вакууме или разреженном газе. Нарушение валентных связей приводит к одновременно-

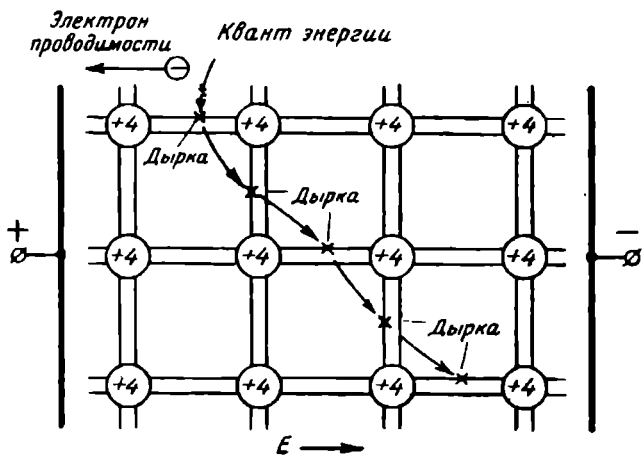


Рис. 9-3. Образование электрона проводимости и дырки в монокристалле германия.

му образованию электрона и пустых мест—дырок вблизи тех атомов, от которых оторвались электроны. Атом же приобретает положительный заряд, равный заряду электрона. Такое состояние атома неустойчиво, и на место дырки, для ее заполнения, может попасть валентный электрон соседнего атома. Понятно, что связь в этом месте окажется разрушенной и на месте ушедшего электрона образуется снова дырка и т. д. Электроны, идущие на заполнение дырок, назовем электронами замещения. Они направляются против силовых линий поля, а движение дырок будет происходить в обратном направлении. Таким образом, дырка ведет себя как положительно заряженная подвижная частица, заряд которой по величине равен заряду электрона. Следует отметить, что электроны замещения

двигаются от атома к атому, тогда как электроны проводимости совершают путь до положительного электрода, создающего электрическое поле.

Количество электронов и дырок в беспримесном полупроводнике одинаково, так как образуется одновременно пара заряженных частиц: электрон проводимости и дырка. Такая проводимость полупроводника, возникающая вследствие нарушения валентных связей, называется собственной проводимостью.

Ток в беспримесном полупроводнике состоит из электронов проводимости и дырок, направляющихся навстречу друг другу:

$$I_i = I_{zi} + I_{di}, \quad (9-1)$$

где I_i — ток собственной проводимости;

I_{zi} — электронная часть тока;

I_{di} — дырочная часть тока.

Наличие в полупроводнике двух видов носителей тока — электронов проводимости и дырок — является самой главной особенностью полупроводниковой электроники в отличие от вакуумной, где носителями тока являются только свободные электроны.

Ток собственной проводимости очень мал (микроамперы). Для получения большей величины тока к чистому полупроводнику добавляются примеси. В качестве примесей применяют пятивалентные и трехвалентные элементы, атомы которых замещают в кристаллической решетке атомы монокристалла и изменяют его свойства.

9.4. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПРИМЕСНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Электронная проводимость (проводимость типа n). Если примесью служат пятивалентные элементы (сурьма, фосфор, мышьяк), то четыре электрона примесного атома входят в парные электронные связи с четырьмя четырехвалентными атомами германия или кремния, а пятый электрон будет избыточным. Он слабо связан со своим атомом, и малейшее тепловое возбуждение оказывается достаточным для того, чтобы электрон отделился от атома и стал электроном проводимости. Избыточные электроны создают в полупроводнике проводимость преимущественно элек-

тронную или проводимость типа n (от латинского слова «negative», что значит отрицательный). Такой полупроводник называется электронным, а примесь получила название донорной (отдающей электроны). Атом донора, после того как он отдаст избыточный электрон, становится положительным ионом. Образование электронного полупроводника приведено на рис. 9-4,а (положительный ион донора заштрихован).

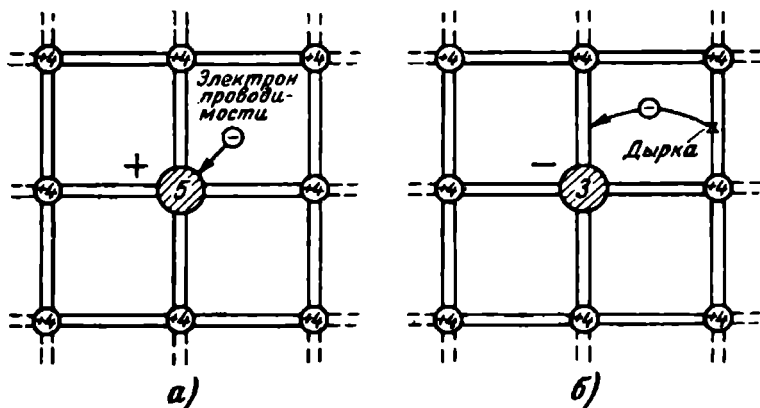


Рис. 9-4. Образование полупроводников электронной проводимости (а) и дырочной (б).

Дырочная проводимость (типа p). При добавлении к монокристаллу германия трехвалентного элемента (индий, галлий, алюминий, бор) последний своими тремя валентными электронами войдет в парные электронные связи с тремя соседними атомами германия. Для связи с четвертым атомом недостает одного электрона, который может быть получен путем разрыва валентной связи у атома основного полупроводника, например германия, с образованием там дырки. Примесный атом после заполнения парных электронных связей становится отрицательным ионом (рис. 9-4,б).

Примесь трехвалентных атомов называется акцепторной («принимающей» электроны). Проводимость полупроводника, обусловленная акцепторами, называется дырочной проводимостью или проводимостью типа p (от латинского слова «positive», что значит положительный).

9-5. ДИАГРАММЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗОН ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Рассмотрим типы проводимости полупроводников с энергетической точки зрения, для чего воспользуемся энергетическими зонами.

Электрон отдельного атома характеризуется разрешенными уровнями энергии, на которых он может находиться. В кристалле уровни энергии электронов объ-

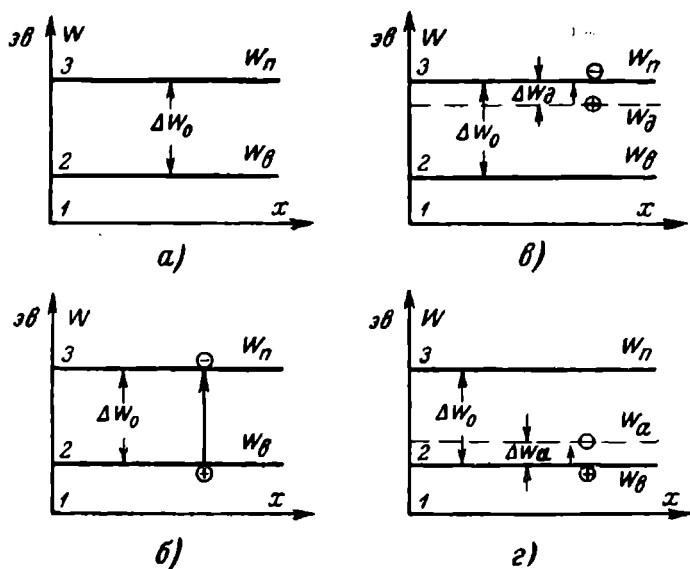


Рис. 9-5. Энергетические зоны полупроводников.

единяются в энергетические зоны. По оси ординат диаграммы (рис. 5-5) откладывается энергия электронов, выражаемая в электронвольтах, а по оси абсцисс откладывается расстояние от выбранного в какой-либо точке тела начала координат. Энергетических зон имеется три: зона валентных связей или валентная зона 1, зона проводимости 3 и запрещенная зона 2 (рис. 9-5,а).

Зона валентных связей соответствует электронам с более низкими энергетическими уровнями, так как валентные электроны находятся вблизи от атомов и связаны с ними ковалентными связями.

Зона проводимости включает в себя энергетические уровни электронов, освободившихся от атомов, и поэтому энергетические уровни этой зоны выше энергетических уровней валентной зоны.

Запрещенная зона не имеет энергетических уровней энергии. Она отделяет валентную зону от зоны проводимости. Запрещенная зона характеризуется так называемой шириной запрещенной зоны, которая определяется как разность энергетических уровней: нижнего уровня зоны проводимости $W_{\text{п}}$ и верхнего уровня валентной зоны $W_{\text{в}}$, т. е. $\Delta W_0 = W_{\text{п}} - W_{\text{в}}$. Величина ΔW_0 является важнейшей характеристикой полупроводника и связана с температурой его плавления. Например, для кремния $\Delta W_0 = 1,1$ эв, а температура плавления кремния равна 1440°C . Германий имеет температуру плавления 940°C и соответственно $\Delta W_0 = 0,7$ эв.

Необходимо отметить, что понятие об энергетических зонах чисто условное и что в самом полупроводнике не имеется каких-либо зон, ограниченных геометрическими размерами. Энергетические уровни и энергетические зоны явились удобной формой для определения электрических свойств полупроводника.

Проводимость беспримесного полупроводника. На рис. 9-5,б показана диаграмма энергетических уровней полупроводника собственной проводимости. Для того чтобы монокристалл стал токопроводящим, необходимо повысить энергетический уровень валентного электрона, т. е. перевести его в зону проводимости, для чего электрону необходимо сообщить добавочную энергию (энергию диссоциации) не менее ΔW_0 . На рисунке переход электрона из валентной зоны в зону проводимости показан стрелкой.

После перехода электрона из валентной зоны в кристаллической решетке полупроводника остается незаполненный энергетический уровень, т. е. образуется дырка. Дырка представляет собой подвижный положительный заряд, который под влиянием электрического поля перемещается в валентной зоне по направлению силовых линий поля, т. е. навстречу электрону в зоне проводимости. Таким образом, ток, протекающий в беспримесном полупроводнике, состоит из электронов, перемещающихся в зоне проводимости, и дырок, перемещающихся в валентной зоне.

Концентрация составляющих носителей тока в беспримесном полупроводнике одинакова: количество электронов проводимости всегда равно количеству дырок ($n_i = p_i$), так как одновременно образуется пара заряженных частиц. Величина тока собственной проводимости полупроводника зависит от ширины запрещенной зоны ΔW_0 и от температуры полупроводника. С увеличением ΔW_0 ток уменьшается, а удельное сопротивление увеличивается. Удельное сопротивление кремния в тысячу раз больше, чем германия.

«Поставщиком» электронов в зону проводимости является валентная зона.

Проводимость полупроводника с донорной примесью (проводимость типа n). На рис. 9-5,а изображена энергетическая диаграмма такого полупроводника. Энергетические уровни атомов доноров W_d расположены в запрещенной зоне вблизи зоны проводимости. Электроны донорной примеси, для того чтобы попасть в зону проводимости, должны получить дополнительно энергию ΔW_d , которая называется энергией активации и равна разности между уровнем энергии электронов нижнего участка зоны проводимости и уровнем энергии донорной примеси, т. е. $\Delta W_d = W_n - W_d$. Поскольку энергия активации значительно меньше энергии диссоциации ($\Delta W_d = 0,01 - 0,05 \text{ эВ}$), то поставщиком электронов в зону проводимости будут избыточные электроны донорной примеси, а проводимость полупроводника будет преимущественно электронной (типа n). Лишь небольшая часть валентных электронов преодолет ширину запрещенной зоны ΔW_0 и из валентной зоны перейдет в зону проводимости, создав одновременно небольшое количество дырок.

Атомы доноров после ухода от них электронов в зону проводимости превращаются в положительные неподвижные ионы.

Проводимость полупроводника с акцепторной примесью (проводимость типа p). На рис. 9-5,б изображена энергетическая диаграмма дырочного полупроводника. Энергетические уровни акцепторной примеси W_a расположены в запрещенной зоне ближе к зоне валентных связей. Поскольку энергия активации акцепторной примеси $\Delta W_a = W_a - W_v$ значительно меньше ширины запрещенной зоны, то «по-

ставщиком» электронов на уровне акцепторной примеси будет валентная зона. Атом акцепторной примеси, приняв электрон, превращается в отрицательный ион, а подвижными носителями тока будут дырки, перемещающиеся в валентной зоне. Проводимость полупроводника будет преимущественно дырочной и лишь в малой степени электронной за счет некоторых электронов валентной зоны, преодолевших ширину запрещенной зоны и перешедших на энергетические уровни зоны проводимости.

9-6. ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД (*P-n* ПЕРЕХОД)

Слой, разделяющий электронную и дырочную области полупроводника, называется электронно-дырочным переходом. Условно электронно-дырочный переход обозначается *p-n*, независимо от последовательности расположения областей проводимости полупроводника, т. е. *n-p* или *p-n*. Слой *p-n* перехода очень тонкий, порядка нескольких микрои, и обладает той особенностью, что его сопротивление не подчиняется закону Ома, т. е. сопротивление слоя перехода изменяется как от величины, так и от знака приложенного к нему напряжения.

Различают три состояния *p-n* перехода: равновесное, пропускное и запирающее.

Равновесное состояние *p-n* перехода наблюдается тогда, когда к переходу не приложено внешнего напряжения. Рассмотрим физический процесс образования *p-n* перехода. Допустим, что имеются два образца полупроводника германия различного типа проводимости: типа *n* и типа *p* (рис. 9-6,а). Оба образца имеют одинаковую концентрацию примесей и электрически нейтральны.

Как известно, атомы могут быть электрически нейтральны только тогда, когда заряд неподвижного иона уравновешивается подвижным зарядом противоположного знака. Можно считать, что нейтральные атомы донорных примесей в германии состоят из электронов проводимости и положительных ионов доноров с зарядом (+1), если заряд электрона считать (-1). Нейтральные атомы акцепторных примесей в германии имеют положительно заряженные дырки (+1) и отрицатель-

ионы акцепторов с зарядом $(-)$. После того как нейтральные полупроводники будут соединены друг другом сошлифованными поверхностями и образуется бы одно твердое тело, электрическая нейтральность их исчезнет (рис. 9-6,б). По обе стороны контакта,

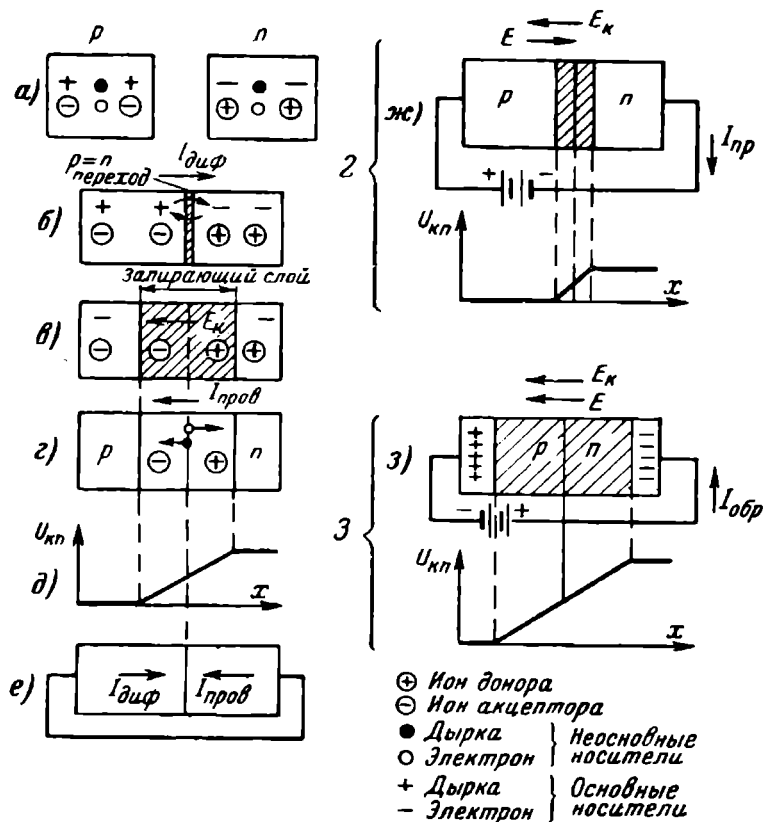


Рис. 9-6. Физический процесс образования $p-n$ перехода.
1 — равновесное состояние; 2 — пропускное; 3 — запирающее.

в полупроводника, образуется слой $p-n$ перехода на котором «минус» со стороны p -области и со знаком «плюс» со стороны n -области.

В каждом типе полупроводника всегда имеются два носителя тока: основные и неосновные. Основные называются те носители, которые составляют

большинство и которые определяют тип проводимости полупроводника. Например, в области типа n основными носителями будут электроны проводимости, а неосновными — дырки, а в области типа p основными носителями будут дырки, а неосновными — электроны. Концентрация неосновных носителей очень мала — примерно в 1000 раз меньше концентрации основных носителей. Появление в p - n переходе различных знаков заряда объясняется явлением диффузии.

Процесс диффузии основных носителей объясняется следующим образом. Дырки из p -области, перейдя в n -область, где они являются уже неосновными носителями, не могут существовать там длительное время. Примерно через $\tau = 10^{-9}$ сек (τ — время жизни неосновных носителей) дырки рекомбинируют с электронами и подвижные заряды электрон — дырка уничтожаются, а атомы акцепторов в приконтактном слое становятся отрицательными ионами, атомы же доноров — положительными ионами. Точно такое же явление происходит и при диффузии электронов из области n в область p . Таким образом, диффузия основных носителей в полупроводнике создаст по обе стороны границы p - n перехода разноименные заряды: плюс со стороны n -области и минус — со стороны p -области. Заряды, образованные ионизированными примесными атомами, неподвижны, так как они находятся в узлах кристаллической решетки. Сам же электронно-дырочный переход будет обеднен носителями тока, сопротивление его по сравнению с сопротивлением остальной части полупроводника станет повышенным, поэтому сопротивление перехода называют запирающим сопротивлением, а сам слой — запорным. Ширина запирающего слоя перехода зависит от концентрации примесей или, что то же самое, от удельного сопротивления вещества полупроводника. С уменьшением концентрации ширина слоя увеличивается, так как носители тока проникают глубже в полупроводник для рекомбинации. Наименьшая ширина слоя p - n перехода будет при наибольшей концентрации основных носителей.

Полупроводник за пределами p - n перехода является нейтральным и, следовательно, токопроводящим, так как в нем находятся основные носители тока (рис. 9-6, в). Ионизированные заряды примесных атомов акцепторов

и доноров образуют в p - n переходе внутреннее, или контактное, электрическое поле, силовые линии которого начинаются от n -области и кончаются у p -области, т. е. направляются от положительного заряда к отрицательному (рис. 9-6,г). Электрическое контактное поле будет тормозящим для основных носителей, и поэтому его иначе называют потенциальным барьером. Потенциальный барьер равен разности работ выхода полупроводников, т. е. равен контактной разности потенциалов. Диаграмма распределения потенциального барьера в p - n переходе приведена на рис. 9-6,д.

Для неосновных носителей, возникающих в запиорном слое, контактное поле будет ускоряющим. Ток, создаваемый дрейфом неосновных носителей в контактном поле, называется током проводимости или током утечки. Его направление противоположно току диффузии, и когда оба эти тока равны друг другу, в замкнутой цепи результирующий ток будет равен нулю. Такое состояние p - n перехода и называется равновесным (рис. 9-6,е).

Пропускное состояние p - n перехода (прямо смещенный p - n переход). Если к p - n переходу приложено внешнее напряжение, причем плюс подключен к p -области, а минус — к n -области (рис. 9-6,ж), то p - n переход находится в пропускном или открытом состоянии. Электрическое поле в p - n переходе, создаваемое внешним источником напряжения, имеет направление, противоположное контактному полю. В результате этого уменьшается (прямо смещается) потенциальный барьер перехода на величину внешнего напряжения, прежнее равновесие нарушится и появится диффузия основных носителей. Дырки и электроны проводимости будут перемещаться навстречу друг другу и образуют ток диффузии:

$$I = I_{\sigma} + I_{д}, \quad (9-2)$$

где I — ток диффузии;

I_{σ} — электронная часть тока;

$I_{д}$ — дырочная часть тока.

Направление тока через p - n переход соответствует движению положительных зарядов — дырок, т. е. от дырочной области к электроной, а во внешней цепи — от плюса к минусу источника питания. Поскольку контакт-

ная разность потенциалов мала (всего доли вольта), то и прямое напряжение должно быть тоже невелико. Если прямое напряжение превысит контактную разность потенциалов, то в $p-n$ переходе внешнее поле для основных носителей будет ускоряющим, тогда прямой ток достигнет величины, опасной для нормальной работы $p-n$ перехода, и переход может быть разрушен. При этом условии запирающий слой пропадает.

Запирающее состояние $p-n$ перехода (обратно смещенный $p-n$ переход). Запирающее состояние перехода получается в том случае, когда к p -области подключен минус источника питания, а к n -области — плюс (рис. 9-6,з). В этом случае потенциальный барьер увеличивается (смещается обратно) на величину внешнего напряжения, увеличивается также и напряженность электрического поля перехода, так как поле внешнего источника по направлению совпадает с контактным полем перехода. Потенциальный барьер могут преодолеть лишь некоторые основные носители, имеющие большую энергию, и диффузионный ток практически отсутствует. Ток через переход имеет обратное направление — от электронной области к дырочной, а во внешней цепи, как всегда, от плюса источника питания к минусу. Обратный ток образуется за счет неосновных носителей, для которых поле обратно смещенного перехода является ускоряющим. Сопротивление и ширина запирающего слоя значительно увеличатся, так как в $p-n$ переходе основные носители тока отсутствуют.

Емкость $p-n$ перехода. В электронно-дырочном переходе существуют емкости двух видов. Одна из них C_{Π} называется барьерной емкостью, так как зависит от величины потенциального барьера, приложенного к $p-n$ переходу. Барьерная емкость может быть определена как емкость плоского конденсатора, в котором диэлектриком служит запирающий слой, а обкладками — токопроводящие слои p - и n -областей перехода. С увеличением обратного напряжения расширяется запирающий слой и емкость уменьшается. Примерный график зависимости емкости от приложенного напряжения приведен на рис. 9-7,а. Для уменьшения емкости следует уменьшить площадь $p-n$ перехода.

Помимо барьерной емкости, в переходе имеется диффузионная емкость $C_{д}$. Она обусловлена явлением

диффузии, т. е. накоплением неосновных носителей в областях p и n , что равноценно наличию емкости в p - n переходе.

Обе емкости — барьерная и диффузионная — являются параллельно включенными запирающему сопротивлению перехода. Эквивалентная схема p - n перехода приведена на рис. 9-7, б, где R — сопротивление мате-

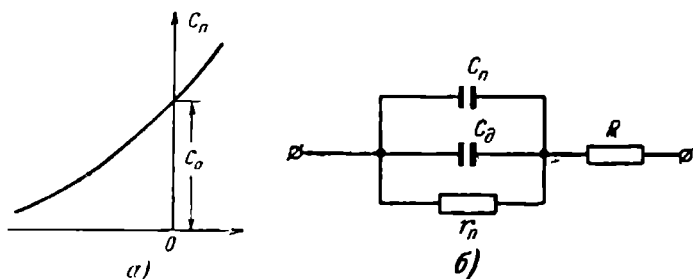


Рис. 9-7. График емкости p - n перехода в зависимости от приложенного напряжения (а) и эквивалентная схема перехода (б).

риала полупроводника, а r_n — сопротивление слоя p - n перехода.

Методы изготовления p - n перехода. Наибольшее распространение получили два метода изготовления p - n перехода: сплавной и диффузионный.

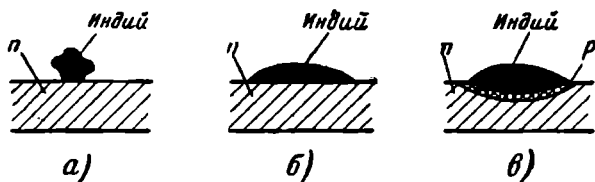


Рис. 9-8. Сплавной метод изготовления p - n перехода.

Сплавной метод. На пластинку германия типа n накладывают таблетку акцептора (индий) (рис. 9-8, а) и нагревают в атмосфере водорода или в вакууме (чтобы избежать окисления сплавляемых веществ) до температуры 550°C , т. е. выше температуры плавления индия (375°C) и ниже температуры плавления германия (965°C).

При такой температуре индий расплавляется (рис. 9-8,б) и атомы проникают на небольшую глубину в пластинку германия *n*-типа. Глубина проникновения индия регулируется как температурой, так и временем нагрева. По окончании нагрева та область *n*-германия, которая сплавилась с индием, имеет высокую концентрацию дырок и превращается в *p*-германий (рис. 9-8,в). Чистый индий служит выводом *p*-области. *p-n* переход образуется между двумя областями германия различной проводимости.

Диффузионный метод. Принцип получения *p-n* перехода заключается в диффузии акцептора (индий) в германиевую пластинку типа *n*. Для этого пластинку германия и акцептор помещают в металлическую вакуумную камеру или стеклянную ампулу. Нагрев производится до температуры 900° С, при которой акцептор превращается в газовое состояние и диффундирует в глубь германия. Диффундирующее вещество получило название «диффузант». В германиевой пластинке создаются, таким образом, области типа *n* и типа *p*, а между ними образуется *p-n* переход. Если германиевая пластинка берется *p*-типа, то диффузантом должен быть донор.

9-7. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

Полупроводниковым диодом называется полупроводниковый прибор, имеющий один *p-n* переход.

Принцип выпрямления основан на односторонней проводимости электронно-дырочного перехода или, иначе, на изменении сопротивления запирающего слоя перехода в зависимости от величины и знака приложенного к нему напряжения. Под действием переменного напряжения запирающий слой как бы пульсирует, поэтому ток будет протекать преимущественно в одном направлении (пропускном).

Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода отличается от таковой вакуумного диода главным образом наличием обратного тока. На рис. 9-9,а приведены типовые характеристики полупроводникового и вакуумного диодов. У полупроводниковых диодов характеристика прямого тока имеет большую крутизну и излом характеристики резко выражен, чем у вакуумных.

Прямой ток получается за счет диффузии основных носителей через p - n переход. Для этого на p - n переход подается прямое смещение, которое уменьшает величину потенциального барьера. Когда напряжение смещения будет приближаться к напряжению контактного поля, ток резко возрастает. Величина этого напряжения для германия равна $+0,2$ в, а для кремния $+0,5$ в.

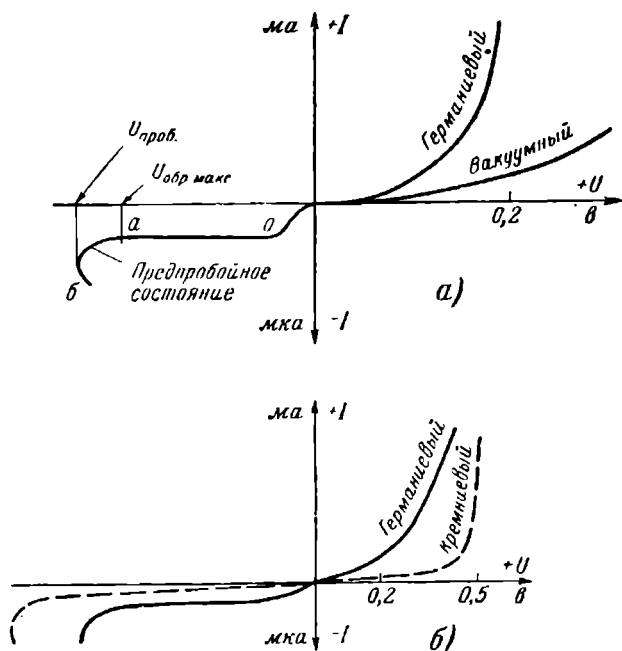


Рис. 9-9. Примерные вольт-амперные характеристики диодов полупроводникового и вакуумного.

Сравнение характеристик германиевого и кремниевого диодов приведено на рис. 9-9,б.

Характеристика обратного тока состоит как бы из двух частей: почти горизонтального участка (Oa) и участка (ab). При увеличении обратного напряжения до так называемого критического значения обратный ток мал и почти не зависит от величины напряжения. Объясняется это тем, что обратный ток зависит от концентрации неосновных носителей, которая очень мала. Затем при увеличении обратного напряжения несколько

выше критического обратный ток заметно возрастает (предпробойное состояние), а при достижении пробивного напряжения ток становится настолько большим, что происходит нагревание $p-n$ перехода и его пробой. Предпробойное состояние перехода характеризуется разрушением ковалентных связей и массовым возникновением зарядов электрон—дырка при увеличении напряженности поля в $p-n$ переходе. Обратный ток кремниевых диодов значительно меньше германиевых.

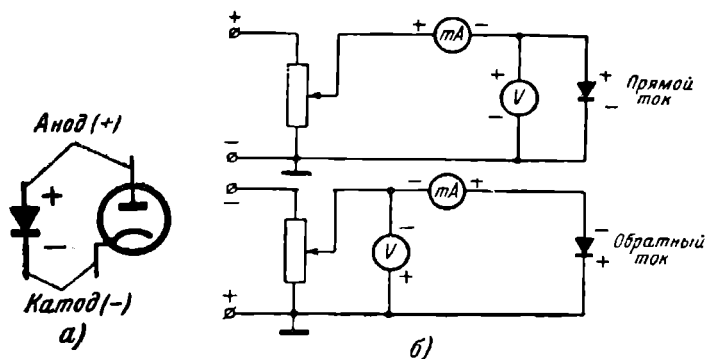


Рис. 9-10. Условное обозначение диода в схеме (а) и схемы для снятия вольт-амперных характеристик прямого тока и обратного (б).

В схемах полупроводниковый диод обозначается, как показано на рис. 9-10, а (слева). Схема для снятия вольт-амперных характеристик диода приведена на рис. 9-10, б.

На рис. 9-11 приведены схемы выпрямителей на полупроводниковых диодах: однополупериодная (а) и двухполупериодная (б).

Полупроводниковый диод характеризуется следующими параметрами.

Крутизна вольт-амперной характеристики

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta U} \text{ [ма/в]}.$$

Внутреннее сопротивление для переменного тока

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{1}{S} \text{ [в/ма]} = \text{ком.}$$

Сопротивление диода постоянному току

$$R_0 = \frac{U}{I} \text{ [ом]}.$$

Коэффициент выпрямления

$$K_{\text{выпр}} = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}} = \frac{R_{\text{обр}}}{R_{\text{пр}}}.$$

В полупроводниковых диодах следует различать сопротивление диода в прямом направлении $R_{\text{о.пр}}$, которое относительно мало, и сопротивление диода в обратном

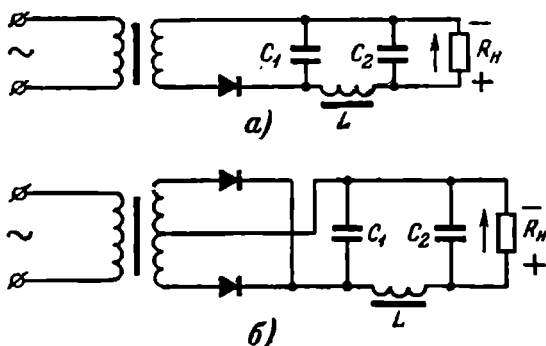


Рис. 9-11. Схемы выпрямителей на полупроводниковых диодах.

a — однополупериодная; *б* — двухполупериодная.

направлении $R_{\text{о.обр}}$, которое относительно велико, но не равно бесконечности, как у вакуумного диода.

Для полупроводникового диода установились следующие понятия, характеризующие его свойства.

Прямой ток — это ток, протекающий через диод в прямом направлении $I_{\text{пр}}$. Его максимальная величина при длительном протекании не должна вызывать недопустимого перегрева диода и заметного изменения его характеристики.

Выпрямленный ток — это среднее значение выпрямленного тока или постоянная составляющая пульсирующего тока.

Наибольшая амплитуда выпрямленного тока — это наибольшее значение тока, протекающего

щего через диод при его работе в однофазном однополупериодном выпрямителе с активной нагрузкой, не зашунтированной емкостью. Величина выпрямленного тока составляет примерно 30% от его амплитудного значения.

Обратный ток $I_{обр}$ — это ток, протекающий через диод, когда к диоду приложено обратное напряжение. Измеряется обратный ток при максимально допустимом

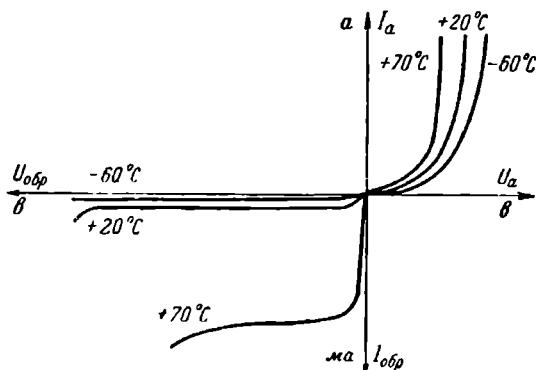


Рис. 9-12. Влияние температуры на вольт-амперные характеристики германиевых диодов.

для данного типа диода обратном напряжении, которое составляет примерно 70—80% от обратного пробивного напряжения.

Наибольшая амплитуда обратного напряжения — это амплитуда напряжения, которая может быть приложена к диоду в обратном направлении в течение длительного времени без опасности нарушения нормальной работы диода.

Падение напряжения на диоде в пропускном направлении очень мало, порядка 0,5—1 в, и зависит от типа диода. Падение напряжения на диоде, включенном в обратном направлении, велико, примерно от 25 до 600 в. Для каждого типа диода величина обратного напряжения приводится в справочниках и не рекомендуется ее превышать во избежание нарушения нормальной работы диода.

Характеристики и параметры полупроводниковых приборов сильно зависят от температуры окружающего

пространства. На рис. 9-12 приведена характеристика германиевого диода для трех значений температуры: номинальной (комнатной) $20 \pm 5^\circ \text{C}$; повышенной $+70^\circ \text{C}$ и пониженной -60°C . Особо следует обратить внимание на то, что с повышением температуры обратный ток значительно увеличивается, а пробивное напряжение уменьшается. Ток в прямом направлении также увеличивается, но в меньшей степени, поэтому полупроводниковый диод с повышением температуры начинает терять одностороннюю проводимость. Кремниевые диоды более устойчивы и могут работать при температуре порядка $+150^\circ \text{C}$.

9-8. ТИПЫ ДИОДОВ

По конструктивному выполнению полупроводниковые диоды подразделяются на плоскостные и точечные, физические же процессы, происходящие в них, совершенно одинаковы. Одним электродом в обоих типах диодов является пластинка германия или кремния как электронной проводимости, так и дырочной. Другим электродом в плоскостных диодах служит кристалл с противоположной проводимостью (рис. 9-13,а), а в точечных — тонкая проволочка из вольфрама или фосфористой бронзы, заостренная на конце (рис. 9-13,б). Площадь соприкосновения острой проволочки с кристаллом очень мала (точка) и составляет около $0,01 \text{ мм}^2$.

Плоскостные диоды. Германиевые и кремниевые диоды с плоскостными контактами обладают большой площадью p - n перехода и поэтому допускают прохождение больших токов. Для увеличения рассеиваемой мощности p - n перехода диод прикрепляется к металлическому теплоотводу (рис. 9-13,в). Плоскостные диоды вследствие большой емкости p - n перехода ($C \approx 200 \text{ пф}$) применяются обычно для выпрямления токов частотой не более 50 кгц .

Для выпрямления больших величин напряжения диоды соединяются последовательно, причем они должны быть подобраны по прямому и обратному току (рис. 9-14,а). Если диоды не идентичны, то следует параллельно им включать омическое сопротивление порядка 100 ком для выравнивания обратных сопротивлений. Без шунтирующих сопротивлений первым пробивается лучший из диодов, который имеет малый обратный ток

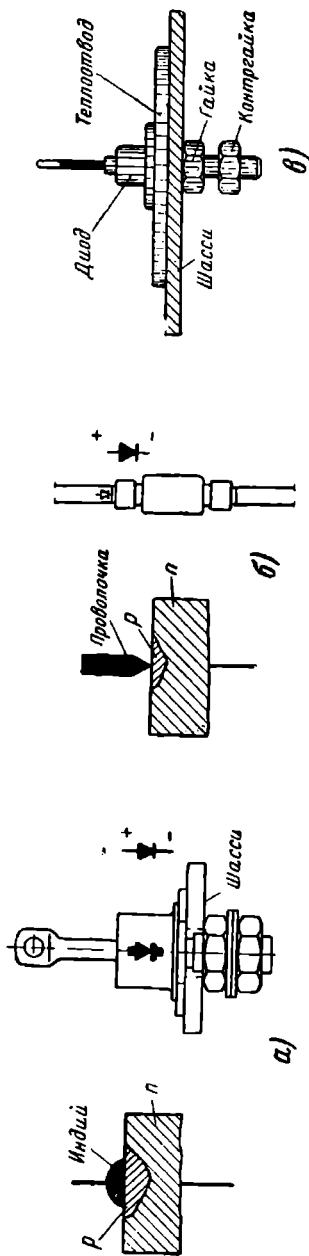


Рис. 9-13. Диоды. а — плоскостной; б — точечный; в — плоскостной диод с теплоотводом.

и большое обратное сопротивление, после чего пробивается и худший, так как в этом случае к нему будет приложено полное напряжение.

Когда требуется иметь большую величину выпрямленного тока, тогда диоды соединяются параллельно. Для выравнивания токов, протекающих через диоды, последовательно с диодами включается небольшое омическое сопротивление порядка 2—3 ом (рис. 9-14,б).

Промышленностью выпускаются «германиевые выпрямительные столбы», представляющие собой несколько последовательно включенных германиевых плоскостных диодов, помещенных в металлическом ящике, залитом эпоксидной смолой. Они предназначены на ток 100—300 ма с наибольшей амплитудой обратного напряжения от 1 000 до 2 000 в. Допускается как последовательное, так и параллельное включение одностипных столбов. При последовательном включении столбов последние должны быть изолированы от шасси.

Точечные диоды. Точечный диод имеет очень малую площадь контакта между кристаллом и острием иглы и соответственно малую емкость $p-n$ перехода, вследствие чего он может

использоваться в диапазоне высоких и даже сверхвысоких частот.

Германиевые точечные диоды после сборки формируются для образования перехода. Формовка заключается в пропускании импульсов тока в прямом направлении в течение нескольких секунд. Величина импульсов тока берется в 5—10 раз больше нормального значения выпрямленного тока. В результате формовки под острием иглы образуется слой полупроводника проводимости,

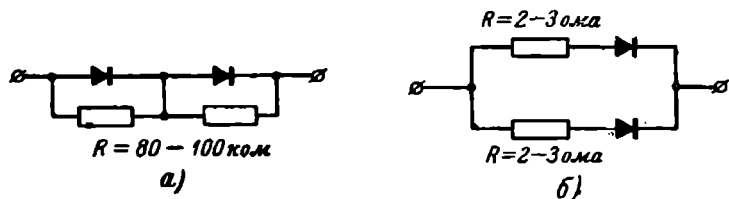


Рис. 9-14: Последовательное (а) и параллельное (б) включения диодов.

обратной основному кристаллу. Германиевые точечные диоды могут применяться не только для детектирования токов высокой частоты, но и для выпрямления малых токов промышленной частоты, например, в схемах автоматики и телемеханики.

Кремниевые точечные диоды применяются в качестве детекторов и смесителей на СВЧ, так как они имеют бóльшую чувствительность, чем германиевые. Смесительные диоды не формируются. Пластинки из кремния с одной стороны полируются, и на полированную поверхность опирается острие контактной проволоочки.

9-9. МАРКИРОВКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

У приборов, разработанных ранее 1964 г. и выпускающихся сейчас, условные обозначения состоят из трех элементов. На первом месте стоит буква Д, что означает диод, а на втором месте — число (номер), которое указывает на область применения. На третьем месте — буква, указывающая разновидность прибора. Назначение и область применения диодов приведены в табл. 9-1.

Тип диода	Номера
Точечные германиевые	От 1 до 100
Точечные кремниевые	От 101 до 200
Плоскостные кремниевые	От 201 до 300
Плоскостные германиевые	От 301 до 400
Смесительные СВЧ детекторы	От 401 до 500
Умножительные	От 501 до 600
Видеодетекторы	От 601 до 700
Параметрические германиевые	От 701 до 749
Параметрические кремниевые	От 750 до 800
Опорные диоды (стабилитроны)	От 801 по 900
Вариконы	От 901 до 950
Туннельные диоды	От 951 до 1 000
Выпрямительные столбы	От 1 001 до 1 100

9-10. ОПОРНЫЕ ДИОДЫ

Помимо рассмотренных точечных и плоскостных диодов, применяемых для выпрямления переменного тока, имеется еще один класс диодов, получивших название опорных или стабилитронов. Применяются стабилитроны для поддержания постоянного напряжения в схемах, где выпрямленное напряжение может измениться. Схема включения опорного диода приведена на рис. 9-15,а, а его характеристика — на рис. 9-15,б.

Отличительной особенностью этой характеристики является относительное постоянство напряжения, которое выделяется на опорном диоде после наступления электрического пробоя. Объяснить этот участок характеристики можно следующим образом. Высокая концентрация примеси полупроводниковых пластин приводит к увеличению контактного напряжения $p-n$ перехода и уменьшению толщины запирающего слоя. Поэтому уже при относительно низких обратных напряжениях напряженность электрического поля в запирающем слое оказывается достаточной для разрушения ковалентных связей и создания ударной ионизации узлов кристаллической решетки. При этом обратный ток резко возрастает, т. е. наступает электрический пробой, который является обратным процессом (при снятии обратного напряжения свойства $p-n$ перехода полностью восстанавливаются).

Так как электрический пробой наступает при низком обратном напряжении, мощность, выделяющаяся в $p-n$ переходе при относительно больших обратных токах, будет небольшой, что предохраняет $p-n$ переход от теплового пробоя. Превышение предельно допустимого обратного тока стабилитрона приводит, как и в обычных диодах, к тепловому пробую.

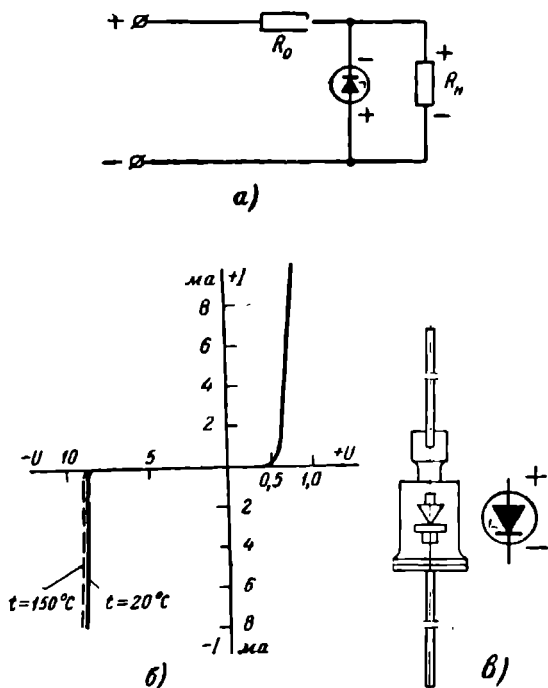


Рис. 9-15. Опорный диод (кремниевый стабилитрон).

a — схема включения; *б* — вольт-амперная характеристика; *в* — внешний вид.

В германиевых диодах электрический пробой очень быстро переходит в тепловой, поэтому опорные диоды изготавливаются на основе кремния, который выдерживает более высокие рабочие температуры.

Кремниевые стабилитроны заключены в герметичный металлический корпус. Цифры в обозначении указывают на величину стабилизированного напряжения. Для стабилизации большего напряжения можно включать последовательно несколько однотипных опорных диодов. Основные данные опорных диодов помещены в табл. 9-2.

Тип стабилитрона	$U_{\text{стаб. в}}$	$I_{\text{стаб. мин. ма}}$	$I_{\text{стаб. макс. ма}}$	$P_{\text{макс. ват}}$
Д808	7—8,5	5	33	280
Д809	8—9,5	5	29	280
Д810	9—10,5	5	26	280
Д811	10—12	5	23	280
Д813	11,5—14	5	20	280

9-11. ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

Туннельный диод является новым высокочастотным полупроводниковым прибором. Он в основном применяется как маломощный генератор (0,75—3 *ватт*) и усилитель сверхвысоких частот—до 10^5 *Мгц* ($\lambda \leq 1$ *см*).

Кроме того, туннельный диод находит применение и в устройствах автоматики.

По конструкции туннельный диод похож на обычный плоскостной диод, изготовляемый методом сплавления. Существенная разница между этими диодами заключается в концентрации примесей. В туннельном диоде концентрация примесей велика, в результате чего слой *p-n* перехода становится очень узким, порядка 1—

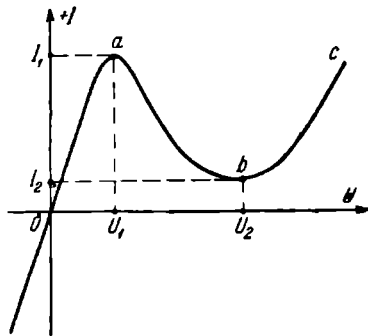


Рис. 9-16. Вольт-амперная характеристика туннельного диода.

1,5 *мк*. Вольт-амперная характеристика туннельного диода (рис. 9-16) существенно отличается от характеристики обычного полупроводникового диода (рис. 9-16). Односторонняя проводимость у этого диода полностью отсутствует. При отрицательных значениях напряжения характеристика линейна и проходит через начало координат. При подаче прямого напряжения характеристика сначала возрастает, затем имеет падающий участок (участок *ab*), после чего она монотонно возрастает, как у обычного диода (участок *bc*). В пределах падающего участка характеристики вну-

треннее сопротивление туннельного диода отрицательно:

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I} < 0.$$

Высокая концентрация примесей в туннельном диоде приводит не только к уменьшению толщины запирающего слоя p - n перехода, но и к увеличению контактного напряжения. В результате этого напряженность электрического поля в запирающем слое оказывается достаточной для того, чтобы вызвать электрический пробой p - n перехода без внешнего напряжения. В пробитом p - n переходе валентные электроны p -области кристалла могут попадать через запрещенную зону непосредственно в зону проводимости n -области, создавая туннельный ток через квантовые туннели в запирающем слое (отсюда и происходит название туннельный диод).

Наличие падающего участка характеристики можно объяснить следующим. Увеличение прямого напряжения, с одной стороны, увеличивает туннельный ток, а с другой стороны—уменьшает напряженность электрического поля в запирающем слое. При определенном значении внешнего напряжения электрический пробой и туннельный эффект прекращаются, а туннельный диод приобретает свойства обыкновенного полупроводникового диода.

Параметры туннельного диода следующие (см. рис. 9-16):

среднее отрицательное сопротивление

$$R_0 = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}; \quad (9-1)$$

отношение токов максимального к минимальному

$$K = \frac{I_1}{I_2}.$$

Чем больше отношение токов, тем лучше диод.

Материалом для изготовления туннельного диода может быть германий, кремний и интерметаллические соединения, например сурьмянистый индий.

Большим достоинством туннельного диода являются: малые шумы порядка 4 дБ, простота изготовления, малые размеры (не больше спичечной головки).

9-12. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТРИОД (ТРАНЗИСТОР)

Устройство и принцип действия. Полупроводниковый, или кристаллический, триод иначе называется «транзистор», что в точном переводе двух английских слов «transfer resistor» означает «регулируемое сопротивление». Плоскостной транзистор, разработанный в 1949—1950 гг. американским физиком В. Шокли,—наиболее распространенный тип транзистора. Физические процессы, происходящие в точечных

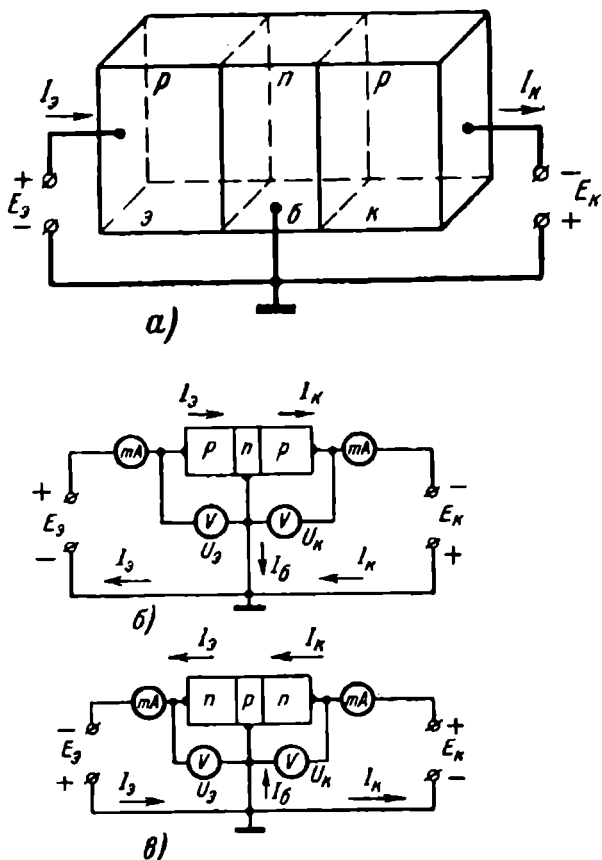


Рис. 9-17. Объемное (а) и двухмерное изображение плоскостного транзистора типа $p-n-p$ (б) и $n-p-n$ (в).

руемое сопротивление». Плоскостной транзистор, разработанный в 1949—1950 гг. американским физиком В. Шокли,—наиболее распространенный тип транзистора. Физические процессы, происходящие в точечных
 208

и плоскостных транзисторах, аналогичны. В последнее время применяются исключительно плоскостные транзисторы, так как они имеют ряд преимуществ перед точечными, выпуск которых прекращен.

На рис. 9-17,а показано объемное изображение плоскостного транзистора. Как видно из рисунка, он состоит из трех слоев полупроводника, причем крайние слои имеют одинаковую проводимость, а разделяющий их средний слой—противоположную. Так, если средний слой имеет электронную проводимость, то крайние слои кристалла должны быть дырочной проводимости, и наоборот. Таким образом, транзистор представляет собой полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ переходами, причем переход, работающий в прямом направлении, называется эмиттерным, а соответствующий крайний слой—эмиттером. Средний слой называется базой. Второй переход, работающий в обратном направлении, называется коллекторным, а соответствующий крайний слой—коллектором. Можно сказать, что транзистор состоит как бы из двух диодов, средний электрод которых является общим.

В транзисторе типа $p-n-p$ различают три электрические цепи, в каждой из которых включены источники тока (рис. 9-17,б). Первая цепь—это цепь эмиттер—база. Ток эмиттера $I_э$ протекает от эмиттера через эмиттерный переход на базу и к источнику питания $E_э$. Другая цепь—цепь коллектор—база. Ток этой цепи является обратным током, так как протекает он в обратном направлении через коллекторный переход (от электронной области кристалла к дырочной). Ток будет протекать: от $+E_к$ через коллекторный переход к $-E_к$. Через провод, являющийся выводом базы, ток эмиттера $I_э$ и ток коллектора $I_к$ имеют противоположное направление, и ток базы будет равен разности этих токов:

$$I_б = I_э - I_к \quad (9-2)$$

Третья цепь—эмиттер—коллектор. В этой цепи напряжения источников питания эмиттера $E_э$ и коллектора $E_к$ соединены последовательно, и ток будет протекать от эмиттера через два $p-n$ перехода к коллектору.

Направление токов в транзисторе типа $n-p-n$ показано на рис. 9-17,в.

В схеме транзисторы изображаются окружностью, в которой жирная линия означает базу, а две наклонные линии к ней — эмиттер и коллектор. Стрелочка на эмиттере показывает направление дырок, т. е. направление прямого тока I_{ϵ} в цепи эмиттера. В транзисторе типа $p-n-p$ стрелочка обращена в сторону базы, так как дыр-

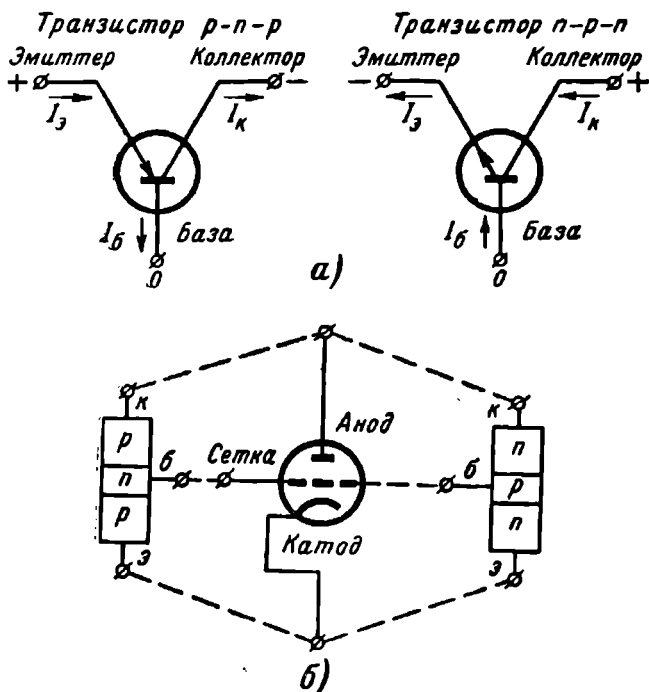


Рис. 9-18. Условное обозначение транзистора (а) и аналогия между вакуумным триодом и транзистором (б).

ки из эмиттера перемещаются в базу. В триоде типа $n-p-n$ стрелка показывает направление дырок от базы к эмиттеру (рис. 9-18,а).

По своим свойствам транзистор аналогичен вакуумному триоду, т. е. при помощи него можно производить усиление сигнала, генерирование и т. п. В транзисторе эмиттер соответствует катоду лампы, коллектор—аноду, база (или управляющий электрод)—сетке (рис. 9-18,б). Таким образом, между вакуумным и кристаллическими триодами может быть проведена некоторая аналогия.

Но все же между ними имеется существенное различие:

1) носителями тока в вакуумной лампе являются только свободные электроны, а в транзисторе носителями тока могут быть как электроны проводимости (типа $n-p-n$), так и дырки (типа $p-n-p$);

2) вакуумный триод управляется потенциалом управляющей сетки, а полупроводниковый—входным током.

На рис. 9-19 изображена схема включения транзистора типа $p-n-p$. Транзистор, так же как и вакуумный

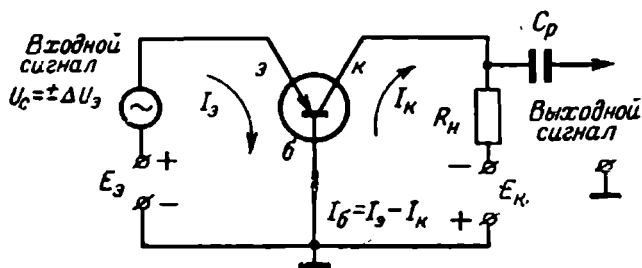


Рис. 9-19. Схема включения транзистора типа $p-n-p$.

триод, имеет входную и выходную цепи, причем один электрод у них будет общим. Таким общим электродом в приведенной схеме является база. Общая точка схемы обычно заземляется. Напряжение на эмиттере и коллекторе определяется по отношению к базе. Для транзистора типа $p-n-p$ напряжение на эмиттере E_3 должно быть положительным, а на коллекторе E_K отрицательным, а для типа $n-p-n$ знаки напряжения изменяются на обратные.

Рассмотрим подробнее процесс, происходящий в транзисторе. При разомкнутой цепи эмиттера через коллектор протекает небольшой величины (порядка микроампер) обратный ток $I_{к0}$, потому что к коллекторному переходу приложено обратное напряжение. Ток $I_{к0}$ не зависит от величины напряжения на коллекторе, а зависит только от температуры полупроводника. С повышением температуры ток $I_{к0}$ увеличивается. При замкнутой цепи эмиттера приложенное к эмиттерному переходу прямое напряжение (доли вольта) понизит потенциальный барьер эмиттерного перехода и дырки, преодолевая потенциальный барьер, будут инжектироваться (впры-

скиваться) из эмиттера в базу. Поскольку поле в базе отсутствует (поле сосредоточено только в переходах), то дырки, являясь в базе неосновными носителями, будут распространяться в ней посредством диффузии. Дырки имеют конечное время жизни (порядка 10^{-5} — 10^{-7} сек). В зависимости от толщины базы они дойдут до коллекторного перехода в большем или меньшем количестве. Так как к коллекторному переходу приложено достаточно большое напряжение, то напряженность поля в области коллекторного перехода весьма велика и дырки, дошедшие до перехода, будут втягиваться полем в область коллектора. Появление дырок в коллекторном переходе уменьшит обратное сопротивление перехода, и ток коллектора увеличится. Дырки, не дошедшие до коллекторного перехода, рекомбинируют с электронами базы, создавая ток базы. Следует заметить, что эмиттер, база и коллектор имеют различную концентрацию примесей и соответственно различное значение удельного сопротивления. Наименьшее сопротивление должен иметь эмиттер, поэтому в качестве примесей к германию, помимо индия, добавляют галлий (сопротивление галлия меньше индия). Коллектор имеет концентрацию примесей меньшую, чем эмиттер, так как к коллекторному переходу прикладывается напряжение, примерно в 10—50 раз больше, чем к эмиттерному.

Самую меньшую концентрацию примесей имеет база. Это вызвано двумя обстоятельствами. Во-первых, в ней должно быть мало основных носителей—электронов, для того чтобы инжекция электронов из базы в эмиттер была ничтожно малой и ток в цепи эмиттер—база определялся бы преимущественно диффузией дырок из эмиттера в базу. Во-вторых, малая концентрация примесей в базе увеличивает время жизни неосновных носителей, благодаря чему подавляющее большинство дырок имеет возможность дойти до коллекторного *p-n* перехода.

Основные схемы включения транзистора и статический коэффициент усиления транзистора по току (α и β). В зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзистора: с общей базой (сокращенно будем обозначать ОБ, рис. 9-20,а), с общим эмиттером (ОЭ, рис. 9-10,б) и с общим коллектором (ОК,

рис. 9-20, в). На рис. 9-20 приведены эти схемы для транзисторов типа *p-n-p* (для транзисторов типа *n-p-n* меняется только полярность источников питания).

Согласно формуле (9-2) можно написать:

$$I_э = I_к + I_б, \quad (9-3)$$

т. е. ток эмиттера распределяется между базой и коллектором.

Если ток эмиттера увеличится на величину $+\Delta I_э$ за счет увеличения напряжения эмиттера или за счет на-

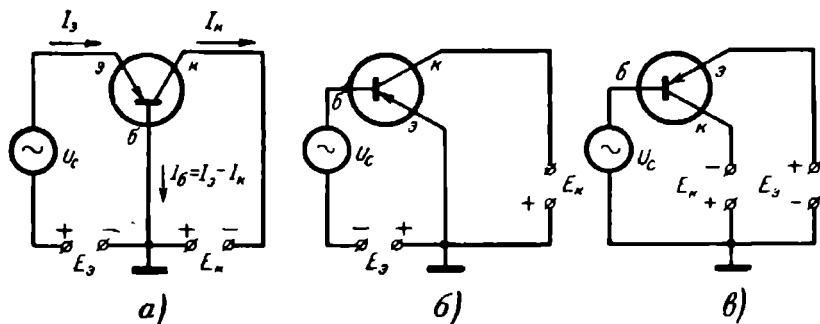


Рис. 9-20. Основные схемы включения транзистора.

a — с общей базой (ОБ); *б* — с общим эмиттером (ОЭ); *в* — с общим коллектором (ОК).

пряжения сигнала $+\Delta U_с$, то соответственно возрастут и остальные токи. Для нового состояния будет иметь место равенство:

$$I_э + \Delta I_э = I_к + \Delta I_к + I_б + \Delta I_б. \quad (9-4)$$

Произведя вычитание (9-3) из (9-4), получим:

$$\Delta I_э = \Delta I_к + \Delta I_б. \quad (9-5)$$

Приращение тока базы, как и сам ток базы, относительно мало, поэтому

$$\Delta I_к \approx \Delta I_э.$$

Статический коэффициент усиления по току представляет собой отношение приращения выходного тока к приращению входного тока. Для схемы ОБ выходной ток — это ток коллекторной цепи, а входной — ток эмиттерной цепи. Так как выходной ток в схеме ОБ всегда меньше входного, то коэффициент усиления по току меньше единицы и его правильное

назвать коэффициентом передачи тока эмиттера в схеме ОБ. Обозначается этот коэффициент греческой буквой «альфа» (α):

$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}. \quad (9-6)$$

По сути дела α означает ту часть основных носителей эмиттера, которая через базу перешла в коллектор. Обычно $\alpha = 0,92-0,99$. Чем тоньше база, тем больше α .

Приращение коллекторного тока можно определить из (9-6):

$$\Delta I_K = \alpha \Delta I_B. \quad (9-7)$$

Приращение тока базы представляет собой разность приращений токов эмиттера и коллектора:

$$\Delta I_B = \Delta I_E - \Delta I_K.$$

Подставив в это равенство вместо ΔI_K выражение (9-7), получим:

$$\Delta I_B = \Delta I_E - \alpha \Delta I_E = \Delta I_E (1 - \alpha).$$

Следовательно,

$$\Delta I_B = \Delta I_E (1 - \alpha). \quad (9-8)$$

В схеме ОЭ выходным током является ток коллектора, а входным — ток базы, поэтому коэффициент усиления по току получается больше единицы. Обозначается коэффициент усиления по току в схеме ОЭ греческой буквой «бета» (β):

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}. \quad (9-9)$$

Легко выразить β через α :

$$\beta = \frac{\alpha \Delta I_E}{\Delta I_E (1 - \alpha)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \approx \frac{1}{1 - \alpha}, \quad (9-10)$$

так как $\alpha \approx 1$.

Как видно из формулы (9-10), для увеличения β необходимо иметь большее значение α , т. е. база должна быть тоньше.

Для $\alpha = 0,96$ коэффициент $\beta = \frac{0,96}{1 - 0,96} = 24$, если $\alpha = 0,92$, то $\beta = 11,5$.

В схеме ОК выходным током будет ток эмиттера, а входным — ток базы. Коэффициент усиления по току схемы ОК примерно равен β и определяется по формуле

$$\frac{\Delta I_{\text{э}}}{\Delta I_{\text{б}}} = \frac{\Delta I_{\text{э}}}{\Delta I_{\text{э}}(1 - \alpha)} = \frac{1}{1 - \alpha} \approx \beta. \quad (9-11)$$

Практически с достаточной степенью точности параметры α и β могут быть определены не через отношение приращений токов, а отношением абсолютных значений токов:

$$\alpha \approx \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}}; \quad (9-6')$$

$$\beta \approx \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}}. \quad (9-9')$$

Зная параметры α и β , можно определить токи $I_{\text{к}}$, $I_{\text{э}}$ и $I_{\text{б}}$:

$$I_{\text{к}} \approx \alpha I_{\text{э}}; \quad (9-7')$$

$$I_{\text{э}} \approx \frac{I_{\text{к}}}{\alpha};$$

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{б}} &\approx \frac{I_{\text{к}}}{\beta}, \\ I_{\text{б}} &\approx I_{\text{э}}(1 - \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (9-8')$$

9-13. СТАТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТРАНЗИСТОРА

Характеристики транзистора, включенного по схеме с ОБ. Для транзисторов, так же как и для вакуумных триодов, снимают статические характеристики, по которым можно определить параметры триода, установить необходимый режим и произвести расчет усилительных и генераторных схем.

На рис. 9-21,а изображена принципиальная схема для снятия статических характеристик с общей базой. Полярность источников питания устанавливается в зависимости от типа транзистора.

В вакуумном триоде для построения семейства статических характеристик (анодных или сеточных и определения параметров) достаточно иметь три переменные

величины: U_a , U_c и I_a . В транзисторе же для этого требуется, как минимум, четыре величины: входной ток и входное напряжение, выходной ток и выходное напряжение. Основными характеристиками считаются входные и выходные.

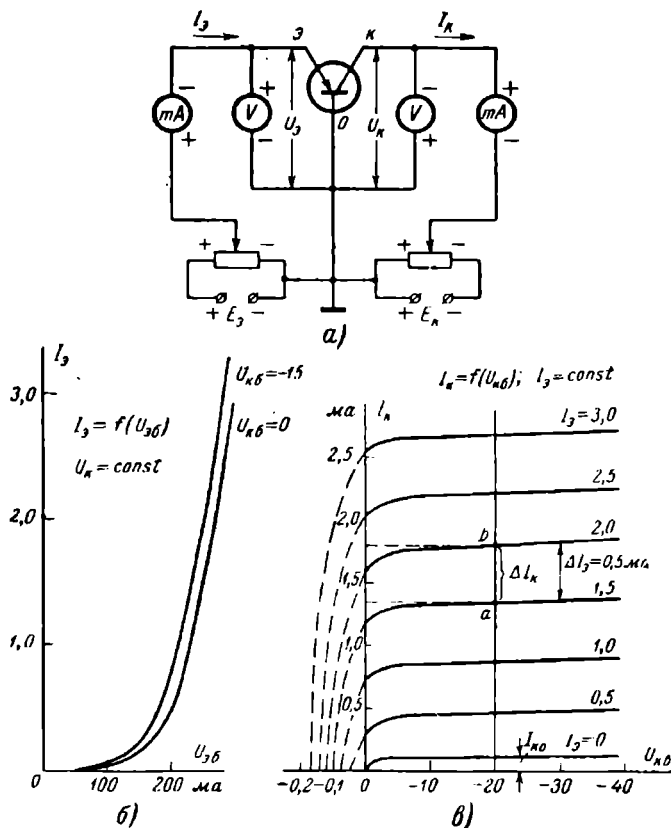


Рис. 9-21. Схема для снятия характеристик транзистора с общей базой (а), входные (б) и выходные (в) характеристики.

В схеме с общей базой семейство входных или эмиттерных характеристик транзистора представляет собой зависимость тока эмиттера от изменения напряжения на эмиттере при различных, но постоянных напряжениях коллектор — база: $I_3 = f(U_{3б})$; $U_{кб} = \text{const}$.

Входные характеристики транзистора в схеме с общей базой изображены на рис. 9-21,б. Первой из семейства входных характеристик снимается характеристика при короткозамкнутой цепи коллектора ($U_{к.б}=0$). Фактически это будет характеристика одиночного эмиттерного $p-n$ перехода. Затем снимаются характеристики при отрицательных напряжениях на коллекторе, например, $U_{к.б}=-10$ в, $U_{к.б}=-20$ в. Эти характеристики с увеличением напряжения будут располагаться левее. Причина увеличения эмиттерного тока с увеличением коллекторного напряжения заключается в том, что с увеличением $U_{к.б}$ увеличивается ширина коллекторного $p-n$ перехода, а толщина базы становится соответственно меньше, что облегчает прохождение тока эмиттера через базу на коллектор.

При снятии характеристик на зажимы эмиттер—база напряжение подается через каждые 100 мв до такой величины, чтобы ток эмиттера не превысил допустимого тока эмиттера данного типа транзистора, который определяется по справочнику.

Выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с ОБ, показаны на рис. 9-21,в (или коллекторные характеристики). Несмотря на то что коллекторный ток — обратный ток и напряжение на коллекторе отрицательное, характеристики принято изображать в положительных осях координат. При таком построении характеристик (они похожи на анодные характеристики пентода) можно применять методы расчета, аналогичные для вакуумных приборов.

Семейство выходных характеристик транзистора представляет собой зависимость коллекторного тока от напряжения на коллекторе при постоянных, но разных значениях тока эмиттера: $I_{к}=f(U_{к.б})$ при $I_{э}=\text{const}$. Первая характеристика снимается при разомкнутой цепи эмиттера ($I_{э}=0$). Она начинается из начала координат и определяется неосновными носителями тока в коллекторном переходе. Величина тока обозначается $I_{к0}$ и называется «неуправляемый ток коллектора». Дальнейшие характеристики снимаются при $I_{э}=0,5$ ма, $I_{э}=1$ ма и т. д. Все эти характеристики идут почти параллельно друг другу. При $U_{к.б}=0$ коллекторный ток достигает почти максимальной величины: $I_{к}=\alpha I_{э}+I_{к0}$. С увеличением коллекторного напряжения ток коллектора мало

изменяется. Это указывает на то, что ток коллектора в основном определяется током эмиттера.

Для получения $I_{К} = 0$ при $I_{С} \neq 0$ надо на коллекторном переходе изменить полярность и подать положительное напряжение порядка 0,1 в. Тогда оба перехода

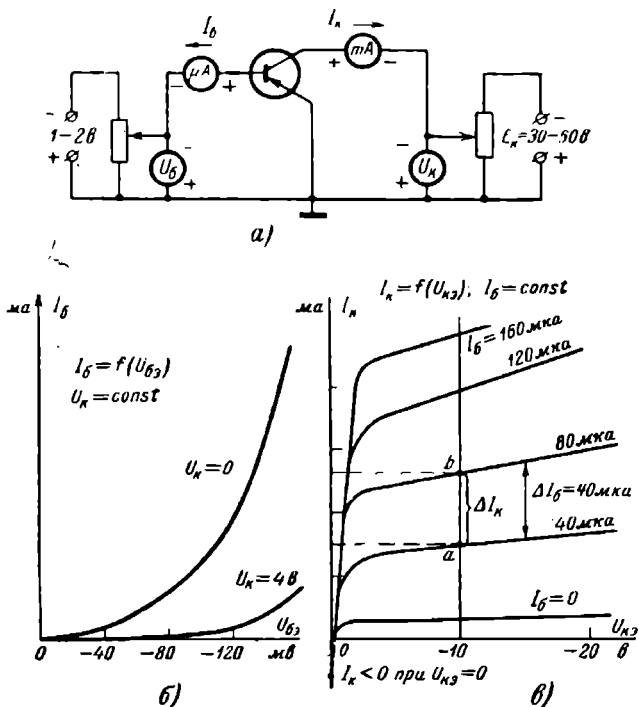


Рис. 9-22. Схема для снятия характеристик транзистора с общим эмиттером (а) и входные (б) и выходные (в) характеристики.

будут прямо смещенными и ток эмиттера станет целиком замыкаться через базу: $I_{Б} = I_{С}$.

Характеристики транзистора, включенного по схеме с ОЭ. Входным током служит ток базы $I_{Б}$, а выходным — ток коллектора $I_{К}$. Для получения тока во входной цепи база должна иметь отрицательный потенциал относительно катода и эмиттерный $p-n$ переход будет тогда прямосмещенным.

Входные характеристики выражают зависимость тока базы от напряжения на базе при постоян-

ном значении напряжения на коллекторе: $I_G = f(U_{КЭ})$ при $U_{КЭ} = \text{const}$.

На рис. 9-22,а приведена схема для снятия характеристик, а на рис. 9-22,б — входные характеристики. Одна характеристика снята при $U_{КЭ} = 0$, что означает короткое замыкание коллектора с эмиттером (рис. 9-23, а). При этом к эмиттеру, как и к коллектору, будут прикладываться положительное напряжение относительно базы и ток базы $I_G = I_Э + I_К$. Эта характеристика соответствует вольт-амперной характеристике двух параллельно вклю-

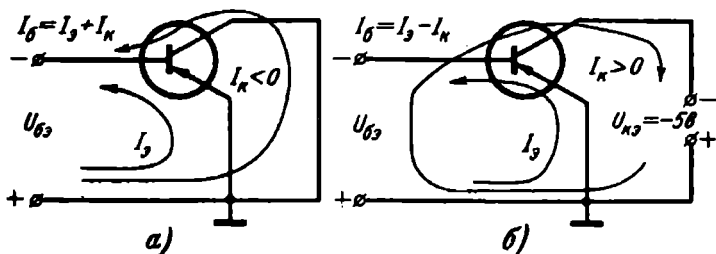


Рис. 9-23. Направление токов в цепи базы транзистора с ОЭ при $U_{КЭ} = 0$ (а) и при $U_{КЭ} = -5$ в (б).

ченных $p-n$ переходов в прямом направлении. Другая характеристика снята при небольшом отрицательном напряжении на коллекторе $U_{КЭ} = -5$ в. Она сместится вправо, так как в этом случае ток коллектора изменит свое направление (рис. 9-23,б) и ток базы будет не суммой, а разностью токов:

$$I_G = I_Э - I_К.$$

Выходные характеристики выражают зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе при постоянном значении тока базы: $I_К = f(U_{КЭ})$; $I_G = \text{const}$. Семейство выходных характеристик представлено на рис. 9-22,в.

Выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с ОЭ, отличаются от таковых схемы с ОБ. Во-первых, при $U_{КЭ} = 0$ ток $I_К < 0$ (протекает в обратном направлении). Во-вторых, с увеличением коллекторного напряжения ток коллектора значительно возрастает, поэтому выходные характеристики имеют больший наклон. Начальный участок выходных характеристик транзистора в схеме с ОЭ, где $I_К < 0$, пока не

имет практического значения и поэтому в справочниках часто не приводится.

Определение коэффициентов усиления транзистора по току α и β по выходным характеристикам транзистора. При определении α в схеме с ОБ восстанавливается перпендикуляр к оси напряжений $U_{к.б}$ (рис. 9-21, а) и отмечаются точки пересечения перпендикуляра с выходными характеристиками на линейном участке (точки a и b). Полученные точки дают возможность определить приращения токов эмиттера и коллектора. Тогда $\alpha = \Delta I_{к} / \Delta I_{э}$ при $U_{к.б} = \text{const}$.

Для определения β применяется аналогичный метод только на выходных характеристиках схемы с ОЭ (рис. 9-22, а): $\beta = \Delta I_{к} / \Delta I_{б}$ при $U_{к.э} = \text{const}$.

9-14. ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТРАНЗИСТОРА

На рис. 9-19 изображена схема усилителя низкой частоты на транзисторе с ОБ. В цепь коллектора транзистора включено сопротивление нагрузки $R_{н}$, а в цепь эмиттера включен источник усиливаемого сигнала u_c . Для простоты рассуждений будем считать, что $u_c = \pm \Delta U_{э}$ (под приращениями могут пониматься любые мгновенные значения усиливаемого сигнала).

При положительном приращении напряжения в цепи эмиттера ток эмиттера возрастет на величину $\Delta I_{э} = \Delta U_{э} / R_{вх.об}$, где $R_{вх.об}$ — сопротивление для переменного тока входной цепи транзистора, включенного по схеме с ОБ. Это сопротивление относительно мало как внутреннее сопротивление для переменного тока полупроводникового диода, включенного в прямом направлении. Приращение тока эмиттера вызовет приращение тока коллектора:

$$\Delta I_{к} = K_i \Delta I_{э},$$

где $K_i = \Delta I_{к} / \Delta I_{э}$ — динамический коэффициент усиления по току, который практически не отличается от α , потому что приращение тока коллектора определяется только током эмиттера и почти не зависит от напряжения на коллекторе: $K_i \approx \alpha$. Приращение тока коллектора вызовет приращение напряжения на нагрузке:

$$\Delta U_{н} = \Delta I_{к} R_{н} = K_i \Delta I_{э} R_{н} \approx \alpha \frac{\Delta U_{э}}{R_{вх.об}} R_{н},$$

поэтому динамический коэффициент усиления по напряжению оказывается равным:

$$K_u = \frac{\Delta U_{\Pi}}{\Delta U_{\text{э}}} = \alpha \frac{R_{\Pi}}{R_{\text{вх.об}}}. \quad (9-12)$$

При $R_{\Pi} \gg R_{\text{вх.об}}$ динамический коэффициент усиления по напряжению оказывается много больше единицы:

$$K_u \gg 1.$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_{\text{к}} \Delta U_{\Pi}}{2} \frac{2}{\Delta I_{\text{э}} \Delta U_{\text{э}}} = K_i K_u = \alpha^2 \frac{R_{\Pi}}{R_{\text{вх}}} \gg 1. \quad (9-13)$$

Усилительные свойства транзисторов можно объяснить следующим образом. Приращения токов в цепи коллектора и эмиттера примерно одинаковы, но ток коллектора несет с собой большую энергию, так как потенциал коллектора $U_{\text{к}} \gg U_{\text{э}}$ и он протекает по большему сопротивлению нагрузки: $R_{\Pi} \gg R_{\text{вх.об}}$. Поэтому одинаковые приращения токов связаны с различными приращениями напряжений: $\Delta U_{\Pi} \gg \Delta U_{\text{э}}$.

Динамические характеристики транзистора, включенного по схеме с ОБ для усилительного каскада на сопротивлениях, строятся на выходных (коллекторных) характеристиках аналогично тому, как это делается на анодных характеристиках пентода или вакуумного триода.

Уравнение динамической коллекторной характеристики имеет следующий вид:

$$U_{\text{к}} = E_{\text{к}} - I_{\text{к}} R_{\Pi}. \quad (9-14)$$

Это уравнение прямой линии, которая проводится через две точки, отложенные на осях координат. Точка на оси абсцисс соответствует напряжению источника питания коллектора $E_{\text{к}}$, а точка на оси ординат определяется уравнением $I_{\text{к}} = E_{\text{к}}/R_{\Pi}$.

Построение динамической коллекторной характеристики показано на рис. 9-24,б. Рабочая точка характеристики задается током эмиттера $I_{\text{э0}}$, который выполняет функцию, аналогичную напряжению сеточного смещения в лампе. Напряжение питания коллекторной батареи $E_{\text{к}}$

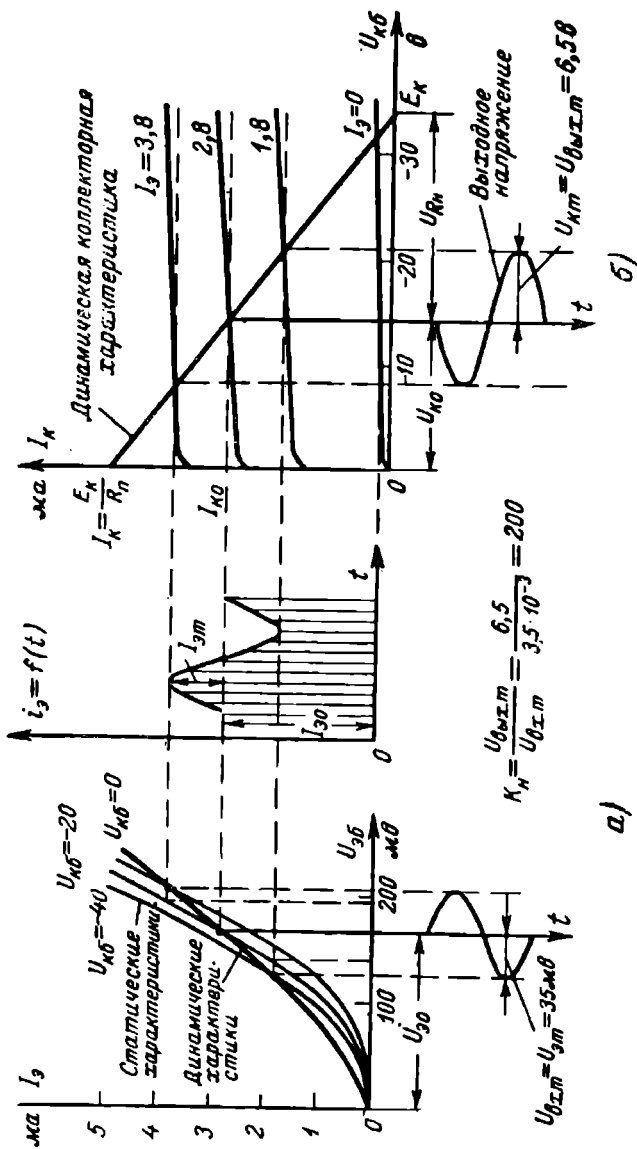


Рис. 9-24. Построение входной (а) и выходной (б) динамических характеристик транзистора в схеме с ОБ.

равно сумме падения напряжений на нагрузочном сопротивлении U_{RH} и на коллекторе в рабочей точке U_{K0} . Данная характеристика устанавливает зависимость коллекторного тока от коллекторного напряжения (и наоборот) в динамическом режиме.

На рис. 9-24,а изображена входная динамическая характеристика, устанавливающая зависимость между входным током (ток эмиттера $I_э$) и входным напряжением (напряжение эмиттера $U_э$) в динамическом режиме:

$$I_э = \Psi(U_э) \text{ при } E_K; R_H = \text{const.}$$

Для сравнения эта характеристика нанесена на семействе статических входных характеристик. Из рисунка видно, что она мало отличается от входных статических характеристик (имеет лишь несколько меньший наклон).

Согласно сделанным построениям можно видеть, что под действием переменного напряжения сигнала ток эмиттера будет изменяться. При изменении тока эмиттера начнет изменяться и ток коллектора, который в свою очередь вызовет изменения коллекторного напряжения. При правильном выборе сопротивления нагрузки ($R_H \gg R_{вх.об}$) амплитуда переменной составляющей коллекторного напряжения $U_{км}$ (амплитуда выходного напряжения $U_{вых м}$) будет во много раз превышать амплитуду переменной составляющей эмиттерного напряжения $U_{эм}$ (амплитуду усищаемого сигнала $U_{вхт} = U_{см}$):

$$U_{км} \gg U_{эм}.$$

На выход усилительной схемы поступает только переменная составляющая, которая проходит через разделительный конденсатор C_p , постоянная же составляющая коллекторного напряжения U_{K0} пройти через разделительный конденсатор не может.

Усилитель на транзисторе по схеме с ОЭ и питанием от двух источников показан на рис. 9-25. Усиливаемый сигнал подается в цепь базы, следовательно, входным током здесь является не ток эмиттера, а ток базы, приращения которого относительно малы. Поэтому входное сопротивление схемы с ОЭ больше, чем выходное сопротивление схемы с ОБ:

$$R_{вх.об} = \frac{\Delta U_б}{\Delta I_б} = \frac{\Delta U_э \beta}{\Delta I_э \alpha} = R_{вх.об} \frac{\beta}{\alpha} \approx R_{вх.об} \beta. \quad (9-15)$$

Так как

$$\Delta I_{\text{б}} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\beta} = \frac{\Delta I_{\text{в}} \alpha}{\beta},$$

$$\Delta U_{\text{б}} = \Delta U_{\text{о}}.$$

Динамический коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = \frac{\Delta U_{\text{н}}}{\Delta U_{\text{б}}} = \frac{\Delta U_{\text{н}}}{\Delta U_{\text{в}}} = \alpha \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вх.об}}}. \quad (9-16)$$

При одинаковой нагрузке коэффициенты усиления по напряжению в обеих схемах равны.

Коэффициент усиления по мощности

$$K_{\text{п}} = K_i K_u \approx \beta \alpha \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вх.об}}}, \quad (9-17)$$

т. е. в β раз больше, чем у схемы с общей базой.

Схема усилителя с ОК (рис. 9-26). Сигнал в схеме с общим коллектором подается на базу, нагрузка включена в цепь эмиттера, поэтому такую схему можно назвать схемой с эмиттерным выходом. Поскольку на нагрузке выделяется напряжение несколько меньше входного напряжения, следовательно, схема ОК усиления по напряжению не дает.

Усиление по току схемы ОК равно:

$$\frac{\Delta I_{\text{в}}}{\Delta I_{\text{б}}} = \frac{\Delta I_{\text{н}}}{\alpha \Delta I_{\text{б}}} = \frac{\beta}{\alpha} \approx \beta.$$

Соответственно усиление по мощности будет большим — равным β .

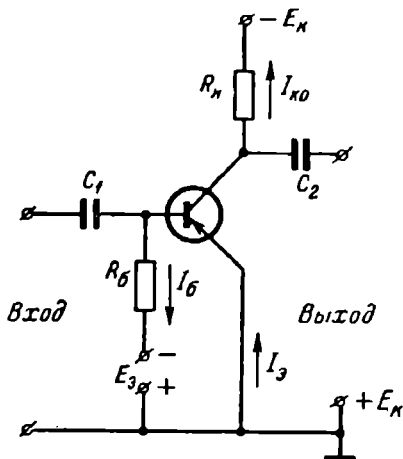


Рис. 9-25. Схема усилителя с ОЭ и двумя источниками питания.

В отличие от усилительных схем на электронных лампах полупроводниковые схемы обладают некоторыми специфическими особенностями:

1. В любой из схем включения транзистора во входной цепи протекает ток усиливаемого сигнала, следовательно, расходуется и мощность. Поэтому любой из уси-

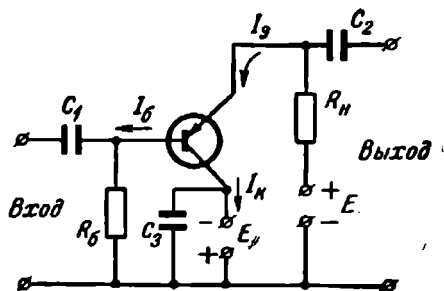


Рис. 9-26. Схема усилителя с ОК.

лительных каскадов на полупроводниковых триодах можно рассматривать как усилитель мощности.

2. Входное сопротивление схем не только конечно, но и относительно мало, особенно в схемах с общей базой и общим эмиттером, а выходные сопротивления относительно велики, что вызывает известные затруднения при согласовании отдельных каскадов.

9-15. ТРАНЗИСТОР КАК АКТИВНЫЙ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК

Свойства транзистора могут быть хорошо изучены, если его рассматривать как активный четырехполюсник. На рис. 9-27 изображен четырехполюсник в общем виде. Стрелками показаны условно направления токов и напряжений, принятые при исследовании четырехполюсника. При исследовании свойств транзисторов обычно интересуются только переменными составляющими токов и напряжений, поэтому U_1 , U_2 , I_1 и I_2 — это действующие значения переменных токов и напряжений.

Четырехполюсники подразделяются на два вида: пассивные и активные. В пассивных четырехполюсниках на выходе мощность не увеличивается, а в активных происходит увеличение мощности. Пассивным четырехполюсником можно считать трансформатор, а активным —

электронную лампу и транзистор, когда на вход подается переменное напряжение.

Четырехполюсник характеризуется уравнениями, выражающими зависимость напряжений на входе и на выходе от протекающих токов:

$$U_1 = R_{11}I_1 + R_{12}I_2; \quad (9-18)$$

$$U_2 = R_{21}I_1 + R_{22}I_2. \quad (9-19)$$

Например, для транзистора в схеме с ОБ будем иметь:

$$U_1 = U_э; \quad I_1 = I_э; \quad I_2 = -I_к; \quad U_2 = U_н = U_к.$$

Согласно теории четырехполюсников приведенные уравнения расшифровываются следующим образом. Напряжение U_1 на входе четырехполюсника равно сумме

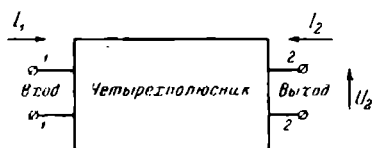


Рис. 9-27. Четырехполюсник.

падения напряжений от протекающего тока в первичной цепи I_1 через сопротивление этой цепи R_{11} и тока I_2 , протекающего во вторичной цепи через сопротивление обратной связи R_{12} . Напряжение на выходе четырехполюсника

U_2 равно выходному току I_2 , умноженному на выходное сопротивление R_{22} , плюс падение напряжения от первичного тока I_1 на сопротивлении усиления R_{21} .

Параметры сопротивлений четырехполюсника считаются параметрами при холостом режиме работы, так как измеряются они при разомкнутой входной или выходной цепи для переменного тока. Сущность параметров сопротивлений R_{11} , R_{22} , R_{21} и R_{12} выявится из последующих рассуждений.

Эквивалентная Т-образная схема транзистора. На рис. 9-28 приведена Т-образная усилительная схема транзистора с заземленной базой (ОБ). Транзистор изображен тремя сопротивлениями, соединенными в виде буквы Т. Сопротивление $r_э$ означает сопротивление эмиттерного перехода. Это сопротивление мало (порядка десятков ом), так как эмиттерный переход представляет собой диод, включенный в пропускном направлении. Сопротивление $r_к$ велико (порядка сотен килоом), так как коллекторный переход представляет

собой диод, включенный в обратном направлении. Сопротивление r_6 — сопротивление базы, оно находится в пределах 100—300 ом.

Последовательно с сопротивлением коллектора включен эквивалентный генератор напряжения, который указывает на то, что четырехполюсник активный и в выходной цепи транзистора происходит усиление сигнала. Электродвижущая сила генератора пропорциональна входному току и равна произведению переменной состав-

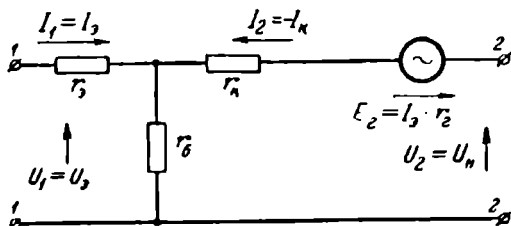


Рис. 9-28. Эквивалентная T-образная схема транзистора как активного четырехполюсника (схема ОБ).

ляющей входного тока на коэффициент пропорциональности r_n , который имеет размерность сопротивления $E_r = I_3 r_n$. При рассмотрении усилительных свойств лампы последняя также заменяется генератором напряжения в анодной цепи с э. д. с. в μ раз больше входного напряжения: $E_r = \mu U_c$.

Параметры сопротивлений четырехполюсника в режиме холостого хода R_{11} , R_{22} , R_{21} и R_{12} целиком могут быть применены к транзистору. Следует помнить, что первая цифра индекса относится к напряжению, а вторая — к току. Измерение параметров сопротивлений транзисторов может быть произведено по схеме рис. 9-29. Для того чтобы параметры получились чисто активными, частота переменного тока берется небольшой (400—1000 гц). Принцип измерения параметров сопротивлений основан на том, что на неизвестных сопротивлениях R_{11} , R_{22} , R_{21} и R_{12} измеряются напряжения, создаваемые известным по величине переменным током (метод вольтметра-амперметра).

Разомкнем выходную цепь по переменному току (понятие «размыкание цепи по переменному току» означает,

что цепь по переменному току имеет очень большое сопротивление, а режим по постоянному току не нарушится). Осуществляется это включением последовательно в цепь индуктивности, тогда $I_2' = 0$.

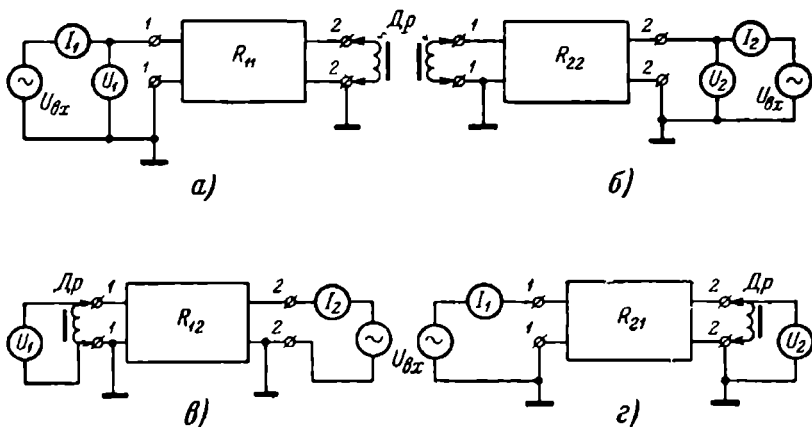


Рис. 9-29. Схемы измерения R -параметров транзистора.

Решая уравнения (9-18) и (9-19), получаем:

$$U_1 = R_{11} I_1; \quad (9-20)$$

$$U_2 = R_{21} I_1. \quad (9-21)$$

Из формулы (9-20) определим входное сопротивление четырехполюсника:

$$R_{11} = \frac{U_1}{I_1}, \quad I_2' = 0.$$

При измерении R_{11} входной сигнал подается на вход четырехполюсника; напряжение также измеряется на входе. Этот параметр и является входным сопротивлением транзистора при разомкнутой выходной цепи. Входное сопротивление транзистора невелико (порядка сотни ом).

Подставив в уравнения (9-18) и (9-19) $I_1 = 0$, получим выходное сопротивление четырехполюсника:

$$R_{22} = \frac{U_2}{I_2}; \quad I_1 = 0. \quad (9-22)$$

Этот параметр и представляет выходное сопротивление транзистора при разомкнутой входной цепи. Сигнал подается в цепь коллектора, напряжение измеряется между коллектором и базой. Выходное сопротивление транзистора весьма велико, значительно больше входного сопротивления — оно достигает 1 *Мом*.

По формуле (9-21) можно определить сопротивление усиления четырехполюсника R_{21} . Оно характеризует усилительные свойства четырехполюсника, т. е. показывает зависимость напряжения на выходе от изменения тока на входе четырехполюсника:

$$R_{21} = \frac{U_2}{I_1}; I_2 = 0. \quad (9-23)$$

В цепь, где измеряется ток, подается сигнал, а цепь, в которую включается электронный вольтметр (так как он имеет большое входное сопротивление), можно считать разомкнутой. При измерении R_{21} сигнал подается на вход четырехполюсника, а напряжение измеряется на выходе. Сопротивление R_{21} для транзистора относительно велико (порядка 1 *Мом*).

Сопротивление обратной связи

$$R_{12} = \frac{U_1}{I_2}; I_1 = 0. \quad (9-24)$$

Сопротивление обратной связи показывает, какое напряжение возникает на входе четырехполюсника U_1 , если в выходной цепи течет ток I_2 . Для измерения R_{12} сигнал подается на выход четырехполюсника; напряжение измеряется на входе. Этот параметр и является сопротивлением обратной связи транзистора. Сопротивление R_{12} для транзистора невелико и находится в пределах 50—300 *ом*. Сопротивление обратной связи в транзисторах действует аналогично обратной связи в схемах на вакуумных лампах.

Перечисленные параметры сопротивлений, называемые внешними параметрами, изменяются в зависимости от схемы включения. Сопротивления транзистора r_3 , r_6 , r_k и r_T считаются внутренними или физическими параметрами, и они не изменяются от схемы включения, а зависят только от типа транзистора.

Из эквивалентной схемы транзистора, включенного по схеме с ОБ (рис. 9-28), следует, что

$$R_{11} = r_э + r_б; \quad (9-25)$$

$$R_{22} = r_к + r_б; \quad (9-26)$$

$$R_{12} = r_б; \quad (9-27)$$

$$R_{21} = r_г + r_б. \quad (9-28)$$

Зная внешние параметры транзистора, можно определить его внутренние параметры:

$$r_э = R_{11} - R_{12}; \quad (9-29)$$

$$r_б = R_{12}; \quad (9-30)$$

$$r_к = R_{22} - R_{12}; \quad (9-31)$$

$$r_г = R_{21} - R_{12}. \quad (9-32)$$

Сопротивления $r_г$ и $r_к$ примерно равны:

$$r_г = \alpha r_к \approx r_к. \quad (9-33)$$

При измерении каждого из параметров транзистора необходимо следить за тем, чтобы по постоянному току всегда цепи эмиттера и коллектора были бы замкнуты.

Параметры транзисторов измеряются при малых сигналах. Это требование обусловлено следующими обстоятельствами. Теория четырехполюсника разработана для линейной системы, подчиняющейся закону Ома, параметры которой не зависят от величины сигнала. Транзистор является нелинейным прибором, что видно из его характеристик. При малых амплитудах входного напряжения рабочий участок характеристики невелик и транзистор можно рассматривать как линейный активный четырехполюсник.

9-16. *h*-ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРА

Осуществить холостой режим работы по переменному току на выходе транзистора для измерения его параметров R_{21} и R_{22} очень трудно ввиду большого сопротивления коллекторного перехода. Потребовалось бы включить в цепь коллектора индуктивное сопротивление, превышающее сопротивление коллекторного перехода.

Поэтому, помимо рассмотренных параметров сопротивлений, где за независимые переменные приняты только токи (I_1 и I_2), вводятся h -параметры, в которых независимыми переменными являются как входной ток I_1 так и выходное напряжение U_2 . Индексы у h -параметров двузначные; первая цифра относится к числителю дроби, а вторая — к знаменателю.

Четырехполюсник в системе h -параметров характеризуется следующими уравнениями:

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2; \quad (9-34)$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2. \quad (9-35)$$

Приравняв в уравнении (9-34) $U_2=0$, получим режим короткого замыкания на выходе. Тогда $h_{11} = U_1/I_1$ выражает входное сопротивление транзистора в схеме ОБ. Следует заметить, что параметры R_{11} и h_{11} хотя и выражают входные сопротивления триода, но они не равны между собой. R_{11} определяется в холостом режиме, а h_{11} — в режиме короткого замыкания ($U_2=0$).

Приравняв в уравнении (9-35) $U_2=0$, получим:

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (9-36)$$

Параметр h_{21} представляет собой отношение токов выходного к входному в режиме короткого замыкания на выходе, т. е. является коэффициентом усиления по току. В схеме ОБ: $\alpha = h_{21}$, в схеме ОЭ $\beta = h_{21}$.

Если приравнять нулю входной ток I_1 , т. е. осуществить режим холостого хода на входе, то получим:

$$h_{12} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (9-37)$$

Параметр h_{12} является обратным коэффициентом усиления триода по напряжению. Этот параметр означает, какая часть напряжения с выхода транзистора поступает на его вход, т. е. характеризует коэффициент обратной связи по напряжению.

Из уравнения (9-35) при $I_1=0$ получим:

$$h_{22} = \frac{I_2}{U_2} = \frac{1}{R_{22}}. \quad (9-38)$$

Параметр h_{22} характеризует проводимость выхода транзистора при разомкнутом его входе ($h_{22} \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ ом}$). Следовательно, чем меньше проводимость, тем больше выходное сопротивление транзистора.

Измерение h -параметров производится по схемам, приведенным на рис. 9-30.

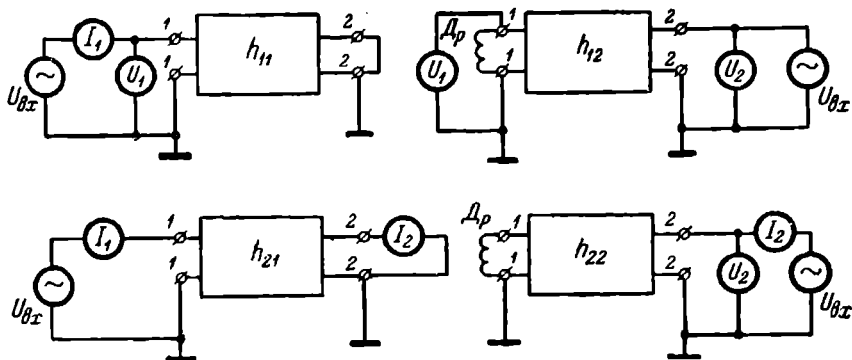


Рис. 9-30. Схемы измерения h -параметров транзистора.

Параметры h можно определить и по статическим характеристикам транзистора (рис. 9-31). Применительно к схеме с ОБ будем иметь:

$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} = -\frac{\Delta U_{\text{в}}}{\Delta I_{\text{в}}} \text{ при } \Delta U_{\text{к}} = 0;$$

$$U''_{\text{к.б}} = \text{const.}$$

Приращения $\Delta U_{\text{в}}$ и $\Delta I_{\text{в}}$ определяются по треугольнику abc (рис. 9-31,а), построенному на входной характеристике, снятой при $U_{\text{к.б}} = U''_{\text{к.б}} = \text{const.}$

$$h_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\Delta U_{\text{в}}}{\Delta U_{\text{к}}} \text{ при } \Delta I_{\text{в}} = 0;$$

$$I''_{\text{в}} = \text{const.}$$

Приращения $\Delta U_{\text{в}}$ и $\Delta U_{\text{к}}$ определяются по прямой ac (рис. 9-31,а), где $\Delta U_{\text{к}} = U''_{\text{к.б}} - U'_{\text{к.б}}$:

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{в}}} \text{ при } \Delta U_{\text{к}} = 0;$$

$$U''_{\text{к}} = \text{const.}$$

Приращения ΔI_K и ΔI_3 определяются по прямой de (рис. 9-31,б), где $\Delta I_3 = I'_3 - I''_3$:

$$h_{22} = \frac{I_2}{U_2} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_K} \text{ при } \Delta I_3 = 0;$$

$$I''_3 = \text{const.}$$

Приращения ΔI_K и ΔU_K находятся из треугольника mkn (рис. 9-31,б).

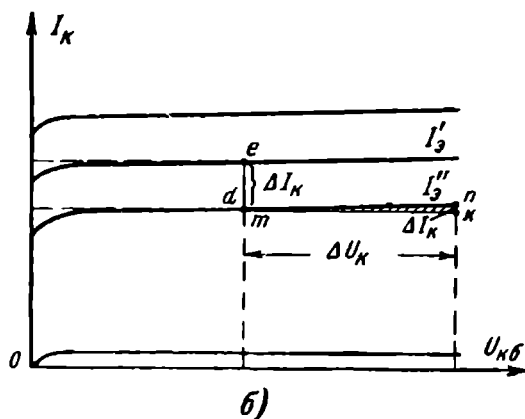
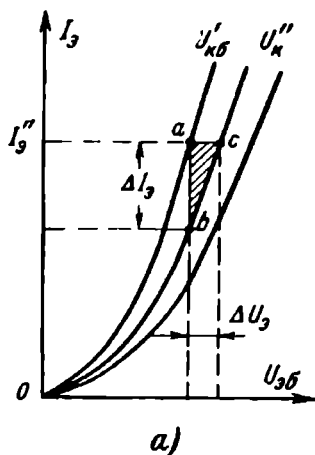


Рис. 9-31. Определение h -параметров по статическим характеристикам.

Зная h -параметры, можно определить внутренние параметры эквивалентной схемы с общей базой из следующих соотношений:

$$r_{\text{в}} = h_{11} \frac{h_{12}}{h_{22}} (1 + h_{21}); \quad (9-39)$$

$$r_{\text{б}} = \frac{h_{12}}{h_{22}}; \quad (9-40)$$

$$r_{\text{к}} = \frac{1}{h_{22}} (1 - h_{12}); \quad (9-41)$$

$$r_{\text{г}} = \frac{1}{h_{22}} (h_{21} - h_{12}). \quad (9-42)$$

9-17. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРОВ

Характеристики транзисторов и их параметры сильно зависят от температуры окружающей среды. Наибольшее изменение претерпевает обратный ток коллектора $I_{\text{к0}}$. При изменении температуры от $+25^{\circ}\text{C}$ до $+75^{\circ}\text{C}$ ток

$I_{\text{к0}}$ увеличивается примерно в 20 раз. Поскольку ток коллектора $I_{\text{к}} = I_{\text{к0}} + \alpha I_{\text{э}}$, то увеличенный ток коллектора вызывает изменение режима и создает дополнительный нагрев транзистора, отчего выходная мощность, которую можно снять с транзистора, уменьшается. В целях повышения отдаваемой мощ-

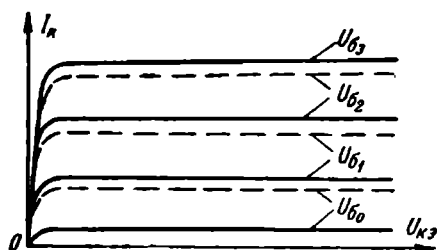


Рис. 9-32. Влияние температуры на изменение положения выходных характеристик ОЭ.

ности применяются теплоотводы, изготовленные из меди или черного алюминия.

Сильная температурная зависимость $I_{\text{к0}}$ изменяет положение характеристик. Влияние температуры на изменение положения, например, выходных характеристик показано на рис. 9-32. Характеристики, изображенные сплошными линиями, соответствуют работе транзистора

при комнатной температуре, а пунктирными линиями — повышенной.

Из параметров транзистора менее всего изменяется с температурой коэффициент усиления по току α .

9-18. ЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА И ШУМЫ ТРАНЗИСТОРОВ

Частотные свойства транзисторов характеризуются граничной частотой усиления по току. Под граничной частотой $f_{гр}$ понимается частота, при которой усиление уменьшается на 3 дБ, т. е. составляет 0,7 от максимального усиления на низкой частоте. Граничная частота обратно пропорциональна квадрату толщины базы, т. е. с уменьшением толщины базы в 2 раза предельная частота увеличится в 4 раза. В справочниках для схемы ОБ приводится граничная частота f_{α} . В схеме ОЭ граничная частота f_{β} меньше f_{α} примерно в β раз:

$$f_{\beta} = \frac{f_{\alpha}}{\beta}. \quad (9-43)$$

Помимо f_{α} и f_{β} , частотные свойства транзисторов характеризуются еще частотой генерации, обозначаемой $f_{г}$. Под частотой генерации понимается предельная частота усиления по мощности, при которой коэффициент усиления по мощности падает до единицы $f_{г} > f_{\alpha} > f_{\beta}$. Граничная частота транзисторов зависит еще от междуэлектродных емкостей эмиттерного и коллекторного $p-n$ переходов. Особенно влияет коллекторная емкость $C_{к}$. Чем больше емкость перехода, тем меньше частота генерации. Емкость $C_{к}$ в схеме с заземленной базой составляет 30—50 пф, а в схеме с заземленным эмиттером она повышается до 200 пф. Для уменьшения коллекторной емкости требуется уменьшить поверхность коллектора. Однако с уменьшением поверхности уменьшаются коэффициент усиления по току, а также допустимая величина тока коллектора и предельная рассеиваемая мощность на коллекторе.

Шумы в транзисторах складываются из следующих основных составляющих: 1) тепловых; 2) дробовых; 3) шумов токораспределения; 4) шумов за счет обратной связи сопротивления базы и др.

Шумы, вызываемые тепловым движением носителей зарядов, аналогичны шумам электронных ламп. Процесс перехода основных носителей через потенциальный барьер аналогичен процессу эмиссии электронов. При эмиссии электронов в анодном токе появляется шумовая составляющая дробового эффекта. Аналогичный эффект наблюдается и при прохождении носителей тока через $p-n$ переход.

Известно, что ток эмиттера распределяется между базой и коллектором. Ток базы в основном возникает за счет рекомбинации неосновных носителей в базе. Этот процесс носит случайный характер, что и порождает дополнительную шумовую составляющую. Шумы, появляющиеся в сопротивлении базового слоя, возрастают с увеличением сопротивления базы. Шумы увеличиваются также при загрязнении $p-n$ переходов продуктами травления при их изготовлении. Основным способом уменьшения шумов заключается в применении более низкоомного материала базы полупроводника.

Поскольку транзистор представляет собой усилитель мощности, то за единицу измерения шумов принимается коэффициент шума, выражаемый обычно в децибелах. Под коэффициентом шума понимается отношение полной мощности шумов на выходе транзистора к мощности шумов на его входе, вызванной шумами сопротивления источника сигнала.

9-19. МАТЕРИАЛ, ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

Материал. Основными материалами для изготовления транзисторов являются германий и кремний.

Некоторые соединения металлов, называемые «интерметаллическими», обладают полупроводниковыми свойствами, превосходящими германий и кремний. Наилучшими полупроводниковыми свойствами обладают соединения элементов III и IV групп периодической системы. Например, сурьмянистый индий ($InSb$) представляет собой полупроводник, полученный путем соединения металлов индия (III группа) и сурьмы (IV группа). При трехвалентных электронах у каждого атома индия и пятивалентных у каждого атома сурьмы приходится четыре электрона на каждую молекулу сурьмянистого ин-

дия, что позволяет отнести такие соединения по своим свойствам к элементам IV группы. Температура плавления InSb 936°C .

Для получения электронной проводимости в полупроводник добавляется примесь шестивалентного элемента — селен или теллур; дырочная проводимость получается при добавлении элемента II группы, например цинка или кадмия. Сурьмянистый индий обладает неизмеримо лучшими высокочастотными свойствами, чем германий и кремний. Перспективным материалом является еще сурьмянистый алюминий (AlSb), обладающий значительно лучшими, чем кремний или германий, выпрямительными свойствами. Сурьмянистый алюминий является к тому же и высокотемпературным материалом (температура плавления 1080°C).

Технология изготовления транзисторов. Рассмотрим в общем виде технологию изготовления сплавных транзисторов (рис. 9-33).

Кристалл германия или кремния при помощи алмазных пил распиливается на блоки толщиной примерно 10 мм, из которых резами круглой формы вырезают цилиндры диаметром 10 мм — «карандаши» (рис. 9-33,а). Затем цилиндры разрезают на диски толщиной 1—1,5 мм (рис. 9-33,б), которые, как правило, получают с шероховатой поверхностью. На специальных станках-автоматах диски шлифуются, после чего они травятся в пергидроле для удаления дефектов решетки кристалла на поверхности и очистки кристалла от загрязнения. Путем травления диски кристалла можно довести до требуемой толщины.

Сборка p - n переходов производится в специальных кассетах. Снизу диск из чистого индия — коллектор. На него кладется германий (база), а поверх германия — лепесток из сплава индия с галлием. Это — эмиттер. Галлий добавляется к индию для уменьшения сопротивления эмиттера. После сборки кассеты помещаются в вакуумную или водородную печь (для устранения окисления), где индий сплавляется с германием, образуя p - n переходы (рис. 9-33,в). Полученный таким образом транзистор своими выводами припаивается к держателям, которые проходят через стеклянные бусинки в металлическом фланце. После этого транзистор закрывается металлическим колпачком, который защищает его от ме-

ханических повреждений. Колпачок приваривается к фланцу точечной или холодной сваркой для хорошей герметизации (рис. 9-33,з).

В зависимости от типа транзистора один из выводов — база или коллектор — соединяется с корпусом.

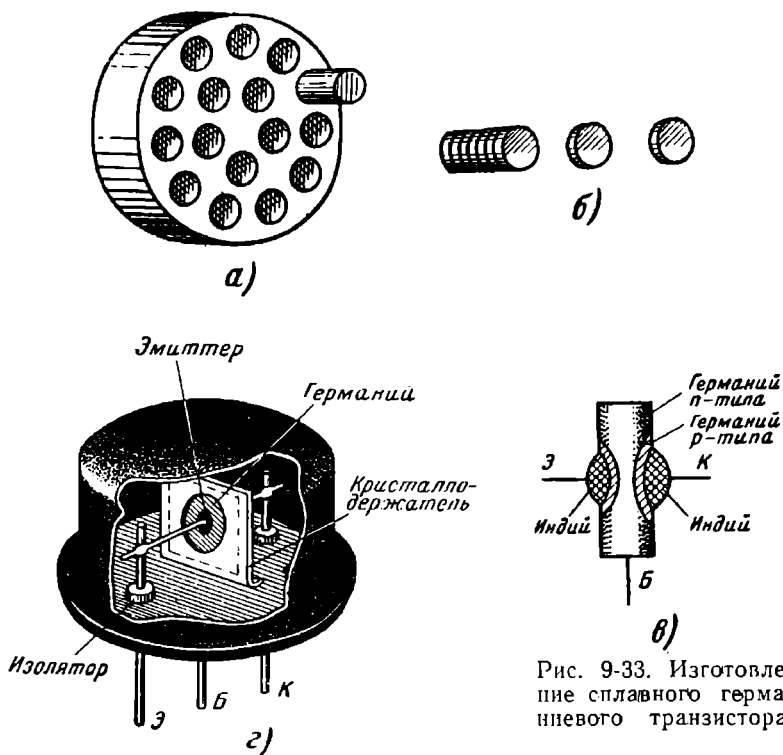


Рис. 9-33. Изготовление сплавного германиевого транзистора.

В рассмотренном методе изготовления «сплавных» транзисторов носители тока перемещаются через базу посредством диффузии. Для увеличения скорости носителей через базу и, следовательно, для повышения f_a применяют метод «дрейфа» переноса зарядов через базу. Электрическое поле в базе создается неравномерностью концентрации примесей в базе. Транзисторы такого типа называются дрейфовыми, а создание малой толщины базы и электрического поля в базе производится способом диффузии. Сплавные же транзисторы часто называют «бездрейфовые».

Эксплуатация транзисторов. При эксплуатации транзисторов необходимо придерживаться следующих правил:

1. Не рекомендуется производить включение и выключение транзисторов в схеме, находящейся под напряжением.

2. В случае необходимости включения транзисторов под напряжением следует присоединять в первую очередь базу, затем эмиттер и далее коллектор. При выключении транзистора первым отсоединяется коллектор, затем эмиттер и последним база. Если базу отсоединить прежде других электродов, то может произойти пробой *p-n* переходов.

3. Необходимо следить за правильным подключением полярности источников питания. Напряжение на электродах эмиттер—база составляет 1—2% от напряжения коллектор—база. Следует еще отметить, что хотя эмиттерный и коллекторный *p-n* переходы имеют одинаковый тип проводимости, но их нельзя считать взаимозаменяемыми. Для уменьшения сопротивления эмиттера к индию добавляется галлий. Кроме того, поверхность коллектора делают больше поверхности эмиттера. При подаче коллекторного напряжения на эмиттер эмиттерный переход будет пробит.

4. В цепь коллектора и эмиттера рекомендуется включать ограничительные сопротивления, так как чрезмерные скачки тока в цепях кристаллических триодов недопустимы.

5. Гибкие выводы транзисторов при пайке следует держать плоскогубцами со стороны корпуса для того, чтобы транзистор не перегрелся.

9-20. МАРКИРОВКА ТРАНЗИСТОРОВ

Транзисторы, разработанные ранее 1964 г. и выпускающиеся в настоящее время, имеют условное обозначение, состоящее из двух или трех элементов (табл. 9-3).

Первый элемент обозначения — буква П — для плоскостных транзисторов.

Второй элемент обозначения — число (номер), которое указывает на область применения.

Третий элемент обозначения — буква, указывающая разновидность прибора. Для полупроводниковых

Тип транзисторов	Номера
Германиевые маломощные низкочастотные (до 5 Мгц)	От 1 до 100
Кремниевые маломощные низкочастотные	От 101 до 200
Германиевые мощные низкочастотные	От 201 до 300
Кремниевые мощные низкочастотные	От 301 до 400
Германиевые высокочастотные маломощные	От 401 до 500
Кремниевые высокочастотные маломощные	От 501 до 600
Германиевые высокочастотные мощные	От 601 до 700
Кремниевые высокочастотные мощные	От 701 до 800

приборов, не имеющих разновидности типа, третий элемент условного обозначения отсутствует.

9-21. НОВЫЕ ТИПЫ ТРАНЗИСТОРОВ

Из новых типов высокочастотных транзисторов рассмотрим три: транзистор с дополнительным слоем собственной проводимости; канальный транзистор; поверхностно-барьерный транзистор.

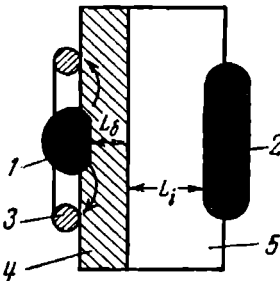


Рис. 9-34. Транзистор с дополнительным слоем собственной проводимости типа i .

Транзистор с дополнительным слоем собственной проводимости (типа i). На рис. 9-34 показана конструкция транзистора типа $p-n-i-p$. База представляет собой кристалл n -германия, примеси в котором распределены неравномерно. Вблизи эмиттера 1 создан слой 4 с достаточно высокой концентрацией доноров, обладающий вследствие этого малым сопротивлением. Остальная часть базы 5 выполнена из материала с собственной проводимостью, т. е. концентрация примесей здесь

низка. Сопротивление этого слоя весьма велико.

Ток эмиттер — база проходит по низкоомному слою от эмиттера к кольцевому выводу базы 3. Сопротивление базы для эмиттерного тока очень мало. К коллектору 2 может быть приложено достаточно большое напряжение смещения, так чтобы ширина коллекторного перехода простиралась до низкоомного слоя.

Емкость коллекторного перехода, определяемая шириной слоя L_i , невелика вследствие малой концентрации зарядов и больших значений $U_{к.б.}$. Вместе с тем при малой ширине базы L_b допустимая мощность рассеяния на коллекторном переходе не уменьшается.

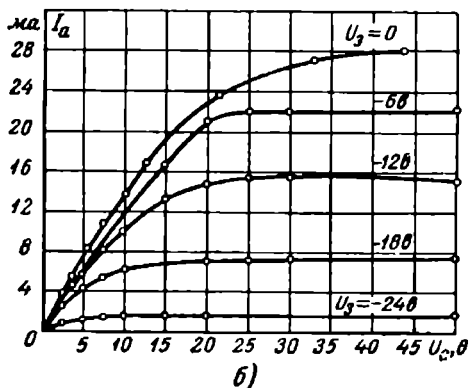
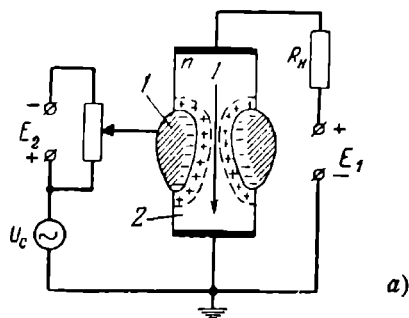


Рис. 9-35. Канальный транзистор.
а — устройство; б — выходные характеристики.

Канальный транзистор (полевой). На рис. 9-35,а показано схематически устройство канального транзистора. Такой транзистор имеет не два электронно-дырочных перехода, а один. Для образования его берется германиевая пластинка 2 толщиной 250—350 мк n -типа, на которую посередине вплавлен слой индия 1. К торцовым сторонам германиевого бруска 2 приварены невыпрямляющие контакты. Через сопротивление нагрузки R_n к ним подводится постоянное напряжение, положительное

ное по отношению к нижнему контакту. К слою индия относительно германиевого бруска подводится управляющее напряжение. Полярность этого напряжения такова, что потенциальный барьер электронно-дырочного перехода на границе индия и германия увеличивается. Запирающий слой лежит в основном в толще полупроводника (*n*-германия). На рис. 9-35 область, охватываемая электронно-дырочным переходом, обведена пунктирной линией.

Основные носители в германии (электроны) не могут преодолеть потенциальный барьер; часть объема *n*-германия оказывается для них запрещенной. Поэтому электроны в *n*-германии, перемещающиеся под действием разности потенциалов между торцовыми контактами, проходят вблизи кольца индия по узкому каналу. Ширина канала зависит от ширины запирающего слоя, а следовательно, от напряжения, приложенного между германием и индием. Если в цепь индиевого электрода подать переменное напряжение сигнала, то ширина канала будет изменяться в такт с мгновенным значением напряжения. С изменением ширины канала изменяется его сопротивление, а значит, и падение напряжения на самом германии и на сопротивлении нагрузки.

Канальный транзистор по принципу действия (управление напряжением) очень сходен с ламповым триодом, только электроны в нем перемещаются не в вакууме, а в германии. В этом приборе ток через канал создается основными носителями тока — электронами, тогда как в обычном транзисторе используется диффузия неосновных носителей.

Достоинством канального транзистора является:

- 1) стабильность характеристики при изменении температуры в широком интервале;
- 2) большое входное и выходное сопротивления (порядка 1 Мом), что приближает его по параметрам к ламповому пентоду.

К недостаткам канального триода следует отнести большие шумы (35—70 дб).

На рис. 9-35,б приведены характеристики канального транзистора.

Поверхностно-барьерный транзистор. Изучаемые в начале данной главы полупроводниковые приборы имеют *p-n* переходы, обусловленные изменением содержания

примесей в них. В транзисторе с поверхностными барьерами роль эмиттера и коллектора выполняют запирающие слои, возникающие на границах металлических электродов с полупроводниками.

Электронные энергетические уровни на поверхности *n*-германия могут значительно отличаться от уровней внутри кристалла. Электроны по законам квантовой механики всегда стремятся занять состояние с наименьшей

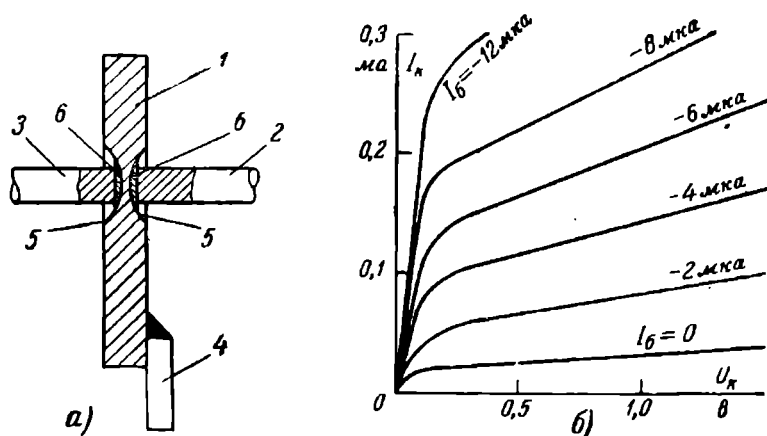


Рис. 9-36. Поверхностно-барьерный транзистор.
а — устройство; б — выходные характеристики.

энергией и будут скапливаться на поверхности кристалла, отталкивая остальные электроны от поверхности внутри кристалла, в результате чего образуется почти изолирующая область толщиной $\sim 2,5$ мк. Вследствие этого возникают поверхностные барьеры вблизи коллекторного и эмиттерного электродов.

При изготовлении поверхностно-барьерных транзисторов применяется метод струйного электрохимического травления и металлопокрытия (рис. 9-36, а). Струйное электрохимическое травление позволяет вытравить в германиевой пластинке 1 две строго соосные лунки 5 с толщиной перемычки 5—7 мк. Дно этих лунок покрывается цинком толщиной 100—120 мк, используемым как электрод. К цинковым электродам припаиваются никелевые контактные выводы: коллекторный 3 и эмиттерный 2. База 4 приваривается к германиевой пластинке 1.

Поверхностно-барьерные транзисторы — маломощные. Они выполняются в герметичном металлическом корпусе.

Поверхностно-барьерные транзисторы имеют следующие преимущества:

1) транзистор может работать на высоких частотах порядка 30—60 Мгц ($\lambda=5-10$ м);

2) напряжение источников питания требуется небольшое, порядка 3 в;

3) транзистор обладает низким уровнем шумов.

На рис. 9-36,б приведены выходные характеристики поверхностно-барьерного транзистора.

В заключение главы необходимо отметить, что в связи с недостатками старой системы классификации и обозначения полупроводниковых приборов утверждена новая, более совершенная система обозначений диодов и транзисторов, которая введена с конца 1963 г. В соответствии с этой системой вновь разработанным приборам присваиваются обозначения из четырех элементов.

Первый элемент — буква или цифра — обозначает исходный материал:

Г или 1 — германий;

К или 2 — кремний;

А или 3 — арсенид галлия.

Второй элемент — буква, указывающая класс или группу приборов:

Д — выпрямительные универсальные импульсные диоды;

Т — транзисторы;

В — варикапы;

А — сверхвысокочастотные диоды;

Ф — фотоприборы;

Н — неуправляемые многослойные переключающие приборы;

У — управляемые многослойные переключающие приборы;

И — туннельные диоды;

С — стабилитроны;

Ц — выпрямительные столбы и блоки.

Третий элемент — число, указывающее назначение или электрические свойства прибора.

Четвертый элемент — буква, указывающая разновидность типа из данной группы приборов.

Примеры обозначения полупроводниковых приборов:
ГТ105А — германиевый маломощный низкочастотный транзистор, разновидность типа А.
2Д505В — кремниевый импульсный диод, разновидность типа В.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислить признаки полупроводниковых материалов?
2. Преимущества и недостатки полупроводниковых приборов по сравнению с вакуумными?
3. Из каких материалов преимущественно изготавливаются полупроводниковые приборы?
4. Собственная и примесная проводимости и их обозначения.
5. Что называется электронно-дырочным переходом (*p-n* переходом) и каковы его свойства?
6. Что называется потенциальным барьером и как он образуется?
7. Для каких носителей тока (основных или неосновных) потенциальный барьер является препятствием?
8. Как подключить внешний источник питания к полупроводниковому диоду для получения прямого тока?
9. Начертить вольт-амперную характеристику полупроводникового диода — выпрямительного и опорного.
10. Как маркируются точечные и плоскостные диоды?
11. Что такое «транзистор»?
12. Изобразить схематически транзисторы типов *p-n-p* и *n-p-n* в схемах с общей базой, с общим эмиттером и с общим коллектором.
13. Начертить однокаскадные схемы усилителей низкой частоты ОБ, ОЭ, ОК.
14. Каков физический смысл параметров α и β ? Почему β больше α ?
15. Почему в усилителе на транзисторе (схема ОБ) получается усиление сигнала по напряжению и по мощности, хотя ток коллектора меньше тока эмиттера?
16. Каков физический смысл параметров четырехполюсника h_{11} , h_{22} , h_{21} и h_{12} . Размерность этих параметров?
17. Система маркировки.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ПРИЕМНЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ

10-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Приемная электронно-лучевая трубка представляет собой электровакуумный прибор, в котором электронный поток, эмиттируемый катодом, после фокусировки при-

нимает форму тонкого электронного луча, с помощью которого на экране трубки создается изображение. Следовательно, в приемных электронно-лучевых трубках происходит преобразование электрического сигнала в световое изображение. Идея использования электронно-лучевых трубок в телевидении принадлежит русскому ученому проф. Б. Л. Розингу (1907 г.).

Устройство электронно-лучевой трубки показано на рис. 10-1. Узкая часть трубки 1 получила название «гор-

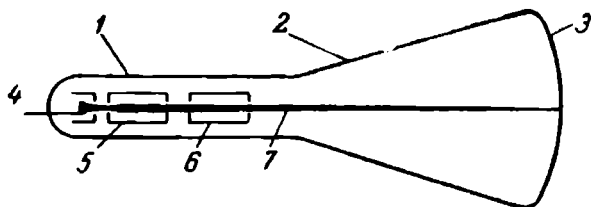


Рис. 10-1. Схема устройства электронно-лучевой трубки.

1 — горловина; 2 — конус; 3 — экран; 4 — катод; 5 — фокусирующая система; 6 — отклоняющая система.

ловина». С одной стороны горловина переходит в конус 2 или в цилиндр, оканчивающийся дном 3. С другой стороны горловины имеется цоколь для включения трубки в схему. Внутренняя сторона дна трубки покрывается люминофором, т. е. веществом, светящимся при бомбардировке его электронами, и называется экраном. Электроны эмиттируются катодом 4.

Для получения на экране изображения электронного луча в виде маленького светящегося пятна (точки) применяется фокусирующая система 5 — электростатическая или магнитная. Отклонение сфокусированного луча 7 осуществляется отклоняющей системой 6 — электростатическим или магнитным полями.

Электронно-лучевые трубки подразделяются в основном на три типа: 1) с электростатической фокусировкой; и электростатическим отклонением электронного луча; 2) с магнитной фокусировкой и магнитным отклонением луча; 3) с электростатической фокусировкой и магнитным отклонением луча.

10-2. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ ОТКЛОНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА

На рис. 10-2 показана электронно-лучевая трубка с электростатической фокусировкой и электростатическим отклонением электронного луча. В горловине трубки расположен подогревный оксидный катод 1, с которого вылетают электроны. За катодом следует управляющий электрод 2 (модулятор), представляющий собой металлический стакан с небольшим круглым отверстием (0,7—1 мм) в центре дна. Отверстие называется

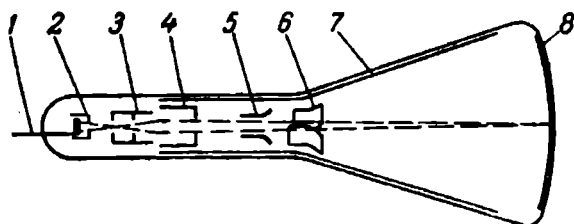


Рис. 10-2. Эскиз конструкции электронно-лучевой трубки с электростатической фокусировкой и электростатическим отклонением электронного луча.

диафрагмой. На управляющий электрод подается отрицательный потенциал порядка нескольких десятков вольт. Управляющий электрод выполняет две функции: во-первых, формирует электронный поток, который под действием отрицательного потенциала управляющего электрода «сжимается», превращаясь в луч, и, во-вторых, от величины его потенциала зависит количество электронов в луче, т. е. плотность электронного луча, а следовательно, и яркость светящейся точки на экране. Можно считать, что действие управляющего электрода сходно с действием управляющей сетки в лампе.

Далее по оси трубки располагаются еще два цилиндра — первый и второй аноды. Первый анод 3, находясь под положительным потенциалом в несколько сотен вольт, ускоряет движущийся от катода поток электронов. Ко второму аноду 4 подводится напряжение, достигающее в некоторых электронно-лучевых приборах десятков киловольт, и поток электронов покидает второй

анод с достаточно высокой скоростью. Кроме ускорения электронов, назначение анодов заключается в формировании узкого электронного пучка — фокусировании электронного потока. Вследствие различия потенциалов катода, модулятора, первого и второго анодов в пространстве между ними создаются неоднородные электрические поля — электронные линзы. Конфигурация электродов и их потенциалы подбираются таким образом, что вся си-

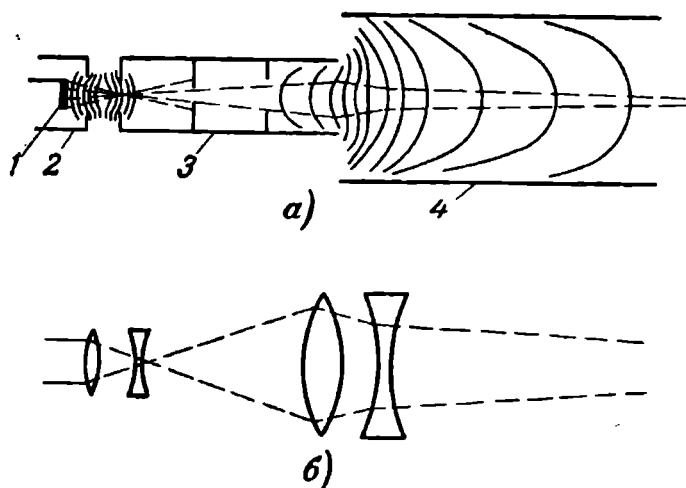


Рис. 10-3. Путь электронов в электростатических линзах трубки (а) и аналогия с оптическими линзами (б).

стема образует две электростатические линзы: первую — между модулятором и ускоряющим электродом и вторую — между ускоряющим электродом и вторым анодом. Проходя через эти линзы, электроны образуют узкий сходящийся у экрана δ пучок — электронный луч. Вся система электродов крепится на траверсах и образует единое устройство, называемое электронной пушкой или электронным прожектором.

На рис. 10-3,а показаны схематически расположение эквипотенциальных поверхностей и путь электронов в электростатических линзах трубки, а на рис. 10-3,б приведен их оптический аналог. Как видно из рисунка, вылетающие под разными углами из катода электроны

проходят через диафрагму управляющего электрода и пересекаются в одной точке, называемой фокусом. Затем электроны внутри первого анода распространяются веерообразно. Таким образом, имеем совместное действие двух электронных линз — собирающей и рассеивающей. Поскольку действие собирающей линзы проявляется сильнее, чем рассеивающей, то в общем получается фокусировка электронного потока.

Если мысленно провести линию между первым и вторым анодом, то она разделит электрическое поле на две половины. Расходящийся электронный пучок в первом аноде, по выходе из него, фокусируется в ускоряющем поле. В области второго анода (диаметр второго анода больше диаметра первого анода) электронный луч рассеивается, так как напряженность поля уменьшается. Рассеивающая линза в сочетании с собирающей позволяет изменять фокусное расстояние этой системы линз и переносить точку пересечения электронов на экран, т. е. получать на экране трубки светящегося пятно возможно малого размера в виде точки. Для фокусировки луча достаточно изменить напряжение на одном из анодов. Обычно изменяют напряжение на первом аноде, который поэтому и называется фокусирующим.

После электронного прожектора электронный луч падает в отклоняющую систему электродов, состоящую из двух пар взаимно перпендикулярных пластин (рис. 10-2). Отклоняющая система предназначена для управления положением электронного луча в пространстве. Каждая пара пластин образует плоский конденсатор, и если потенциалы пластин различны, то между ними создается электрическое поле. Между пластинами электроны движутся в поперечном электрическом поле по параболической траектории и по выходе из пластин траектория их оказывается направленной по отношению к оси трубки под некоторым углом, величина которого зависит от разности потенциалов на пластинах и от размеров пластин. При отклонении луча в вертикальной плоскости разность потенциалов подается на горизонтальные пластины *б* (пластины *y*). Вертикальные пластины *а* (пластины *x*) отклоняют луч в горизонтальной плоскости.

Чувствительность электростатической трубки. Под чувствительностью электронно-лучевой

трубки понимается отношение отклонения электронного луча по экрану к отклоняющему напряжению:

$$s = \frac{h}{U} \text{ [мм/в]}.$$

Чувствительность трубки является важным ее параметром. Чувствительность пластин y , расположенных ближе к аноду, несколько выше чувствительности пластин x . Примерно чувствительность трубки $s = 0,15 \div 0,25 \text{ мм/в}$.

Так как отклонение электронного луча пропорционально величине отклоняющего напряжения, то, чем меньше приложенное напряжение для отклонения луча по экрану на одну и ту же величину, тем больше чувствительность трубки.

10-3. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ С МАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ И МАГНИТНЫМ ОТКЛОНЕНИЕМ ЛУЧА (КИНЕСКОПЫ)

На рис. 10-4,а показана магнитная фокусировка электронного луча, а на рис. 10-4,б — магнитное отклонение луча. Если в трубках с электростатической фокусировкой имеется полная аналогия между световой оптикой и

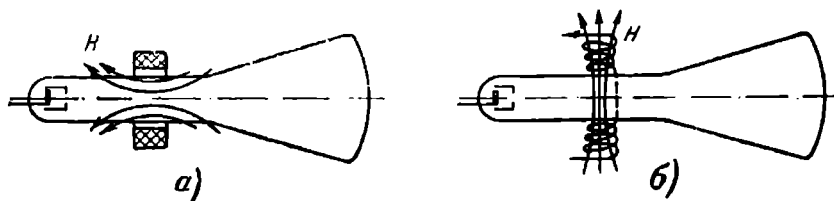


Рис. 10-4. Эскиз конструкции трубки с магнитной фокусировкой (а) и с магнитным отклонением (б).

электронно-оптической, то в магнитной фокусировке такой аналогии нет. Фокусировка электронного луча магнитным полем проявляется только по конечному результату — пересечению электронов в одной точке на экране трубки. Фокусирующая катушка надевается на горловину трубки, и она фокусирует только те электроны, которые влетают в поперечное магнитное поле катушки под небольшим углом к продольной оси трубки. Взаимодействуя с неоднородным магнитным полем, эти электроны

«прижимаются» к оси и фокусируются в точке, расположенной в плоскости экрана. Фокусное расстояние зависит от напряженности магнитного поля, т. е. от величины постоянного тока, протекающего через фокусирующую катушку.

Трубка с магнитной фокусировкой проще в конструктивном отношении. В ней имеется только один анод, который соединяется внутри трубки посредством пружинящих контактов с графитовым покрытием (аквадаг), нанесенным на внутреннюю сторону конуса и горловины трубки. Графитовое покрытие одновременно выполняет роль экрана трубки, защищающее от помех, вызванных электростатическими полями, искажающими изображение на экране. В трубках с электростатическим управлением графитовое покрытие присоединяется ко второму аноду.

В рассматриваемых трубках отклонение сфокусированного электронного потока осуществляется также магнитным полем, для создания которого используются две пары катушек, расположенные на горловине трубки рядом с фокусирующей катушкой. Луч отклоняется перпендикулярно силовым линиям магнитного поля катушек, т. е. горизонтально расположенные катушки отклоняют луч в вертикальном направлении и называются кадровыми. Вертикально расположенные катушки отклоняют луч в горизонтальном направлении и называются строчными.

10-4. КОМБИНИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ

Электростатическая система фокусировки луча более устойчива к изменению напряжения, чем магнитная к изменению тока, протекающего через фокусирующую катушку. Магнитная же система отклонения луча имеет лучшую линейность, чем электростатическая. Кроме того, она может обеспечить большие углы отклонения электронного луча, что позволяет получить большой размер экрана при относительно малой длине трубки. Поэтому иногда применяются комбинированные трубки, которые имеют электростатическую фокусировку и магнитную систему отклонения луча. Возможна и другая комбинация: магнитная фокусировка и электростатическая система отклонения луча, при которых отклонение луча осуществляется без потребления мощности.

Дно трубки круглой или прямоугольной формы имеет сферическую поверхность и с внутренней стороны покрывается слоем вещества (люминофором), который светится от бомбардировки его электронами. Такой слой со стеклом трубки называется экраном. Цвет свечения экрана зависит от состава входящих в него веществ. Виллемит, например, дает зеленое свечение, сернистый цинк — синий и т. д. Под действием примесей — активаторов — цвет свечения экрана может изменяться. При добавлении к сернистому цинку серебра экран дает светло-голубое свечение.

Свечение экрана под ударами падающих на него электронов объясняется переходом электронов атома люминофора в возбужденное состояние, т. е. электроны в атоме перемещаются на более удаленную орбиту. При возвращении электронов на свою прежнюю орбиту выделяется 1 квант лучистой энергии, что и вызывает свечение.

Люминофоры, применяемые для изготовления экрана, являются полупроводниками и обладают вторичной электронной эмиссией с $\sigma \geq 1$. Материал люминофора, не имеющий вторичной эмиссии, заряжался бы отрицательным зарядом от падающих на него электронов, что неизбежно привело бы к нарушению нормального хода луча. Вторичные электроны, создающие небольшой положительный заряд экрана, отводятся графитовым покрытием, находящимся под положительным потенциалом относительно катода.

Послесвечение экрана. После прекращения действия электронного луча, вызывающего свечение люминофора, экран трубки продолжает светиться еще некоторое время. Время, в течение которого яркость свечения экрана уменьшается до 1% от своего первоначального значения, называется временем послесвечения. Послесвечение условно делится на три группы: короткое (менее 0,01 сек), среднее (0,01—0,1 сек) и длительное (от 0,1 сек до 10 сек). Послесвечение зависит от состава люминофора и устройства экрана.

Телевизионные трубки — кинескопы — имеют короткое послесвечение. Длительное послесвечение в них недопустимо, так как движущееся изображение (число

кадров в секунду равно 25) на экране будет смазано вследствие наложения нового кадра на предыдущий, продолжающий еще свеститься.

Наоборот, в радиолокационных трубках применяется длительное послесвечение. Для получения длительного послесвечения экран изготавливается из двух слоев люминофора. Непосредственно на стекло наносится слой сернистого кадмия, обладающий длительным послесвечением желто-зеленого цвета. На этот слой накладывается слой сернистого цинка, имеющий синий цвет свечения с коротким послесвечением. Электронным лучом возбуждается ближайший к прожектору сернистый цинк, который своим светом вызывает свечение сернистого кадмия. Под непосредственным электронным возбуждением сернистого кадмия длительность послесвечения становится меньше, чем при световом его возбуждении. В табл. 10-1 приведены основные сведения о различных типах экранов.

Таблица 10-1

Тип экрана	Характеристика слоя	Цвет свечения	Время послесвечения	Основное применение
А	Однослойный тонкой структуры	Синий	Короткое	Осциллография
Б	Однослойный тонкой структуры	Белый	Короткое	Телесвидение
В	Двухслойный грубой структуры	Светло-желтый	Длительное	Радиолокация
И	Однослойный грубой структуры	Зеленый	Среднее	Осциллография
М	Однослойный грубой структуры	Голубой	Короткое	Осциллография

10-6. ТРУБКИ С ИОННОЙ ЛОВУШКОЙ

Долговечность электронно-лучевой трубки в среднем составляет не менее 750 ч. Одним из факторов, влияющих на долговечность трубки с магнитной системой отклонения луча, является ионное пятно (темная область в центральной части экрана). В этом месте разрушается люминофор экрана из-за бомбардировки его отрицательными ионами. Отрицательные ионы образуются

в области катода, когда к атому оксида, испаряющегося с катода, по пути «прилипает» электрон. Предотвратить появление ионного пятна возможно применением ионной ловушки. Ионная ловушка представляет собой «изогнутый прожектор» с корректирующим магнитом, который надевается на горловину трубки. Корректирующий магнит должен создавать необходимую напряженность магнитного поля и находится на месте изгиба электронного прожектора.

Принцип действия ионной ловушки (рис. 10-5) заключается в разделении траекторий электронов 2 и от-

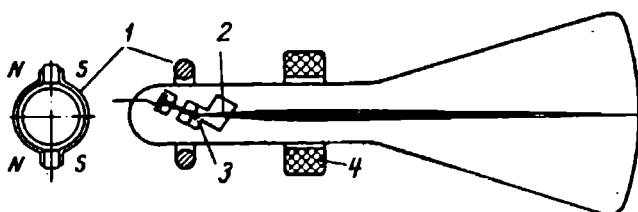


Рис. 10-5. Расположение электронно-оптической системы в трубке с ионной ловушкой.

1 — корректирующий магнит; 2 — электронный луч; 3 — ионный луч; 4 — фокусирующая катушка; 5 — анод.

рицательных ионов 3, которые первоначально направляются к оси трубки под некоторым углом. Затем электроны магнитным полем корректирующего магнита 1 отклоняются к экрану, а отрицательные ионы, имеющие большую массу, не изменяют своей траектории и притягиваются электродами прожектора, находящимися под положительным потенциалом. Следовательно, при отсутствии корректирующего магнита или его неправильном положении на горловине трубки экран не будет светиться. Корректирующий магнит первоначально устанавливают вблизи цоколя и вращают его вокруг горловины трубки на 360° , при этом ручка яркости должна находиться в положении «максимум». Если при этом экран не будет светиться, то понемногу отодвигают магнит от цоколя и снова вращают его. Когда экран засветится, то уменьшают его яркость. Надлежащее положение магнита определяется равномерной яркостью свечения экрана по всей его поверхности при установке

ручки регулятора яркости в среднее положение. Ток анода в этом случае будет минимальным.

Алюминированный экран. Если экран со стороны прожектора покрыт тонкой пленкой алюминия толщиной 0,5—1 мк, то можно обойтись без ионной ловушки с корректирующим магнитом. Роль ловушки будет выполнять сам алюминий. Электроны, летящие с большой скоростью, легко пробивают токопроводящую пленку алюминия и доходят до экрана, а массивные ионы задерживаются алюминием. В этом случае напряжение на второй анод подается повышенное — до 16 кв. Алюминиевая пленка увеличивает яркость изображения, действуя как зеркало.

10-7. ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ И МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ

Цельностеклянные электронно-лучевые трубки с прямоугольным экраном позволяют получить большую полезную площадь по сравнению с трубками круглого сечения. Дно прямоугольных трубок сваривается с конусом. Для повышения контрастности изображения оно изготавливается из дымчатого стекла. Размер таких трубок определяется диагональю прямоугольника экрана. Угол отклонения луча в них достигает 70°. Полная длина трубки вместе с горловиной достаточно велика: для трубки размером по диагонали 43 см, общая длина составляет 50 см, а для трубки с диагональю 53 см длина еще больше — 61 см. Таким образом, увеличение размера экрана телевизора требует увеличения габаритов футляра телевизора. В настоящее время в телевизорах применяют трубки с углом отклонения луча 110°, что сокращает общую длину трубки почти вдвое и тем самым уменьшает габариты телевизоров. Непременным условием для отклонения луча в пределах 110° является помещение отклоняющих катушек как на горловину трубки, так и на ее конусную часть.

Металлостеклянная трубка имеет металлический конус из хромированной листовой стали, который придает трубке прочность и хорошую электростатическую экранировку, защищающую от влияния различных внешних полей. Выводом анода служит металлический конус.

10-8. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Для получения большего изображения применяют проекционные трубки, размер экрана которых небольшой — от 5 до 13 см. Для получения четкого изображения на анод подается высокое напряжение порядка 15—25 кв. Изображение с экрана трубки при помощи светового оптического объектива проецируется на специальный выносной экран, размер которого может быть от 1 м² и больше.

Электронно-лучевые коммутаторы представляют собой быстродействующие безынерционные переключатели тока, применяемые для различных цепей. Переключение цепей осуществляется электронным лучом, движущимся вдоль неподвижных контактов, расположенных в электронно-лучевых трубках вместо экрана. Пучок электронов в такой трубке развертывают по кругу.

Для одновременного наблюдения двух электрических процессов, протекающих в различных участках схемы, применяют двухлучевые трубки. Они представляют собой два самостоятельных электростатических прожектора с отклоняющими пластинами, помещенными в одной трубке цилиндрической формы.

В тех случаях, когда требуется наблюдать на экране трубки быстрые периодические или кратковременные процессы, необходимо повысить яркость изображения, увеличивая энергию электронного луча. В специальных трубках с послеускорением осуществляется дополнительное ускорение электронов, пролетевших отклоняющую систему, за счет увеличения ускоряющего напряжения. Для этой цели внутри конусной части трубки помещают один или несколько дополнительных анодов, которые представляют собой проводящие покрытия, выполненные в виде тонкослойных колец. На эти аноды подается напряжение больше, чем на второй анод.

10-9. МАРКИРОВКА ТРУБОК

При маркировке электронно-лучевых трубок на первое место условного обозначения ставят цифру, указывающую на величину диаметра экрана круглой формы

Таблица 10-2

Маркировка	Напряжение на втором аноде, кВ	Фокусировка луча	Отклонение луча	Цвет свечения экрана	После свечения	Примечание
5ЛО38И	1	Электростатическая	Электростатическое	Зеленый	Среднее	—
5ЛО38М	1	То же	То же	Голубой	Короткое	—
13ЛО5А	22	" "	" "	Синий	Среднее	—
13ЛО48И	2,5	" "	" "	Зеленый	То же	С двумя прожекторами
6ЛК1Б	25	Магнитная	Магнитное	Белый	" "	Проектирование на зрительный экран
31ЛК2Б	12	То же	То же	Белый	" "	С ионной ловушкой
35ЛК2Б	14	Электростатическое	" "	Белый	" "	С ионной ловушкой
43ЛК3Б	16	То же	" "	То же	Короткое	С ионной ловушкой. Экран прямоугольный
43ЛК5Б	16	" "	" "	" "	То же	Алюминированный экран
43ЛК6Б	16	" "	" "	" "	" "	Угол отклонения луча 110°
53ЛК5Б	18	" "	" "	" "	" "	То же

или диагонали экрана прямоугольной формы, в сантиметрах. На втором месте стоят буквы, характеризующие систему фокусировки и отклонения луча: кинескопы с электростатической или магнитной фокусировкой и магнитным отклонением луча — ЛК. Осциллографические трубки с электростатической фокусировкой и электростатическим отклонением — ЛО, а с магнитным отклонением — ЛМ. На третьем месте стоит цифра, показывающая порядковый номер заводской разработки данной конструкции трубки. На последнем месте ставится буква, характеризующая цвет свечения экрана.

В табл. 10-2 приведены некоторые типы электронно-лучевых трубок.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение управляющего электрода трубки.
2. Параметр «чувствительность трубки по отклонению луча» и его размерность.
3. Какие имеются методы фокусировки и отклонения луча?
4. Что такое ионное пятно и ионная ловушка?
5. Какие преимущества имеет трубка с прямоугольным экраном по сравнению с круглым?
6. Из каких материалов изготавливаются экраны?
7. Как различить цвет свечения экрана по маркировке трубки?

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ИОННЫЕ ПРИБОРЫ

11-1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО

Ионными (газоразрядными) называются приборы, баллоны которых наполнены инертными газами или парами ртути. Ток, протекающий через газоразрядный прибор, состоит из электронов и ионов, образующихся вследствие ионизации нейтральных атомов или молекул газа.

Ионный прибор в простейшем виде состоит из стеклянного баллона, наполненного газом, и двух электродов — катода и анода, причем катод может быть накаливаемым или холодным (безнакальным) (рис. 11-1). Для наполнения прибора используются либо инертный газ (аргон, неон, ксенон, криптон), либо пары ртути.

Последовательно с прибором включаются источник напряжения и нагрузка.

Рассмотрим принцип действия ионного прибора с холодным катодом. Для ионизации газа необходимо наличие некоторого количества свободных электронов и ионов, которые всегда имеются в газах вследствие космического излучения и радиоактивного излучения земной коры. В ускоряющем электрическом поле электрон, направляясь к аноду, постепенно увеличивает свою энергию, и если энергия электрона будет достаточна для ионизации газа, то при ударе о молекулу из нее выбивается один или несколько электронов, а молекула превращается в положительный ион. Теперь к аноду направляются уже два электрона — первичный и новый, образовавшийся при ионизации, которые в свою очередь ионизируют следующие две молекулы газа, в результате чего получатся четыре электрона и три положительных иона. Ионизация, таким образом, принимает лавинообразный характер. Положительные ионы перемещаются к отрицательно заряженному катоду, и если их энергия достаточна, то, ударяясь о катод, они выбивают из него вторичные электроны. В газоразрядном промежутке появится встречное движение заряженных частиц с противоположными знаками (электроны и ионы).

Если энергия летящего электрона будет недостаточна для выбивания электронов из молекулы, то электрон в молекуле может перескочить на какую-либо более удаленную орбиту и снова возвратиться на прежнее место. В этом случае электрон находится в возбужденном состоянии и выделяемая им энергия при возвращении на прежнюю орбиту проявляется в виде свечения газа. Одновременно с процессом ионизации в газоразрядном промежутке происходит и образование нейтральных молекул при соединении положительных ионов с электронами.

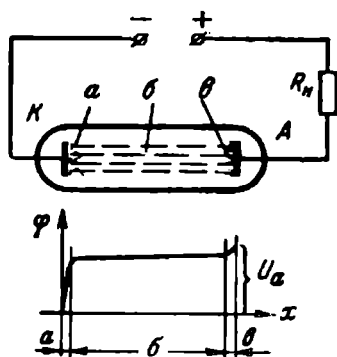


Рис. 11-1. Простейший ионный прибор с холодным катодом; устройство и распределение потенциала по длине прибора.

Если энергия летящего электрона будет недостаточна для выбивания электронов из молекулы, то электрон в молекуле может перескочить на какую-либо более удаленную орбиту и снова возвратиться на прежнее место. В этом случае электрон находится в возбужденном состоянии и выделяемая им энергия при возвращении на прежнюю орбиту проявляется в виде свечения газа. Одновременно с процессом ионизации в газоразрядном промежутке происходит и образование нейтральных молекул при соединении положительных ионов с электронами.

тронами, т. е. рекомбинация. При рекомбинации также излучаются фотоны, т. е. газ светится. Цвет свечения зависит от газа, наполняющего баллон.

Ионный прибор является нелинейным сопротивлением. По падению напряжения между электродами прибора всю длину газоразрядного промежутка (рис. 11-1) можно подразделить на три неравных участка: *a* — пространство катодного падения напряжения; *b* — область равномерного распределения потенциала; *v* — анодный участок.

Первый участок *a* — катодный — находится около катода. Падение напряжения на этом участке — катодное падение — составляет значительную долю общего напряжения, приложенного к зажимам прибора. Электроны, эмиттируемые катодом, получают ускорение главным образом на этом участке. Участок *b* — область равномерного распределения потенциала — занимает почти всю длину промежутка и переходит в третий участок *v* — анодный, расположенный вблизи анода. Оба эти участка имеют небольшое падение напряжения. В области равномерного распределения потенциала концентрация электронов и положительных ионов примерно одинакова и суммарный объемный заряд равен нулю. Такое состояние газа называется газоразрядной плазмой или просто плазмой. Из плазмы уходит столько электронов к аноду, сколько приходит их в плазму с катода.

Для гашения разряда необходимо снять напряжение с электродов прибора, тогда заряды рекомбинируются (нейтрализуются) и через некоторое время плазма исчезает. Исчезновение плазмы называется деионизацией. Время деионизации мало и составляет 10^{-5} — 10^{-7} сек.

11-2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Величина тока, протекающего через ионный прибор, зависит от многих факторов: разности потенциалов между анодом и катодом, окружающей температуры, давления газа, величины нагрузки.

В ионных приборах различают следующие виды газового разряда: а) тихий; б) тлеющий; в) дуговой. Кроме того, по характеру возникновения разряда принято под-

разделять разряды на самостоятельные и несамостоятельные.

Для получения самостоятельного разряда к электродам газоразрядного прибора достаточно приложить разность потенциалов определенной величины и тогда через прибор потечет ток. В этом случае не требуется в газоразрядный промежуток вводить электроны от специального источника (катод холодный). Для возникновения и развития самостоятельного газового разряда достаточно того ничтожно малого количества сво-

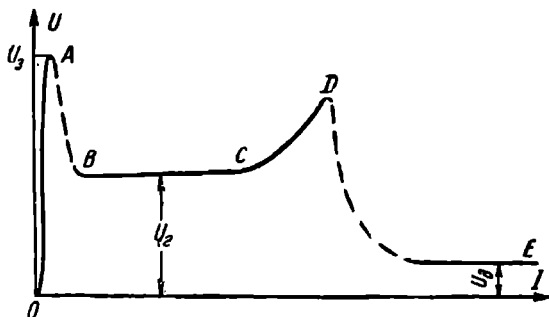


Рис. 11-2. Вольт-амперная характеристика газового разряда.

бодных электронов, которые всегда имеются в газовой среде. Пример самостоятельного разряда рассматривался в предыдущем параграфе.

При несамостоятельном разряде катод прибора должен быть накаливаемым. Возникновение газового разряда и поддержание его может быть только за счет термоэлектронов, испускаемых катодом. При отсутствии накала прекращается эмиссия электронов и прекращается газовый разряд.

Тихий разряд. Тихий разряд характеризуется малой величиной тока — 1 Мка. Тихий разряд может быть как самостоятельным, так и несамостоятельным. На вольт-амперной характеристике газового разряда (рис. 11-2) участок *OA* соответствует тихому несамостоятельному разряду, который возникает за счет естественных ионизаторов (космических лучей, радиации земной коры и т. д.). Величина тока несамостоятельного

тихого разряда зависит от интенсивности сторонних ионизаторов и может являться мерой мощности радиоактивного излучения. Тихий разряд может появиться и в вакуумных приборах как побочное явление.

Тлеющий разряд. Тлеющим разрядом называется разряд ионизированного газа, когда протекающий через прибор ток невелик и составляет всего несколько десятков миллиампер, причем падение напряжения на зажимах прибора достаточно велико (сотни вольт). Тлеющий разряд относится к самостоятельным разрядам и наблюдается только в приборах с холодным катодом. Электронная эмиссия катода получается в результате бомбардировки его положительными ионами.

Слой газа, прилегающий к поверхности отрицательного электрода (катода), где происходит интенсивная ионизация молекул, светится. Яркое красно-оранжевое свечение неона напоминает свечение тлеющего угля. Отсюда и произошло название тлеющий разряд. Площадь свечения катода растет пропорционально увеличению тока. До тех пор, пока катодное свечение не покрывает всего катода, катодное падение остается постоянным и не зависит ни от величины тока, ни от давления газа. Такое состояние называется нормальным катодным падением тлеющего разряда. Дальнейшее увеличение тока, после того как весь катод покрывается тлеющим светом, происходит за счет увеличения плотности тока, что и сопровождается увеличением катодного падения. Это состояние тлеющего разряда называется аномальным. Аномальное катодное падение может в несколько раз превышать величину нормального катодного падения. Аномальное состояние тлеющего разряда неустойчивое, так как разряд легко может перейти в следующую форму разряда — дуговой разряд.

На вольт-амперной характеристике (рис. 11-2) прямая *BC* соответствует режиму нормального тлеющего разряда, точка *A* — напряжению зажигания U_z , после чего на зажимах прибора напряжение уменьшается до напряжения горения U_r . Подъем характеристики на участке *CD* является признаком аномального тлеющего разряда с характерным для него увеличенным катодным падением напряжения, после чего разряд переходит в дуговой. Для ионных приборов по оси абсцисс принято откладывать ток, а по оси ординат — напряжение.

Дуговой разряд. Электрическую дугу открыл в 1802 г. русский ученый В. В. Петров. Дуговой разряд характеризуется большим значением тока (до сотен и тысяч ампер) и малым катодным падением напряжения (порядка 8—20 в, в зависимости от газового наполнения).

На вольт-амперной характеристике дуговому разряду соответствует участок DE при напряжении горения U_d . Дуговой разряд может быть как самостоятельным, так и несамостоятельным. В первом случае большая величина тока в приборе получается за счет сильной бомбардировки катода положительными ионами, вызывающая термоэлектронную эмиссию, а также сильную эмиссию вторичных электронов. При несамостоятельном разряде ток создается исключительно за счет эмиссии катода.

Увеличение тока в приборах дугового разряда по сравнению с вакуумными приборами объясняется главным образом тем, что газоразрядная плазма как бы приближает анод к поверхности катода, благодаря чему все анодное напряжение выделяется на очень малом участке (участок a , рис. 11-1) пространства катодного падения напряжения. Плазма при дуговом разряде имеет очень большую концентрацию электронов и положительных ионов, поэтому электропроводность ее очень велика и приближается к электропроводности металлического проводника. Падение напряжения в плазме обычно не превышает 0,1 в. Только при прохождении очень больших токов газовая плазма начинает истощаться и падение напряжения на ней возрастает.

На рис. 11-3 показана схема включения ионного прибора. Последовательно с прибором включается активное сопротивление R_0 , которое называется ограничительным или балластным. При возникновении тлеющего разряда через сопротивление R_0 протекает ток и напряжение на электродах уменьшается до величины $U = E - I_0 R_0$. Без ограничительного сопротивления приборы тлеющего разряда не включаются, так как напряжение на приборе после зажигания разряда не может уменьшиться, поэто-

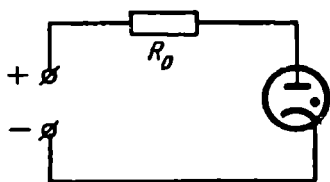


Рис. 11-3. Схема включения ионного прибора.

му ток через них превысит допустимую величину, тлеющий разряд перейдет в дуговой и прибор может выйти из строя.

11-3. ГАЗОТРОНЫ

Газотроном называется газонаполненная двухэлектродная лампа с накаливаемым катодом, работающая в режиме дугового самостоятельного разряда. Внешний вид газотронов показан на рис. 11-4,а (1 — от-

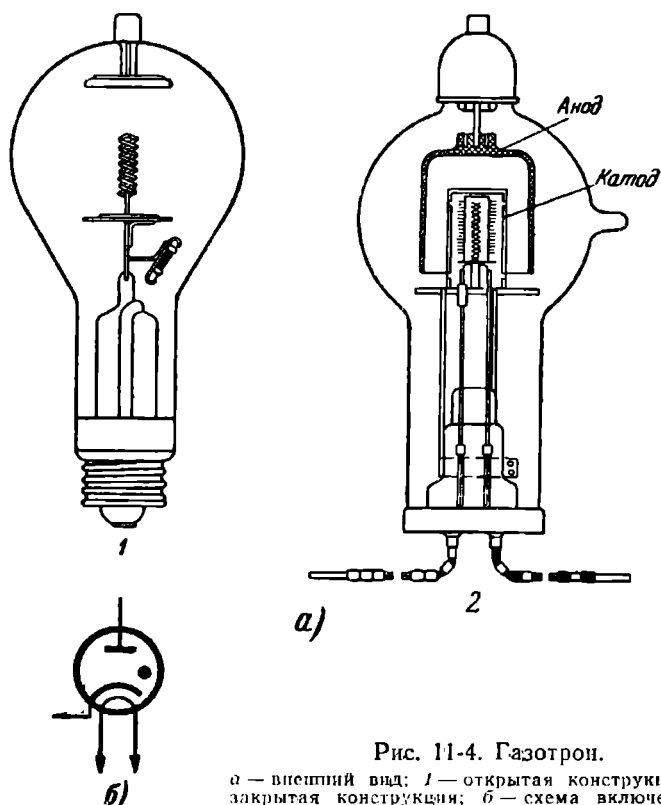


Рис. 11-4. Газотрон.

а — внешний вид; 1 — открытая конструкция; 2 — закрытая конструкция; б — схема включения газотрона.

крытая конструкция; 2 — закрытая конструкция); схемное изображение газотронов приведено на рис. 11-4,б.

Конструктивно газотрон выполняется в виде стеклянной, несколько удлиненной колбы, внутри которой находятся электроды: анод и катод. Катоды могут быть как

прямого накала, так и подогревные; иногда они помещаются в металлически тепловой экран, что уменьшает отвод тепла и повышает к. п. д. газотрона. В газотронах применяется в основном оксидный катод. Анод для мощных газотронов выполняется из графита, для маломощных газотронов — из никеля. Газотрон наполняется либо нейтральным газом, либо парами ртути, получаемыми путем испарения ртути, помещенной в колбе. Давление газа очень мало (порядка 0,2—0,5 мм рт. ст. для газонаполненных и 0,01 мм рт. ст. для наполненных ртутью).

Применяется газотрон, так же как и кенотрон, для выпрямления переменного тока, но по сравнению с кенотроном он имеет большую величину тока и больший к. п. д. Поскольку при дуговом разряде падение напряжения на электродах прибора небольшое (8—20 в), а ток велик, то внутреннее сопротивление газотрона в прямом направлении мало, а поэтому на нем теряется и малая мощность. Коэффициент полезной мощности выпрямителей на газотронах, при высоких выпрямляемых напряжениях, достигает 98—99%, тогда как на кенотронах он не превышает 80—85%.

Газотроны с газовым наполнением могут применяться при температуре окружающей среды от —20 до 60°С, так как давление в них слабо зависит от температуры. В ртутных газотронах давление, а также и плотность паров зависят от температуры значительно, поэтому рабочая температура газотрона (в нижней горловине) не должна выходить из пределов от +15 до +35°С. При температуре колбы ниже +15°С давление паров и количество положительных ионов уменьшается, поэтому сопротивление газоразрядной плазмы несколько увеличивается, что приводит к увеличению анодного напряжения. Положительные ионы плазмы приобретают большую скорость, и катод, подвергающийся бомбардировке, разрушается. Одинаковое явление наблюдается и при недокале катода, когда общая температура газотрона понижается. При температуре выше +35°С повышается давление паров ртути, что уменьшает величину допустимого максимального обратного напряжения.

Вольт-амперная характеристика газотрона для двух значений напряжения накала $U''_н > U'_н$ приведена на рис. 11-5. Точка А соответствует напряжению зажигания

газотрона, при этом возникает дуга и напряжение уменьшается, пока ток через газотрон не превысит максимального значения.

Схема выпрямителя на газотроне приведена на рис. 11-6,а, а эпюры напряжений и токов этой схемы приведены на рис. 11-6,б. Напряжение на аноде в начале

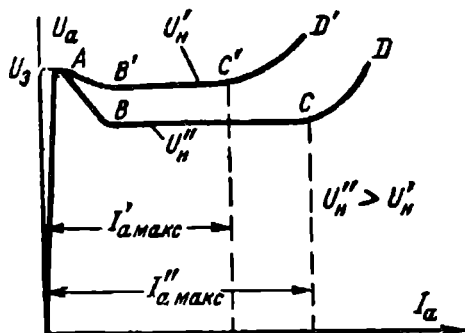


Рис. 11-5. Вольт-амперная характеристика газотрона.

положительного полупериода возрастет вместе с переменным напряжением, но после зажигания дуги падает до напряжения горения. Дуга гаснет только тогда, когда переменное напряжение станет меньше потенциала горе-

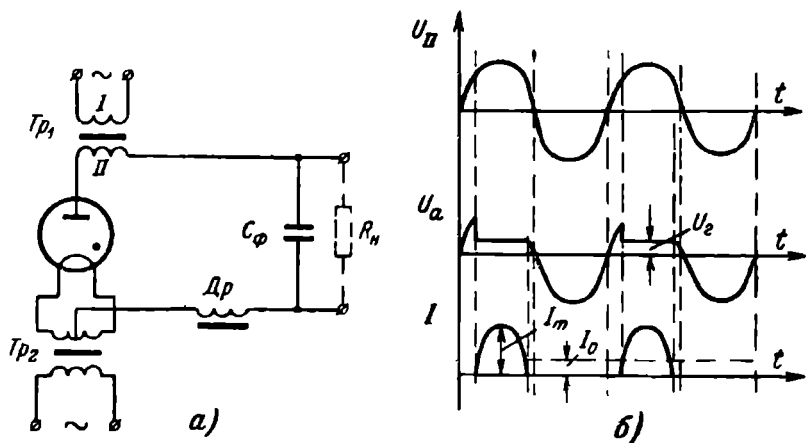


Рис. 11-6. Схема выпрямителя на газотроне (а) и эпюры напряжений и токов (б).

ния дуги. Фильтр в выпрямителе на газотронах начинается с дросселя в целях увеличения сопротивления анодной цепи при прохождении импульсов анодного тока. Если бы фильтр начинался с емкости, то при включении и выключении выпрямителя импульсы тока достигали бы величины, опасной для целостности газотрона, так как емкость представляет для них очень малое сопротивление.

Напряжение накала газотрона должно быть меньше напряжения ионизации газа. В противном случае может возникнуть дуговой разряд между концами нити накала. Напряжение накала газотронов стандартизовано и равно 2,5 и 5 в. Для получения большой эмиссии при малом напряжении накала необходимо иметь большие токи накала, достигающие 40 а, поэтому наружная часть выводов накала мощных газотронов изготавливается из многожильного провода.

Допустимое выпрямленное напряжение составляет примерно одну треть от максимального обратного напряжения:

$$U_{a0} = 0,3 U_{обр}. \quad (11-1)$$

Это же справедливо и для максимальной величины выпрямленного тока:

$$I_{a0} = 0,3 I_m. \quad (11-2)$$

При эксплуатации газотронов необходимо выполнять следующее:

1. Перед подачей на анод газотрона высокого напряжения его необходимо прогреть накальным током в течение 0,5—30 мин в зависимости от мощности газотрона и рода газонаполнения, что указывается в паспорте газотрона. Если анодное напряжение включить до того, как вокруг катода образуется электронное облачко, то катод будет разрушен бомбардировкой положительных ионов. Выключается анодное напряжение до выключения накала.

2. Не допускать отклонения напряжения накала от номинального значения более чем на +10 и —5%. При недокале повышается катодное падение напряжения и положительные ионы с большой энергией бомбардируют оксидный катод, отчего сокращается срок службы газо-

трона. Например, если при нормальном накале падение напряжения на ртутном газотроне равно 15 в, то срок службы газотрона составляет 1500—2000 ч. При недокале более 5% падение напряжения увеличится, положим, до 17—18 в, тогда срок службы сократится до нескольких десятков часов. Когда падение напряжения увеличится до 21—22 в срок службы будет равен всего нескольким секундам.

Условное обозначение газотрона состоит из двух букв, за которыми через тире следует дробное число: ГР,— газотрон ртутного наполнения; ГГ— газотрон

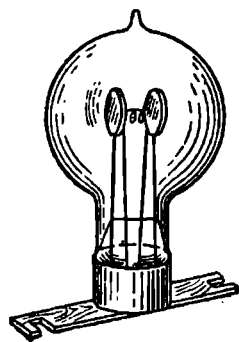


Рис. 11-7. Внешний вид газотрона ВГ-176 «Тунгар».

газового наполнения; ВГ — выпрямительная газонаполненная лампа. Числитель дроби означает среднюю величину выпрямленного тока в амперах, а знаменатель — максимальное обратное напряжение в киловольтах.

Следует выделить газотроны с двумя анодами, называемые «тунгары». Название тунгар произошло от начальных частей двух слов: английского «tungstem» (вольфрам) и латинского «argon» (аргон), так как первоначально катоды тунгаров изготавливались из вольфрама, а колба наполнялась газом — аргонном. В современных тунгарах применяются оксидные катоды прямого накала или из торированного молибдена; аноды никелевые плоской формы. Давление газа в тунгарах от 10 до 30 мм рт. ст., вследствие чего затрудняется испарение активного слоя катода и понижается пробивное напря-

жение. Применяются тунгары в низковольтных выпрямителях, например, для зарядки аккумуляторов. Внешний вид тунгара ВГ-176 показан на рис. 11-7.

11-4. ТИРАТРОНЫ

Тиратроном называется газонаполненный триод или тетрод. Тиратрон получил свое название от греческого слова «тира», что значит дверь. В тиратроне могут быть только два состояния: либо анодный ток равен нулю, когда лампа заперта, либо анодный ток достаточно велик, когда лампа открыта. Тиратроны выпускаются как с накаливаемым катодом, так и с холодным (безнакальные тиратроны). Анод тиратрона изготавливается из материала с большой работой выхода: никель, молибден, тантал и графит. Тиратроны с накаливаемым катодом изготавливаются на токи до 100 а. Средний срок службы газонаполненных тиратронов примерно 500 ч, а ртутных 2000—3000 ч. При эксплуатации тиратронов выполняются те же требования, что и при эксплуатации газотронов.

Рассмотрим принцип действия тиратронов с накаливаемым катодом, которые работают в режиме дугового разряда.

Роль сетки тиратрона. При отсутствии дугового разряда сетка действует так же, как и управляющая сетка электронного прибора, т. е. величина анодного тока определяется потенциалом сетки. Ток анода мал и не превышает 1 мка, но отрицательным потенциалом сетки тиратрон можно запереть. В этом случае электрическое поле между сеткой и катодом тормозящее и препятствует прохождению электронов к аноду. При уменьшении отрицательного потенциала сетки до критической величины в пространство сетка — анод проникает достаточное количество электронов, что вызывает ионизацию газа. После возникновения дугового разряда сетка теряет управляющие свойства. Изменением потенциала сетки нельзя ни уменьшить анодный ток, ни запереть лампу, т. е. получить анодный ток равным нулю. Чем больше отрицательный потенциал сетки, тем больше она притягивает положительных ионов. Оболочка положительных ионов нейтрализует потенциал сетки и устраняет его воздействие на анодный ток. Положительный

потенциал сетки также не изменяет анодный ток. Следовательно, сетка управляет только моментом зажигания газового разряда. Управляющее действие сетки тиратрона восстанавливается только после прекращения дугового разряда, для чего анодное напряжение должно быть уменьшено до нуля или ниже потенциала горения дуги.

Сетка тиратрона имеет иную конструкцию, чем сетка вакуумного триода (рис. 11-8). Она представляет собой дно никелевого стакана с одним или несколькими отвер-

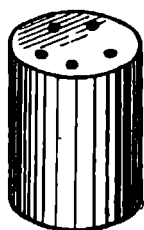


Рис. 11-8. Эскизное изображение сетки тиратрона.

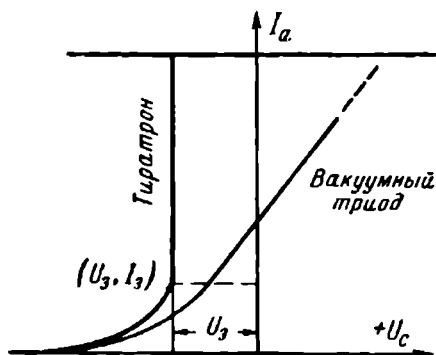


Рис. 11-9. Анодно-сеточные характеристики тиратрона и вакуумного триода.

ствиями. Стакан охватывает катод и этим обеспечивает электростатическую экранировку его от анода. Без такой экранировки электроны могли бы направляться к аноду не через сетку, а окольным путем и образовали бы дуговой разряд, не управляемый сеткой. Благодаря экранировке оказалось возможным при небольшом отрицательном потенциале сетки нейтрализовать действие высокого анодного напряжения и предотвратить возникновение дуги между катодом и анодом.

Анодно-сеточные характеристики тиратрона. На рис. 11-9 приведены анодно-сеточная характеристика вакуумного триода, выражающая зависимость анодного тиратрона и для сравнения характеристика вакуумного триода, выражающая зависимость анодного тока от изменения потенциала сетки при постоянном анодном напряжении. Но для тиратрона она имеет другой вид. После зажигания тиратрона анодный ток достигает

максимальной величины, обусловленный параметрами данного тиратрона, величиной нагрузочного сопротивления и напряжения источника анодного питания. Для характеристики тиратрона неприменимо понятие крутизна характеристики — она велика и почти равна бесконечности при зажигании тиратрона и равна нулю при зажженном тиратроне.

Снимаются анодно-сеточные характеристики тиратрона по схеме, приведенной на рис. 11-10. Вначале устанавливают на сетке достаточно большой отрицательный

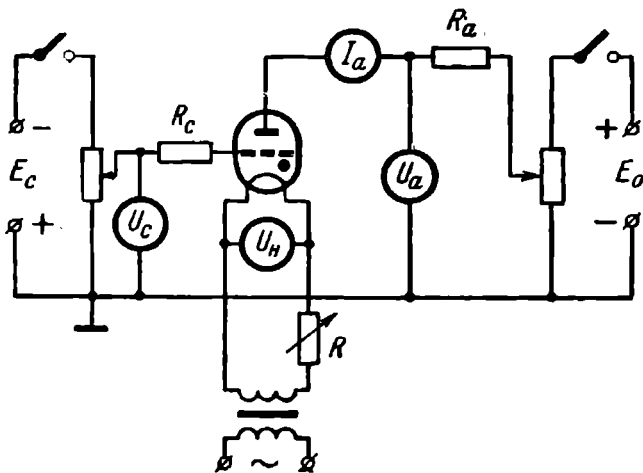


Рис. 11-10. Схема для снятия характеристик тиратрона.

потенциал (20—50 в) для того чтобы запереть тиратрон, а затем на анод подается положительное напряжение заданной величины (20, 40, 60, 80, 120 в и т. д.) и для каждого значения напряжения подбирают потенциал сетки, при котором происходит ионизация газа. Зажигание тиратрона легко отмечается по свечению газа, уменьшению напряжения на аноде и по появлению анодного тока. Полученные данные записываются в таблицу.

Для снятия характеристики при ином анодном напряжении необходимо погасить тиратрон, уменьшая анодное напряжение, и снова повторить описанный процесс. Каждому значению анодного напряжения соответствует одно вполне определенное значение напряжения на сетке, при котором возникает разряд. Это значение сеточного напряжения называется «критическим».

Можно ввести понятие проицаемости для тиратрона как отношение критического сеточного напряжения, взятого по модулю $U_{кр}$, к анодному напряжению U_a , при котором произойдет газовый разряд:

$$D = \frac{|U_{кр}|}{U_a}. \quad (11-3)$$

Значение проицаемости лежит в пределах 0,01—0,001. Из формулы (11-3) следует, что с увеличением критического сеточного напряжения требуется приложить большее напряжение к аноду тиратрона для возникновения дугового разряда:

$$|U_{кр}| = DU_a. \quad (11-4)$$

Для устранения перегрева сетки от значительных сеточных токов в цепь сетки включают сопротивление порядка 10^3 — 10^6 ом, стремясь сделать ток сетки возможно меньше — около 2—3% анодного тока. При малых сеточных токах потребуется и меньшая управляемая мощность в цепи сетки. В анодную цепь для сохранения установленного режима включают сопротивление порядка 500—1 000 ом.

Пусковая характеристика и пусковая область. Помимо анодно-сеточной характеристики, снимают еще пусковую характеристику тиратрона (рис. 11-11,а), которая показывает зависимость между минимальным анодным и сеточным напряжениями, при которых в тиратроне возникает дуговой разряд. С увеличением анодного напряжения увеличивается и сеточное напряжение, поэтому пусковая характеристика имеет падающий характер.

Пусковая характеристика считается основной характеристикой тиратрона. Пусковую характеристику можно снимать двумя способами: 1) на аноде устанавливается заданная величина напряжения и подбирается критическое значение сеточного напряжения, при котором возникает разряд (аналогично снятию сеточной характеристики); 2) устанавливается различное по величине сеточное напряжение и затем путем увеличения анодного напряжения подбирается напряжение, равное напряжению зажигания газа.

Поскольку тиратроны не могут быть идентичными, то пусковые характеристики могут отличаться от образца к образцу. На положение пусковой характеристики оказывают влияние величина ограничивающего сопротивления в цепи сетки, температура окружающей среды, колебание напряжения накала и состояние тиратрона до начала зажигания, т. е., включается ли он впервые или

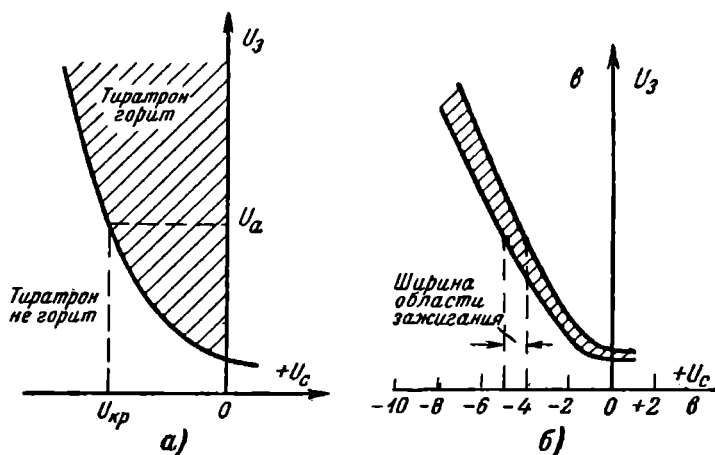


Рис. 11-11. Пусковая характеристика тиратрона — характеристика зажигания (а) и пусковая область тиратрона — область зажигания (б).

включается повторно — уже нагретый. В зависимости от этих причин при каждом данном значении напряжения на аноде тиратрон может зажечься и при несколько большем и при несколько меньшем напряжении на сетке. Поэтому пусковые характеристики реальных тиратронов имеют вид «полосы» или «области», ограниченной наибольшим и наименьшим значениями напряжений на сетке, при которых при заданном анодном напряжении загорается дуговой разряд (рис. 11-11,б).

Пусковые характеристики всех годных тиратронов одного типа не должны выходить за пределы «области пусковых характеристик». Ширина пусковой области по сеточному напряжению принимается в качестве одного из параметров тиратрона.

Применение тиратронов. В автоматике и телемеханике тиратроны применяются в качестве реле, где при

малых значениях сеточного напряжения можно включить цепи с большим током. Разомкнуть же анодную цепь изменением сеточного напряжения невозможно. Большое распространение тиатроны нашли в выпрямителях с регулируемым выпрямленным напряжением.

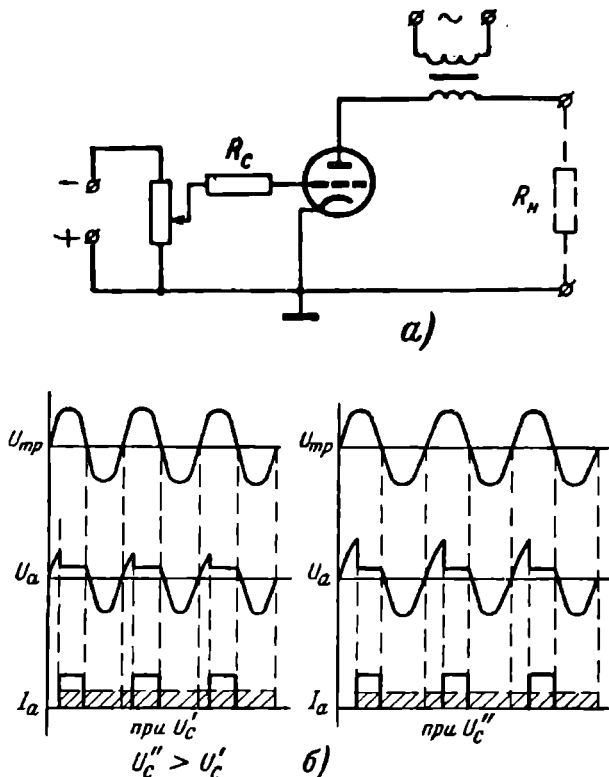


Рис. 11-12. Простейшая схема регулируемого выпрямителя на тиатроне (а) и эпюры напряжений и токов в цепях тиатронов (б).

Простейший метод регулировки осуществляется изменением смещения на сетке тиатрона, в результате чего изменяется начало зажигания дуги и, следовательно, величина среднего значения выпрямленного тока и напряжения. На рис. 11-12,а приведена простейшая схема регулируемого выпрямителя, а на рис. 11-12,б — эпюры напряжений и токов в цепях тиатронов.

Тиратроны с экранирующей сеткой (рис. 11-13). Вторая (экранирующая) сетка тиратрона 3 расположена между анодом 4 и управляющей сеткой 2 и катодом 1 и соединена с экраном 5. Экранирующая сетка ограничивает объем газа, в котором происходит разряд, и тем самым уменьшает время деионизации его.

В экранированных тиратронах требуется меньшее управляющее напряжение и мощность по сравнению

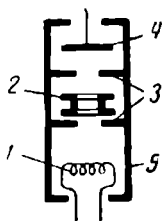


Рис. 11-13. Тиратрон с экранирующей сеткой.

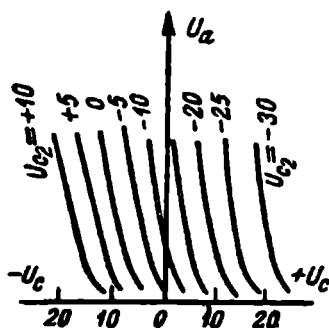


Рис. 11-14. Пусковые характеристики тиратрона с экранирующей сеткой.

с трехэлектродными тиратронами. Кроме того, тиратрон с экранирующей сеткой имеет новое управляющее свойство: небольшим потенциалом на экранирующей сетке можно изменять положение пусковой характеристики.

Положительный потенциал экранирующей сетки усиливает поле анода и сдвигает пусковую характеристику влево — в область более отрицательных сеточных смещений, а отрицательный потенциал сдвигает характеристику вправо. Если же экранирующую сетку соединить с катодом, то получается весьма чувствительный трехэлектродный тиратрон. Примерные пусковые характеристики тиратронов с экранирующей сеткой приведены на рис. 11-14. Экранированные тиратроны выпускаются на небольшие токи, порядка 75—100 *ма*.

Наполняется тиратрон либо нейтральным газом, либо парами ртути. Импульсные тиратроны заполняются во-

дородом. Ионы водорода более легкие, и поэтому уменьшается время деионизации (10—20 мксек). Все типы водородных тиратронов имеют правые пусковые характеристики. Маркировка тиратронов имеет общее с мар-

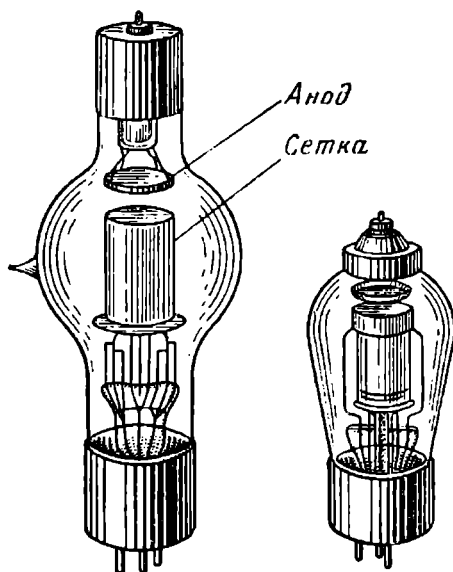


Рис. 11-15. Внешний вид тиратронов.

кировкой газотронов, только вместо начальной буквы Г ставится Т. Внешний вид тиратронов показан на рис. 11-15. В табл. 11-2 приведены основные данные некоторых типов тиратронов.

Тип тиратрона	Количество анодов	Вид накала	$U_{п. в}$	$I_{п. а}$	$I_{а, с. р. а}$	$U_{в, с. а}$
ТГ1Б	2	Косвенный	6,3	0,225	0,02	30
ТГ1-0,1/03	1	Косвенный	6,3	0,6	0,075	—
ТГ1-0,1/03	1	Косвенный	6,3	0,6	0,1	25
ТГ1-2,5/4	1	Прямой	5	14	2,5	140
ТР1-5/2	1	Косвенный	5	15	5	100
ТР1-6/15	1	То же	5	23	6,5	11 000
ТР1-40/15	1	• •	5	68	40	50

11-5. ИГНИТРОНЫ

Игнитроном называется мощная выпрямительная лампа с ртутным катодом и угольным анодом, работающая в режиме дугового разряда. Жидкий ртутный катод обладает большой эмиссионной способностью, что позволяет изготавливать игнитрон на токи в несколько тысяч ампер. Срок службы ртутного катода практически не ограничен. Падение напряжения на игнитроне порядка 10—15 в.

На рис. 11-16,а показан стеклянный игнитрон, а схема его включения приведена на рис. 11-16,б.

В игнитроне зажигание дуги производится в каждый период с помощью погруженного в ртуть катода-поджигателя.

Электрод-поджигатель изготавливается из высокоомного материала — карборунда, который не смачивается ртутью. Поджигатель погружается в ртуть на глубину 3—5 мм. Между ртутью и поджигателем образуется тонкий слой диэлектрика, в котором при приложении разности потенциалов образуется сильное электрическое поле, способствующее появлению из ртутного катода электронной эмиссии. Через поджигатель синхронно с напряжением главного анода пропускаются кратковременные импульсы тока, обуславливающие в месте контакта поджигателя с ртутью образование небольших искр. Воздушная искра быстро развивается в дуговой разряд между катодом и анодом. Смещением момента подачи импульса в цепь поджигателя можно управлять началом разряда. При положительном полупериоде на-

Таблица 11-2

$U_r, \text{ в}$	$U_{a, \text{ макс.}}, \text{ в}$	$U_{обр}, \text{ в}$	Время прогрева катода	Газовое наполнение
20 ²	240	240	0,15	Криптоно-ксеноновая смесь
20	300	300	0,5	Аргон
11	650	1 300	0,15	Ксеноно-криптоновая смесь
20	3 000	4 000	1,0	Криптоно-ксеноновая смесь
16	2 000	2 000	5	Ртутное
20	15 000	15 000	15	Ртутное
20	15 000	15 000	30	Ртутное

пряжения на анод через игнитрон будет протекать выпрямленный ток, который прекратится тогда, когда напряжение на аноде уменьшится до нуля.

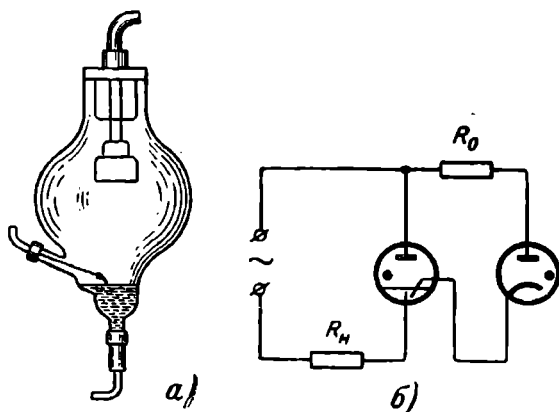


Рис. 11-16. Эскиз игнитрона (а) и схема его включения (б).

11-6. ГАЗОВЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ (СТАБИЛИТРОНЫ)

Газовый стабилизатор напряжения представляет собой газоразрядную двухэлектродную лампу с холодным катодом, работающую в режиме нормального тлеющего разряда. Стабилизация напряжения основана на том, что падение напряжения на стабилизаторе остается постоянным, пока величина тока стабилизатора не выходит за пределы допустимых для него значений.

Баллон стабилизатора наполняется инертным газом под давлением порядка нескольких десятых миллиметров ртутного столба. Анод 3 и катод 2 имеют цилиндрическую форму и расположены коаксиально в стеклянном баллоне 1 (рис. 11-17). Внутренняя поверхность катода покрывается оксидным слоем для уменьшения работы выхода электронов. Максимальная величина тока, протекающего через стабилизатор, зависит от площади поверхности катода и давления газа. .

На рис. 11-18 приведена вольт-амперная характеристика. Для зажигания стабилитрона к аноду нужно приложить напряжение $U_a \geq U_z$. После того как стабилитрон зажжется (газ ионизируется), избыток напряжения между входным напряжением и напряжением горения гасится на последовательно включенном сопротивлении R_0 . Это сопротивление ограничивает ток разряда и препятствует самопроизвольному переходу тлеющего разряда в дуговой.

Стабилитрон характеризуется следующими параметрами: напряжением зажигания U_z , напряжением горения U_r , предельным значением токов, протекающих через стабилитрон, $I_{ст.мин}$ и $I_{ст.макс}$. Если через стабилитрон будет протекать ток меньше $I_{ст.мин}$, то стабилитрон погаснет. Если же ток увеличится сверх $I_{ст.макс}$, то тлеющий разряд из нормального перейдет в аномальный и затем в дуговой и тем самым выведет из строя стабилитрон.

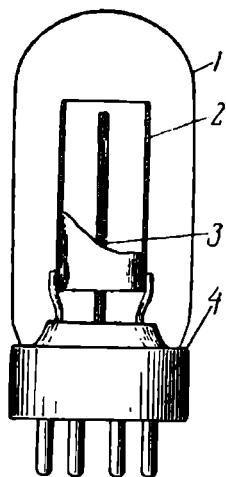


Рис. 11-17. Устройство стабилитрона.

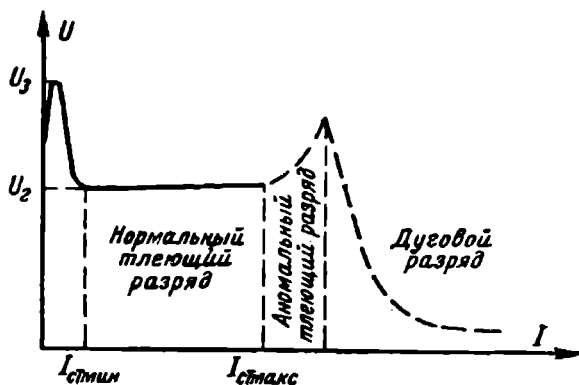


Рис. 11-18. Вольт-амперная характеристика стабилитрона.

Ток, протекающий через сопротивление $R_{огр}$, равен сумме токов стабилитрона и нагрузки: $I_0 = I_{ст} + I_{н}$. Когда ток нагрузки равен нулю, то $I_0 = I_{ст.макс}$, т. е. через со-

противление R_0 должен протекать максимальный ток стабилитрона $I_{ст.макс}$. Величину ограничительного сопротивления R_0 можно определить по формуле

$$R_0 = \frac{U_{вх} - U_{г}}{I_{ст.макс}}, \quad (11-5)$$

где $U_{вх}$ — входное нестабильное напряжение (на выходе выпрямителя).

Если требуется стабилизировать высокое напряжение, то необходимо включить два или несколько стабилизаторов напряжения последовательно, причем для устойчивого зажигания параллельно к каждому из них следует включить активное шунтирующее сопротивление $R_{ш}$ порядка сотен килоом (рис. 11-19).

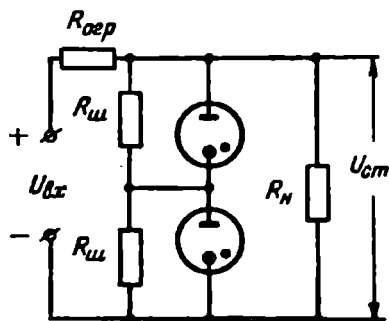


Рис. 11-19. Последовательное включение стабилитронов.

Параллельное включение стабилитронов не применяется, так как будет загораться только один из них с наименьшим потенциалом зажигания.

Таблица 11-3

Тип стабилитронов	Напряжение стабилизации (падение напряжения на стабилитроне), в	Напряжение зажигания, в	Ток стабилитрона, ма	Ограничительное сопротивление, ом	Газовое наполнение
СГ1П-В	145—160	170	5—30	1 000	Аргоно-гелиевая смесь
СГ2П	104—112	133	5—30		
СГ2С	70—80	105	5—40	2 500	Аргоно-неоновая смесь
СГ3С	105—112	127	5—30	2 500	Аргоно-гелиевая смесь
СГ4С	145—160	180	5—30	2 500	Аргоно-гелиевая смесь
СГ5С	142—157	180	5—10	3 000	Аргоно-гелиевая смесь

и Примечание. Стабилитрон СГ1П-В имеет повышенную надежность (пальчиковое оформление).

Маркировка стабилизаторов напряжения состоит из букв СГ (стабилизатор газовый), затем следует число, указывающее порядковый номер типа прибора, и на последнем месте буква, обозначающая принадлежность к определенной серии прибора (П — пальчиковые, Б — сверхминиатюрные).

Основные типы газоразрядных стабилизаторов напряжения приведены в табл. 11-3.

11-7. ТИРАТРОНЫ С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

Безнакальные тиратроны работают в режиме нормального тлеющего разряда. Промышленностью выпускаются два вида тиратронов: триод и тетрод. Триод имеет три электрода: анод, катод и управляющий электрод.

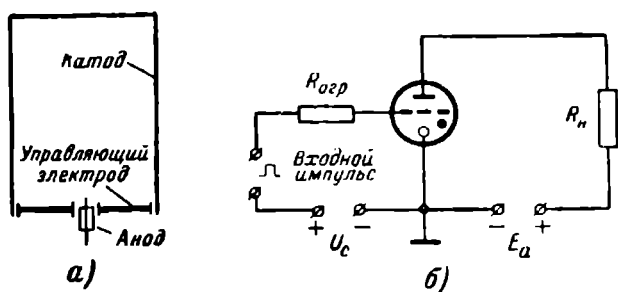


Рис. 11-20. Тиратрон с холодным катодом (а) и схема его включения (б).

триод, выполняющий функцию сетки тиратрона с накаливаемым катодом. Анод изготавливается из проволоки чистого никеля — материала с большой работой выхода электронов. Катод представляет собой цилиндр тоже никелевый, но для уменьшения работы выхода внутренняя поверхность его покрывается цезием или окисью бария. Управляющий электрод имеет вид металлической шайбы и располагается внутри катода; в отверстие шайбы проходит анод (рис. 11-20,а). Схема включения тиратрона с холодным катодом приведена на рис. 11-20,б.

Тиратрон с холодным катодом наполняется инертным газом, или их смесью под давлением несколько десятков миллиметров ртутного столба. Расстояние между электродами и давление газа подбираются такими, чтобы

разряд между катодом и анодом происходил только тогда, когда появится разряд между катодом и управляющим электродом. Для напряжения между катодом и анодом E_a должно соблюдаться следующее неравенство:

$$U_r < E_a < U_z.$$

Принцип действия тиратрона с холодным катодом можно объяснить следующим образом. На управляющий электрод подается положительное напряжение через ограничительное сопротивление R_0 , при этом в проме-

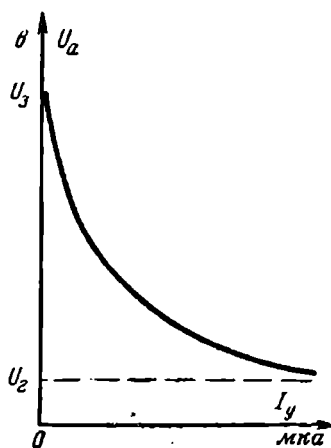


Рис. 11-21. Характеристика перехода (зажигания) тиратрона тлеющего разряда.

жутке управляющий электрод — катод протекает очень малый ток (доли микроампера). Когда на управляющий электрод поступит положительный импульс напряжения, то в цепи управляющего электрода ток увеличивается. Возникновение разряда между анодом и катодом зависит от величины тока управляющего электрода I_y .

При достаточной величине этого тока возникает тлеющий разряд между анодом и катодом, появляется анодный ток, при этом анодное напряжение уменьшится до значения U_r , а управляющий электрод теряет свое управляющее

действие аналогично сетке тиратрона с накаливаемым катодом. Начавшийся разряд в тиратроне может быть прекращен только путем понижения напряжения на аноде до нуля или до величины, несколько меньшей напряжения горения разряда между этими электродами.

Тиратроны с холодным катодом обладают большой экономичностью и малыми габаритами, поэтому они находят применение в схемах счетно-решающих устройств, выполняя роль бесконтактных реле.

Тиратроны с холодным катодом характеризуются кривыми, называемыми «характеристиками перехода»

(разряда), аналогичными пусковым характеристикам тиратрона с накаливаемым катодом. Характеристики перехода выражают зависимость напряжения зажигания тиратрона от тока, протекающего между управляющим электродом и катодом. На рис. 11-21 приведена усредненная характеристика перехода, или характеристика зажигания тиратрона тлеющего разряда.

Для повышения чувствительности в тиратрон помещается еще одна сетка. Лампа с двумя сетками получила название тетрод тлеющего разряда. Напряжение второй сетки составляет 30—40% от анодного напряжения.

Основные сведения о тиратронах с холодным катодом приведены в табл. 11-4.

Таблица 11-4

Маркировка	$U_{a, \text{ макс.}}$ в	$\Delta U_a, \text{ в}$	$I_{a, \text{ ср.}}$ ма	$\Delta U_{c2}, \text{ в}$	Примечание
МТХ-90	120—150	90	5,0	—	ΔU_a и ΔU_{c2} —минимальное значение напряжения, необходимое для быстрого и надежного открытия тиратрона
ТХЗБ	190	104—114	2,5	60—70 при $1c_1=50 \text{ мка}$	
ТХ4Б	225	120	3,5	100 при $1c_1=10 \text{ мка}$	

11-8. ЗАЩИТНЫЕ РАЗРЯДНИКИ

Разрядником называется газонаполненный прибор, служащий для защиты сетей и аппаратов от перенапряжений. Разрядники по конструктивному выполнению в зависимости от условий работы подразделяются на два типа. Одни применяются в линиях проводной связи, другие — в радиолокационных станциях.

В радиолокации одна и та же антенна работает и на прием и на передачу. Переключать антенну механически, от передатчика к приемнику и обратно, невозможно, так как число таких переключений доходит до нескольких тысяч в секунду, поэтому применяются высокочастотные газонаполненные резонансные разрядники, называемые также антенными переключателями. Разрядник называется резонансным потому, что в нем для усиления па-

пряжания, приложенного к разряднику, используется резонансная система — объемный резонатор. Резонансный разрядник состоит из стеклянной трубки, наполненной газом (пары воды с примесью водорода), с впаянными в нее двумя медными дисками, которые являются частью поверхности наружного цилиндрического резонатора. Центральные части дисков имеют конусообразную форму, вершины которых сближены. В нижней части, вблизи одного из дисков резонатора, находится поджигаю-

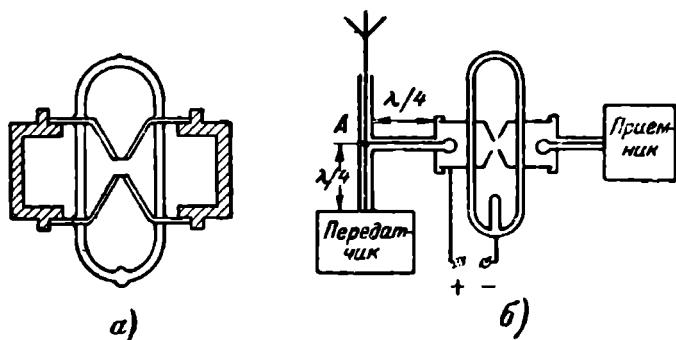


Рис. 11-22. Эскиз резонансного разрядника (а) и схема его включения (б).

щий электрод, покрытый слоем оксида. К ближайшему дисковому электроду и поджигателю прикладывается разность потенциалов, создающая начальный тлеющий разряд, ускоряющий развитие основного разряда.

При посылке передатчиком импульса сигнала на разряднике появится высокое напряжение, усиленное за счет резонанса в настроенном объемном резонаторе. Под действием этого напряжения в разряднике возникнет разряд, сопротивление разрядника станет незначительным и напряжение во входной цепи приемника уменьшится до значения, безопасного для кристаллического детектора. Выход передатчика в передающую систему газовой разрядник не шунтирует, так как он подключается к линии передачи с помощью четвертьволнового отрезка этой линии, представляющей собой изолятор. После прохождения импульса передатчика разрядник гаснет и шунтирующее действие его относительно входной цепи приемника исчезает полностью. Время деионизации резо-

нансного разрядника от 2 до 20 *мксек.* Емкость между электродами не превышает 1—1,5 *пф.*

На рис. 11-22 приведена схема включения разрядника (б) и его эскиз (а).

11-9. ТРИГАТРОНЫ

Тригатрон представляет собой газонаполненный разрядник и состоит из стеклянного баллона, в котором имеются три электрода: анод, катод (холодный) и поджигающий электрод. Электроды изготавливаются из тугоплавкого металла (вольфрам или молибден) и для уменьшения распыления электродов газ (аргон) находится под давлением выше атмосферного (2—3 *ат.*). Для предохранения обслуживающего персонала от возможных взрывов под действием повышенного давления баллон тригатрона окружают сеткой, а сам тригатрон помещают в металлический отсек. Тригатроны применяются в радиолокационных передатчиках для замыкания высоковольтных цепей. В последнее время тригатроны заменяются импульсными тиратронами. На рис. 11-23 приведена схема включения тригатрона.

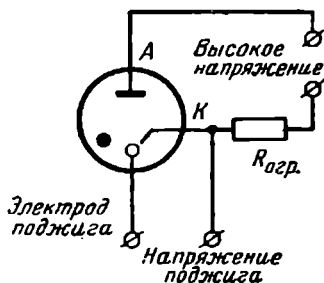


Рис. 11-23. Схема включения тригатрона.

Принцип действия тригатрона заключается в следующем. Высокое напряжение, приложенное к аноду, не может создать разряда между анодом и катодом вследствие большого расстояния между этими электродами и повышенного давления. Разряд может произойти только тогда, когда возникнет разряд между поджигателем и катодом, а для этого необходимо подать на поджигатель импульс напряжения порядка 1—2 *кв.*

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под напряжением зажигания и напряжением горения в газоразрядных приборах?
2. Что называется газовым разрядом и чем характеризуются разряды дуговой, тлеющий и тихий?
3. Газотрон, его применение и преимущество перед кенотроном.

4. Объяснить роль сетки в тиратроне.
5. Начертить анодно-сеточную характеристику тиратрона.
6. Начертить пусковую характеристику тиратрона.
7. Зачем в цепь анода и сетки ионных приборов включают сопротивление?
8. Как осуществляется ионизация газа в стабилитроне? Назначение ограничительного сопротивления.
9. Назначение поджигающего электрода в тиратроне с холодным катодом.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

12-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Фотоэлектронными приборами называются приборы, работа которых основана на явлениях, вызываемых действием лучистой энергии. Фотоэлектронные приборы принято подразделять на две группы:

фотоэлементы, в которых при световом облучении возникает фотоэлектронная эмиссия;

фотоэлементы из полупроводника, в которых под действием светового потока возникают электроны проводимости и дырки. В свою очередь последние подразделяются на фотоэлементы с запирающим слоем, имеющие *p-n* переход; на фотосопротивления, в которых электропроводность изменяется под действием светового потока. Направление тока определяется полярностью внешнего источника питания, а величина — освещенностью прибора.

12-2. СВЕТ И ЕДИНИЦЫ ЕГО ИЗМЕРЕНИЯ

Электромагнитные колебания, или лучистая энергия, имеют широкий диапазон частот от десятков герц до 10^{20} гц (гамма-лучи). Лучистая энергия, видимая глазом, называется светом и составляет очень малую часть всего спектра электромагнитных колебаний. Электромагнитные колебания характеризуются частотой колебаний или длиной волны

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где λ — длина волны в сантиметрах;
 f — частота колебаний в герцах;
 $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек — скорость света.

Обычно длина волны световых колебаний измеряется в ангстремах ($1\text{Å} = 10^{-8}\text{ см}$) или в микронах ($1\text{ мк} = 10^{-3}\text{ мм}$).

Световой поток Φ . Под световым потоком понимается мощность той части лучистой энергии, которая вызывает зрительное ощущение. За единицу светового потока принимается люмен (лм).

Освещенность — это отношение светового потока к площади, на которую он падает. За единицу освещенности принимается люкс (лк). Один люкс есть освещенность, создаваемая световым потоком в 1 лм на площади 1 м^2 . Освещенность изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от точечного источника света до данной поверхности. Таким образом, с удалением источника в 2 раза освещенность уменьшается в 4 раза.

12-3. ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Впервые явление фотоэлектронной эмиссии было обнаружено в 1887 г. немецким физиком Генрихом Герцем и исследовано в 1888 г. А. Г. Столетовым — профессором Московского университета. А. Г. Столетов установил основной (первый) закон фотоэлектронной эмиссии, по которому величина тока прямо пропорциональна световому потоку, падающему на поверхность фотоэлектронного катода:

$$I_{\Phi} = k\Phi, \quad (12-1)$$

где I_{Φ} — ток в микроамперах;

Φ — световой поток в люменах;

k — коэффициент, зависящий от материала катода и называемый «интегральная чувствительность».

На рис. 12-1 приведена схема, которая была использована Столетовым при исследовании фотоэлектронной эмиссии. Схема состоит из последовательно включенных: катода (цинк), анода в виде сетки, источника э. д. с. и гальванометра. К аноду подключен плюс источника э. д. с., а к катоду — минус. Когда катод освещается сильным источником ультрафиолетового света, то в цепи возникает электрический ток за счет электронов, испускаемых цинковой пластинкой и притягиваемых положительно заряженным анодом.

Кванты света. Согласно квантовой теории свет состоит из отдельных порций энергии — квантов света или фотонов. Энергия кванта пропорциональна частоте

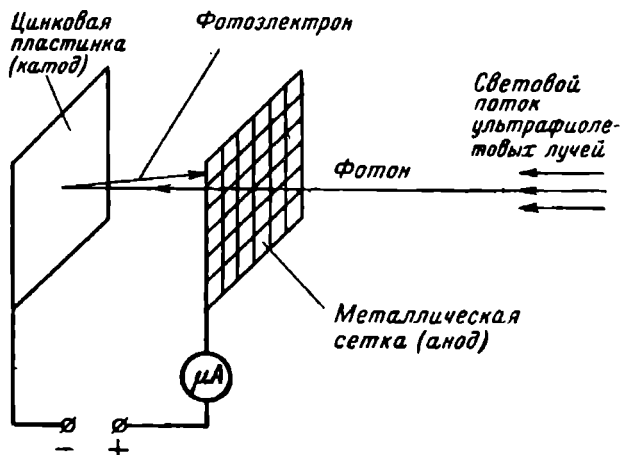


Рис. 12-1. Схема исследования фотоэффекта А. Г. Столетовым.

электромагнитных колебаний света и, следовательно, тем больше, чем короче световая волна:

$$W = hf = h \frac{c}{\lambda} \text{ [дж]},$$

где h — постоянная Планка, которая для всех частот одинакова и равна $6,66 \cdot 10^{-34}$ дж · сек;

c — скорость света;

λ — длина волны;

f — частота света.

Энергия кванта видимых лучей, следовательно, больше энергии инфракрасных и меньше энергии ультрафиолетовых лучей.

Уравнение Эйнштейна (второй закон фотоэлектронной эмиссии).

Уравнение Эйнштейна имеет вид:

$$hf = W_0 + \frac{mv^2}{2}.$$

Из уравнения видно, что энергия кванта расходуется на работу выхода электрона (W_0) и на сообщение электрону кинетической энергии ($mv^2/2$).

Уравнение Эйнштейна обычно записывается в следующем виде:

$$\frac{mv^2}{2} = hf - W_0. \quad (12-2)$$

Второй закон показывает, что кинетическая энергия, а следовательно, и максимальная скорость вылетающих из катода электронов зависят только от частоты электромагнитных колебаний и не зависят от величины светового потока. Если скорость фотоэлектрона равна нулю, то работа выхода его равна энергии кванта. Величина тока зависит как от величины светового потока (числа вылетающих электронов), так и от его спектрального состава.

12-4. ФОТОЭЛЕМЕНТЫ С ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИЕЙ

Конструктивно современный электровакуумный фотоэлемент с фотоэлектронной эмиссией представляет собой стеклянный баллон, в котором находятся два электрода: фотоэлектронный катод и анод (рис. 12-2). Вывод катода выведен на колбу или цоколь. Катод изготовляется из материала с малой работой выхода, нанесенного на внутренней стороне колбы. Противоположная сторона колбы остается прозрачной для проникновения света на катод.

Схема включения фотоэлемента приведена на рис. 12-3.

К и с л о р о д н о - ц е з и е в ы е, или просто «це-

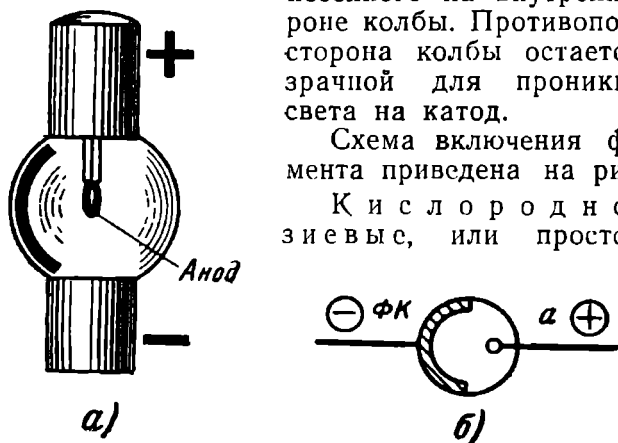


Рис. 12-2. Фотоэлемент.

а — внешний вид; б — эскизное изображение.

зисвые» катоды, состоят из трех слоев. На внутреннюю поверхность колбы наносится тонкий слой чистого серебра (подложка). Серебро покрывается слоем окиси цезия, на поверхности которого выделяется и удерживается мономолекулярный слой металлического цезия.

Сурьмяно-цезиевые катоды имеют не три, а два слоя. Подложкой в них служит сплав сурьмы с це-

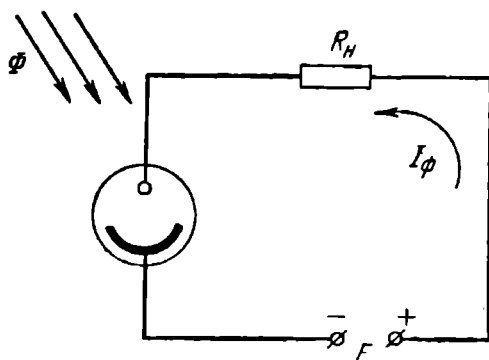


Рис. 12-3. Схема включения фотоэлемента.

зием, а верхним слоем является мономолекулярная пленка металлического цезия.

Анод изготавливается из никеля и имеет форму кольца или диска и укрепляется в центре баллона или немного смещается от центра. Малый размер анода делается для того, чтобы он не препятствовал проникновению света на катод.

Фотоэлементы могут быть как вакуумные, так и газонаполненные. Газонаполненные фотоэлементы после создания вакуума наполняются при низком давлении (0,02—0,04 мм рт. ст.) нейтральным газом, обычно аргоном. В газонаполненных фотоэлементах ток увеличивается за счет самостоятельного тихого газового разряда.

Фотоэлементы характеризуются интегральной и спектральной чувствительностью.

Интегральная чувствительность представляет собой отношение фотоэлектронной эмиссии тока к величине полного светового потока, падающего на

фотоэлектронный катод (от инфракрасной до ультрафиолетовой области):

$$k = \frac{I_{\Phi}}{\Phi} \text{ [мкка/лм]}. \quad (12-3)$$

Спектральная чувствительность показывает отношение фотоэлектронной эмиссии (тока) к величине светового потока какой-либо одной длины волны:

$$\gamma = \frac{I_{\Phi}}{\Phi_{\lambda}} \text{ [мкка/лм]}. \quad (12-4)$$

Спектральная чувствительность обычно изображается в виде графика, где по оси ординат откладывается чувствительность в относительных единицах.

Кислородно-цезиевые вакуумные фотоэлементы (ЦВ) имеют малую интегральную чувствительность, порядка 20—30 мкка/лм, но при газовом наполнении чувствительность их повышается до 100—120 мкка/лм. Кислородно-цезиевые газонаполненные фотоэлементы обозначаются ЦГ. Максимальная спектральная чувствительность кислородно-цезиевых фотоэлементов соответствует красной и инфракрасной части спектра.

Сурьмяно-цезиевые фотоэлементы (СЦВ) являются наиболее эффективными из всех известных фотоэлементов с фотоэлектронной эмиссией. Интегральная чувствительность их выше, чем кислородно-цезиевых, в 3—4 раза, поэтому изготавливаются они только вакуумными. Максимальная спектральная чувствительность находится в видимой части спектра и больше всего в области голубых, синих и фиолетовых лучей; к красным и инфракрасным лучам эти фотоэлементы вовсе не чувствительны.

На рис. 12-4 приведены спектральные характеристики кислородно-цезиевого (2) и сурьмяно-цезиевого (1) фотоэлементов.

Для получения более полного представления о свойствах фотоэлементов, помимо определения параметров, снимают еще вольт-амперные, световые и частотные характеристики.

Вольт-амперная характеристика выражает зависимость тока от анодного напряжения при неизменном значении светового потока:

$$I_{\Phi} = f(U_a); \Phi = \text{const.}$$

На рис. 12-5 приведены вольт-амперные характеристики вакуумного фотоэлемента (1) и газонаполненного (2).

По форме характеристики вакуумного фотоэлемента похожи на характеристики пентода. Установившуюся величину тока принято называть током насыщения, а ве-

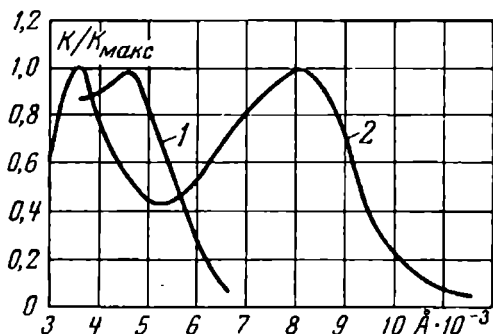


Рис. 12-4. Спектральные характеристики кислородно-цезиевого (1) и сурьмяно-цезиевого (2) фотокатодов.

личину напряжения, при котором устанавливается ток насыщения, — напряжением насыщения. При рабочем режиме вакуумного фотоэлемента используются горизонтальные участки характеристики. Вольт-амперные ха-

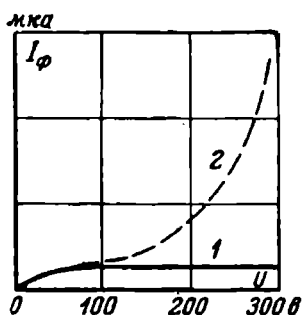


Рис. 12-5. Вольт-амперные характеристики вакуумного (1) и газонаполненного (2) фотоэлементов.

рактеристики газонаполненного фотоэлемента отличаются от характеристики вакуумного тем, что они не имеют области насыщения. Объясняется это возникающим газовым разрядом. При небольшом значении анодного напряжения фототок определяется только фотоэлектронной эмиссией катода. При увеличении анодного напряжения возникает тихий разряд в газе; когда анодное напряжение станет равным напряжению зажигания газа, анодный ток возрастает скачком и уже не управляется световым

поток. Следовательно, анодное напряжение газонаполненных фотоэлементов должно быть меньше напряжения зажигания (не более 300 в), иначе фотоэлектронный катод будет разрушен.

Световая характеристика выражает зависимость тока от интенсивности светового потока при постоянном анодном напряжении:

$$I_{\phi} = f(\Phi); U_a = \text{const.}$$

Световая характеристика вакуумного фотоэлемента (1) линейна, что позволяет применять вакуумные фотоэлементы для измерительных целей (рис. 12-6). Световые характеристики газонаполненных фотоэлементов (2) нелинейны и ток в них с увеличением светового потока возрастает.

Частотная характеристика фотоэлементов выражает зависимость изменения переменной составляющей тока или напряжения на нагрузочном сопротивлении от частоты изменения (модуляции) светового потока. Частотная характеристика вакуумных фотоэлементов (1) очень линейна для широкой полосы частот (рис. 12-7).

Небольшое спадание частотной характеристики объясняется влиянием междуэлектродной емкости фотоэлемента. Частотная характеристика газонаполненных фотоэлементов (2) имеет спад на еще меньших частотах вследствие дополнительного фактора — инерционности тока.

Инерционность тока проявляется в том, что при облучении газонаполненного фотоэлемента ток появляется не мгновенно, а спустя некоторое время. Точно так же при затмении фотоэлемента ток не прекращается сразу, а медленно спадает. Инерционность наблюдается в газонаполненных фотоэлементах. Вакуумные фотоэлементы являются безынерционными.

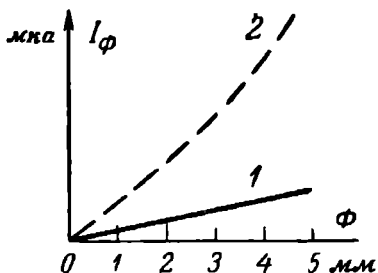


Рис. 12-6. Световые характеристики вакуумного (1) и газонаполненного (2) фотоэлементов.

Утомляемость фотоэлемента выражается в уменьшении чувствительности при длительной его работе. Большую утомляемость имеют кислородно-цезиевые газонаполненные фотоэлементы. После первых 120—200 ч работы в этих фотоэлементах ток уменьшается на 70—75%, т. е. составляет от первоначального значения 25—30%. Утомляемость фотоэлементов зависит от величины светового потока: чем больше световой поток, тем больше утомляемость. После «отдыха» фотоэлемент восстанавливает свою чувствительность.

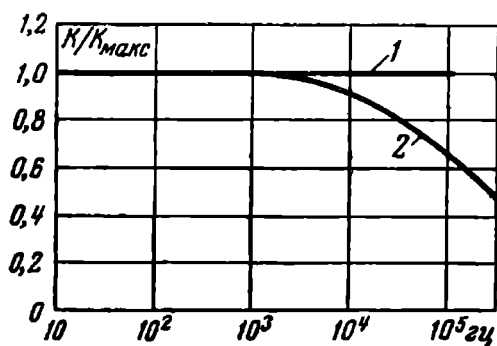


Рис. 12-7. Частотная характеристика вакуумных (1) фотоэлементов и газонаполненных (2).

Усиление токов фотоэлемента. Так как ток очень мал, порядка нескольких микроампер, то его усиливают при помощи электронного усилителя. Поскольку внутреннее сопротивление фотоэлементов большое, то величина нагрузочного сопротивления в цепи фотоэлемента берется порядка сотен килоом и даже 1 Мом. Следует помнить, что, если фотоэлемент временно не работает, его необходимо защищать от света для увеличения срока службы.

Маркировка фотоэлементов. Фотоэлементы, выпускаемые отечественной промышленностью, имеют следующие обозначения: ЦВ — кислородно-цезиевые вакуумные (цезиевые вакуумные); ЦГ — кислородно-цезиевые газонаполненные (цезиевые газонаполненные); СЦВ — сурьмяно-цезиевые вакуумные. Цифра, следующая

щая за буквенным обозначением, указывает порядковый номер разработки фотоэлемента.

В табл. 12-1 приведены основные данные фотоэлементов с фотоэлектронной эмиссией.

Таблица 12-1

Тип фотоэлемента	Вид фотоэлектронного катода	Наполнение	$U_a, \text{в}$	$\Gamma, \text{мкА/дм}^2$	Область спектральной чувствительности, мк	$\lambda, \text{мк}$
ЦГ-1	Кислородно-цезиевый	Газовое	240	150	0,400—1,200	0,800
ЦГ-3	То же	То же	240	200	0,400—1,200	0,800
СЦВ-3	Сурьмяно-цезиевый	Вакуумный	240	100	0,400—0,600	0,450

12.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

К группе полупроводниковых фотоэлементов относятся вентильные фотоэлементы — приборы, в которых в результате облучения их световым потоком возникает э. д. с. В основе действия вентильных фотоэлементов лежат физические процессы, характерные для электронно-дырочных переходов.

Устройство вентильного фотоэлемента схематически показано на рис. 12-8. На металлическую пластину 1 толщиной 1—2 мм наносится слой полупроводникового вещества 2, которое затем подвергается специальной обработке с целью образования электронно-дырочного $p-n$ перехода 3. Слой полупроводника покрывают затем тонким полупрозрачным слоем металла 5.

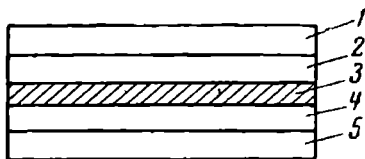


Рис. 12-8. Устройство вентильного фотоэлемента.

Вентильные фотоэлементы являются преобразователями световой энергии в электрическую. Если на такой фотоэлемент направить лучи света, то в $p-n$ переходе возникнет э. д. с., под действием которой во внешней цепи потечет ток. Механизм возникновения фото-э. д. с. и фототока можно объяснить следующим образом. Как известно из предыдущего, равновесное состояние $p-n$ перехода характеризуется:

- 1) равенством токов диффузии и тока проводимости;
- 2) контактным напряжением U_k на зажимах перехода, обусловленным диффузией основных носителей;
- 3) электрическим полем перехода, которое для основных носителей является тормозящим, а для неосновных носителей — ускоряющим.

Если p - n переход или его окрестность подвергается облучению, то кванты света, разрушая ковалентные связи, порождают новые пары носителей, т. е. увеличивают

концентрацию неосновных носителей в области p - n перехода. Порожденные квантами света неосновные носители (дырки n -области и электроны p -области), диффундируя к p - n переходу, будут разделяться ускоряющим полем перехода. Носители, порожденные квантами света в самом p - n переходе, также будут разделяться полем перехода. Все это приведет к увеличению тока проводимости и нарушению прежнего равновесного состояния. Возросший ток проводимости вызовет некоторое снижение контактного напряжения: $U_{k,ф} < U_k$. Разность между этими напряжениями и представляет собой фото-

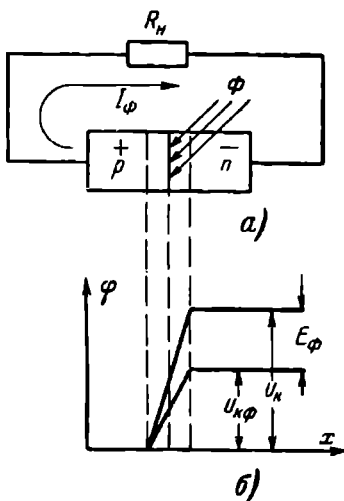


Рис. 12-9. Принцип действия (а) и потенциальная диаграмма (б) фотоэлемента.

э. д. с.: $E_{\phi} = U_k - U_{k,ф}$. На рис. 12-9,а схематически показан принцип действия вентильного фотоэлемента с одним p - n переходом, а на рис. 12-9,б приведена потенциальная диаграмма.

Вентильные фотоэлементы могут использоваться двояким образом:

вентильный фотоэлемент может включаться в рабочую цепь без внешних источников питания, так как он сам создает э. д. с. для питания цепи (вентильный режим);

вентильный фотоэлемент может использоваться с внешним источником питания (фотодиодный режим).

При фотодиодном режиме (фотодиод) внешний источник э. д. с. целесообразно включать в запертом направлении, при этом ток, протекающий через фотодиод, будет прямо пропорционален световому потоку:

$$I = I_T + I_\Phi = I_T + k\Phi,$$

где k — коэффициент пропорциональности;

I_T — темновой ток (освещение отсутствует).

В силу этого световая характеристика вентильного фотоэлемента, включенного в фотодиодном режиме, будет линейной.

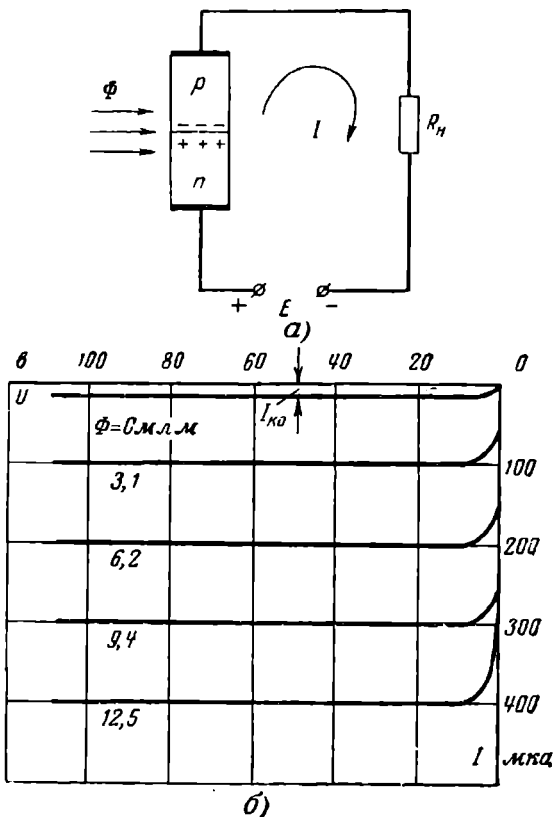


Рис. 12-10. Фотодиод.

а — схема включения; б — вольт-амперная характеристика.

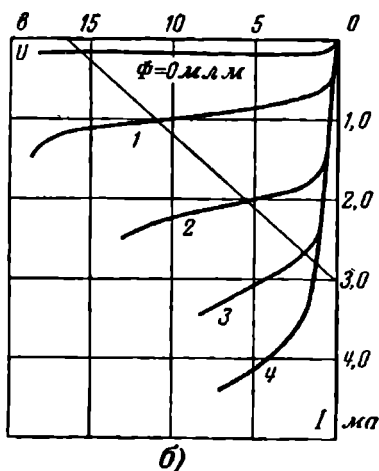
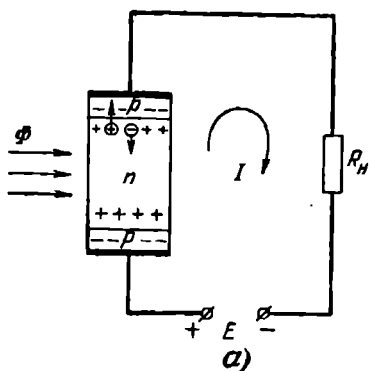


Рис. 12-11. Схема включения фототранзистора (а) и его вольт-амперные характеристики (б).

тивление перехода уменьшается, и почти все напряжение падает на сопротивлении R_{II} .

Фототранзистор — вентиляльный фотоэлемент с двумя $p-n$ переходами. На рис. 12-11,а показана схема его включения. Вывод базы отсутствует и $I_b=0$. Образующиеся в базе в результате облучения световым потоком неосновные носители втягиваются полем коллекторного перехода. Оставшиеся в базе электроны создают

Фотодиод по своему устройству не отличается от вентиляного фотоэлемента. В качестве полупроводника в нем применяется высокоомный германий.

К фотодиоду прикладывается весьма высокое напряжение в обратном направлении (рис. 12-10,а), что облегчает переход неосновных носителей через $p-n$ переход. Вследствие этого интегральная чувствительность фотодиодов очень высока (примерно 30 000 $\mu\text{ка}/\text{лм}$). Вольт-амперные характеристики фотодиода приведены на рис. 12-10,б. Если $\Phi=0$, то через $p-n$ переход протекает $I_{к0}$, образующийся при движении неосновных носителей под действием внешнего напряжения. При увеличении светового потока число вновь возникающих носителей тока и сам ток увеличиваются;

пространственный заряд, снижающий высоту потенциального барьера эмиттерного перехода. Из эмиттера в базу, а затем в коллектор диффундируют основные носители (дырки), увеличивая коллекторный ток. Чувствительность фототранзистора значительно выше чувствительности фотодиода и равна примерно 1 а/лм . Вольт-амперные характеристики фототранзистора приведены на рис. 12-11,б.

12-6. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ

Фотоэлементы с фотоэлектронной эмиссией имеют сравнительно малую интегральную чувствительность, поэтому для получения тока, достаточного для практических целей, приходится усиливать его, применяя многокаскадный электронный усилитель. Аналогичную функцию, т. е. создание тока и усиление его, выполняет прибор, получивший название фотоэлектронный умножитель. Фотоэлектронным умножителем называется фотоэлектронный прибор, в котором имеются фотоэлектронный катод и усилитель, работающий на принципе вторичной электронной эмиссии. Сокращенно фотоэлектронный умножитель обозначается ФЭУ.

Впервые фотоэлектронный умножитель под названием «трубка Кубецкого» был предложен в 1936 г. инженером Кубецким. Позднее появились конструкции фотоэлектронных умножителей профессора П. В. Тимофеева и академика С. А. Векшинского.

Усиление тока в умножителях достигается за счет вторичной эмиссии со специальных электродов — вторично-электронных катодов (динодов), бомбардируемых электронами с других таких же электродов. Схематически устройство фотоэлектронного умножителя показано на рис. 12-12,а. Электроны, эмиттируемые фотоэлектронным катодом 1 при облучении его световым потоком, устремляются под воздействием ускоряющего электрического поля к первому вторично-электронному катоду 3 (диноду), находящемуся под положительным потенциалом. Поток электронов, увеличивающийся от динода к диноду, поступает на анод 2. На поверхность вторично-электронных катодов наносится кислородно-цезиевое, медно-серно-цезиевое или другое сложное покрытие,

обеспечивающее коэффициент вторичной эмиссии $\delta > 1$ (обычно $\sigma = 6-8$). Таким образом, если при данном световом потоке ток с фотоэлектронного катода равен I_ϕ , то ток первого вторично-электронного катода равен σI_ϕ , второго — уже $\sigma^2 I_\phi$ и т. д.

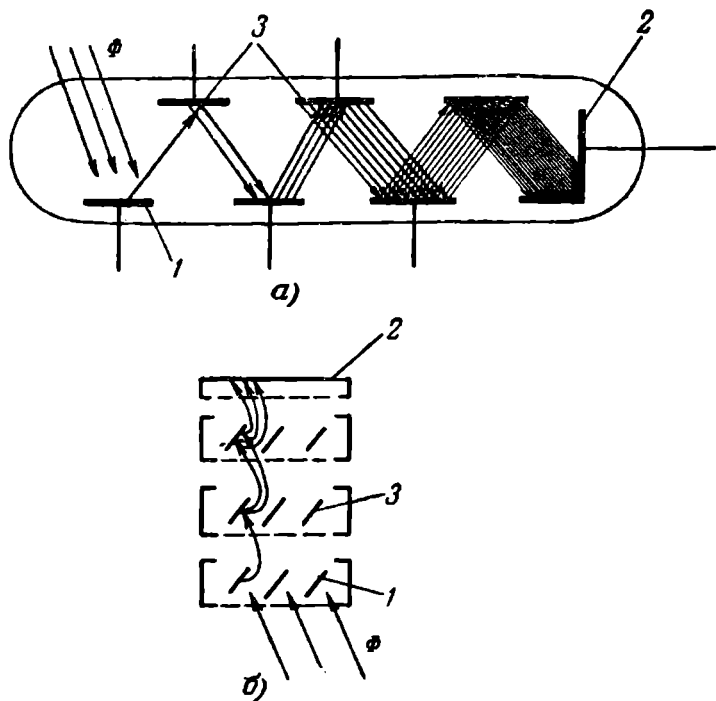


Рис. 12-12. Устройство фотоэлектронного умножителя.
 а — обычного; б — сквозного действия; 1 — фотоэлектронный катод;
 2 — анод; 3 — вторично-электронные катоды.

Общий коэффициент усиления тока в умножителе

$$K_y = \sigma^n,$$

где n — число вторично-электронных катодов (ступеней).

Для увеличения коэффициента усиления K_y поток электронов от одного катода к другому стремится сфо-

кусируют так, чтобы все вторичные электроны падали на поверхность следующего катода.

Интегральная чувствительность фотоэлектронных умножителей равна произведению интегральной чувствительности фотоэлемента на входе умножителя на коэффициент усиления тока:

$$K_{\phi} = kK_{y}.$$

Величина K_{ϕ} достигает сотен ампер на люмен и так же, как и коэффициент K_{y} , увеличивается с повышением положительных напряжений, подводимых к вторично-электронным катодам и аноду.

Фотоэлектронные умножители применяются главным образом для регистрации и усиления слабых световых потоков. Поэтому при очень высокой интегральной чувствительности величина анодного тока обычно не превышает десятков миллиампер.

На рис. 12-12,б схематически показана конструкция одного из приборов, получивших название фотоумножителей сквозного действия. Вторично-электронные катоды расположены здесь в виде жалюзи. Фотоэлектроны и вторичные электроны попадают в последующую ступень через отверстия между отдельными катодами.

Промышленностью выпускаются и однокаскадные фотоэлектронные умножители типов ФЭУ-1 и ФЭУ-2, которые применяются в звуковом кино, заменяя газонаполненные фотоэлементы, создающие искажения. Конструктивно однокаскадный ФЭУ-1 состоит из стеклянной колбы. Кислородно-цезиевый фотоэлектронный катод нанесен на внутренней стороне колбы, а против него расположен вторично-электронный катод. Анод выполнен в виде сетки и помещается между фотоэлектронным катодом и вторично-электронным катодом, ближе к последнему. Схема включения ФЭУ-1 приведена на рис. 12-13,а.

Принцип действия однокаскадного ФЭУ заключается в следующем. При освещении фотоэлектронного катода из него выбиваются первичные фотоэлектроны, которые под действием электрического поля с большой скоростью летят к аноду. Так как анод выполнен в виде редкой металлической сетки, то значительная часть электронов пролетает сквозь сетку и, ударяясь о поверхность вторично-электронного катода, выбивает из него вторичные

электроны, которые будут притягиваться анодом, имеющим по отношению к вторично-электронному катоду повышенный потенциал. Фотоэлектронный умножитель ФЭУ-2 имеет в принципе то же устройство, что и ФЭУ-1. Разница заключается в уменьшении габарита и конструкции цоколя.

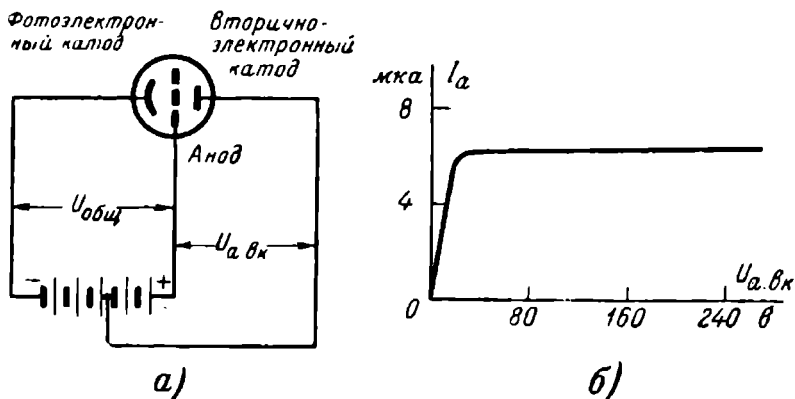


Рис. 12-13. Схема включения (а) и вольт-амперная характеристика (б) фотоэлектронного умножителя типа ФЭУ-1.

На рис. 12-13,б приведена вольт-амперная характеристика, выражающая зависимость анодного тока от изменения напряжения на аноде относительно вторично-электронного катода. Как видно из кривой, напряжение на аноде не должно быть меньше 35—40 в (напряжения насыщения). При меньшем напряжении анодный ток резко снижается.

12-7. ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

Фотосопротивлением называется полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого меняется под действием светового потока. Материалом для фотосопротивлений служат соединения сернистого кадмия, висмута и т. п., обладающие свойствами полупроводников. Устройство фотосопротивления показано на рис. 12-14. На пластину из диэлектрика 1 наносится слой полупроводника 2, на который крепятся металлические контакты 3. Фотосопротивление в целях защи-

ты от влаги покрывается прозрачным лаком и монтируется в пластмассовый корпус, имеющий отверстие для проникновения света.

Принцип действия фотосопротивлений основан на образовании дополнительных подвижных носителей заряда в результате поглощения световой энергии. Под действием лучистой энергии возникают дополнительные носители тока — электроны проводимости и дырки, вследствие чего уменьшается сопротивление полупроводника. С энергетической точки зрения увеличение проводимости

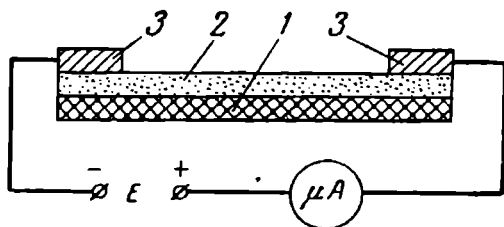


Рис. 12-14. Устройство фотосопротивления.

объясняется переходом электронов под действием света из валентной зоны в зону проводимости. Для получения фототока необходимо в цепь последовательно с фотосопротивлением включить посторонний источник э. д. с., причем полярность источника тока безразлична.

Вольт-амперные характеристики фотосопротивлений линейны в пределах максимально допустимой мощности рассеяния на них. Падение напряжения на фотосопротивлении не должно превышать 25—30 в. При большем напряжении на фотосопротивлении вследствие чрезмерного нагрева его произойдет разрушение светочувствительного слоя.

Световые характеристики фотосопротивлений обычно нелинейны. Особенностью световых характеристик является наличие темнового тока, т. е. тока, протекающего через фотосопротивление при отсутствии освещенности (в темноте). На рис. 12-15 показаны вольт-амперная (а) и световая (б) характеристики фотосопротивлений. Темновой ток уменьшает чувствительность фотозлектронных приборов к полезному световому сигналу, и поэтому наличие темновых токов нежелательно.

Интегральная чувствительность фотосопротивлений определяется несколько иначе, чем для фотоэлементов с фотоэлектронной эмиссией. Под интегральной чувствительностью фотосопротивлений понимается отношение разности токов: при освещении $I_{св}$ и темнового I_T к световому потоку, падающему на сопротивление:

$$\delta = \frac{I_{св} - I_T}{\Phi} \text{ [ма/лм]}. \quad (12-5)$$

При этом должно быть указано, какое напряжение имелось на фотосопротивлении U_{ϕ} и какой величины был

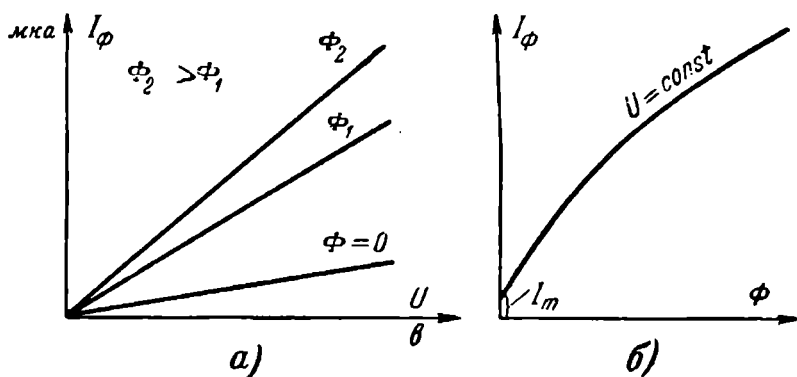


Рис. 12-15. Вольт-амперная (а) и световая (б) характеристики фотосопротивлений.

световой поток Φ , когда определялась интегральная чувствительность, так как величина тока, протекающего через фотосопротивление, является функцией двух указан-

Таблица 12-2

Маркировка	Материал	Рабочее напряжение, в	Чувствительность, ма/лм	Темновой ток, мка	λ , мк
ФС-А1	Сернистый свинец	4—40	20	150	2,1
ФС-К1	Сернистый кадмий поликристаллический	100—300	1 200	1,5	0,52
ФС-КМ1	Сернистый кадмий монокристаллический	60—150	2 000	—	0,51

ных величин и выражение чувствительности без этих данных будет неполным.

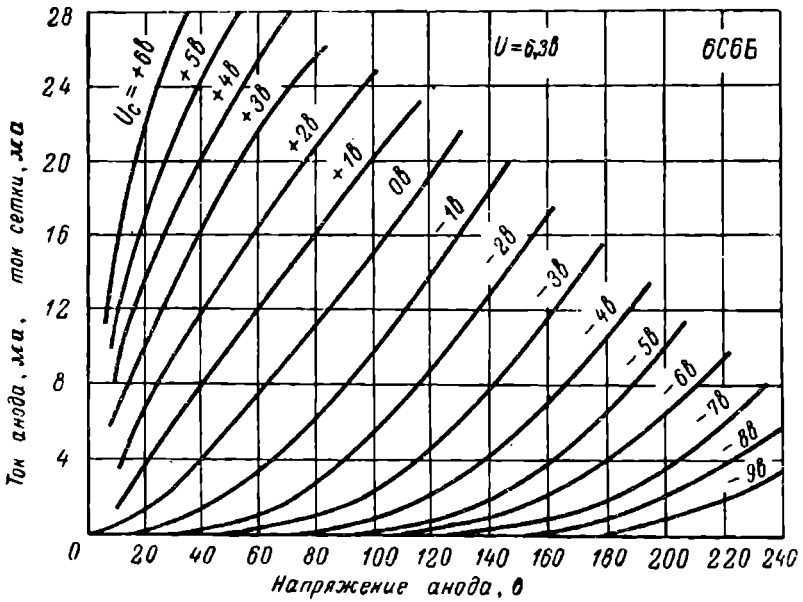
Обозначения фотосопротивлений состоят из букв ФС (фотосопротивление), за которыми следуют буква и цифра, характеризующие состав материала полупроводника и конструктивное оформление. Основные данные некоторых типов фотосопротивлений приведены в табл. 12-2.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется фотоэлектронной эмиссией?
 2. Сформулировать законы фотоэлектронной эмиссии.
 3. Фотоэлемент с фотоэлектронной эмиссией и его конструкция.
 4. Типы фотоэлектронных катодов и их устройство.
 5. Что понимается под интегральной и спектральной чувствительностью фотоэлемента?
 6. В чем заключается отличие вольт-амперной характеристики газонаполненного фотоэлемента от вакуумного?
 7. Что произойдет с газонаполненным фотоэлементом, если анодное напряжение превысит максимально допустимое значение?
 8. Что представляет собой фотоэлектронный умножитель?
 9. Фотосопротивления и их устройство. Преимущество фотосопротивлений перед фотоэлементами с фотоэлектронной эмиссией.
 10. Вещильный фотоэлемент (устройство и принцип действия).
 11. Фотодиоды. Их устройство и принцип действия.
 12. Область применения фотоэлектронных приборов.
-

ПРИЛОЖЕНИЯ

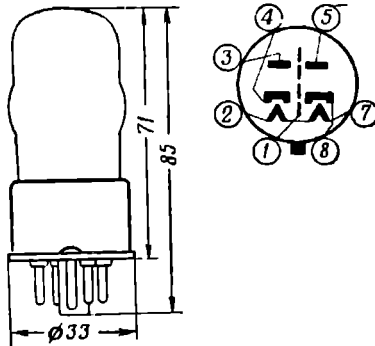
Семейство анодных характеристик триода 6С6Б



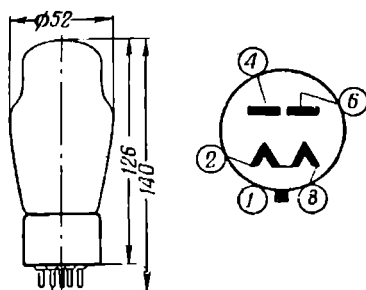
ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Внешний вид некоторых типов электронных ламп и их цоколевка
Лампы с октальным катодом

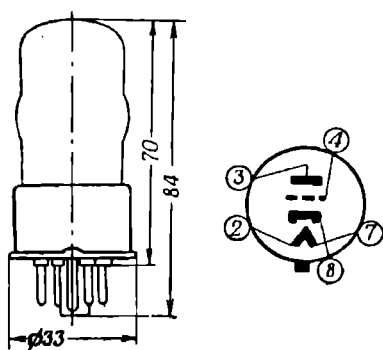
6Х6С



5Ц3С

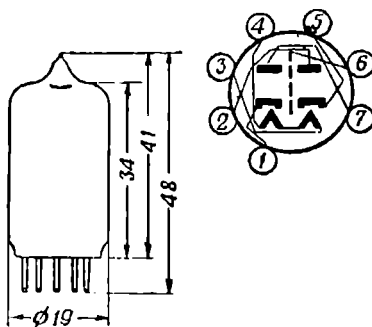


6С2С

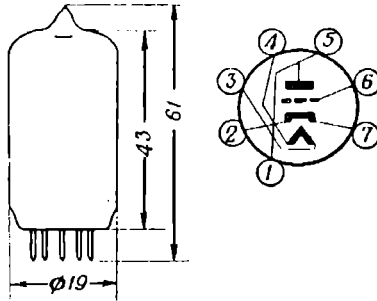


Миниатюрные лампы (пальчиковые)

6Х2П

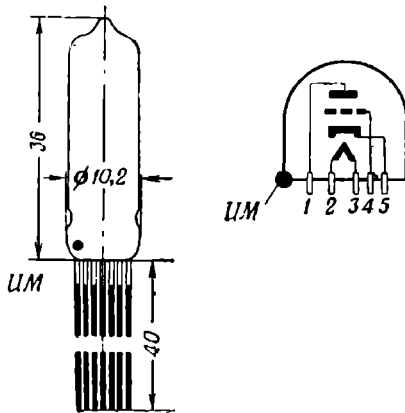


6С2П

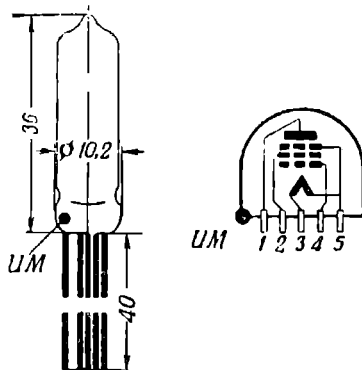


Сверхминиатюрные лампы

6С6Б



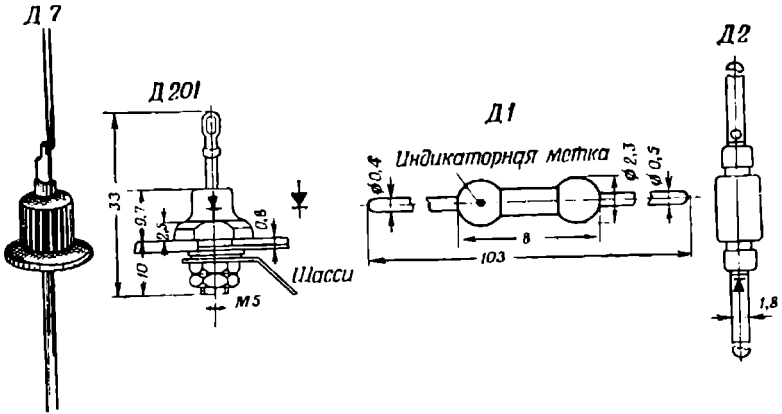
1П3Б



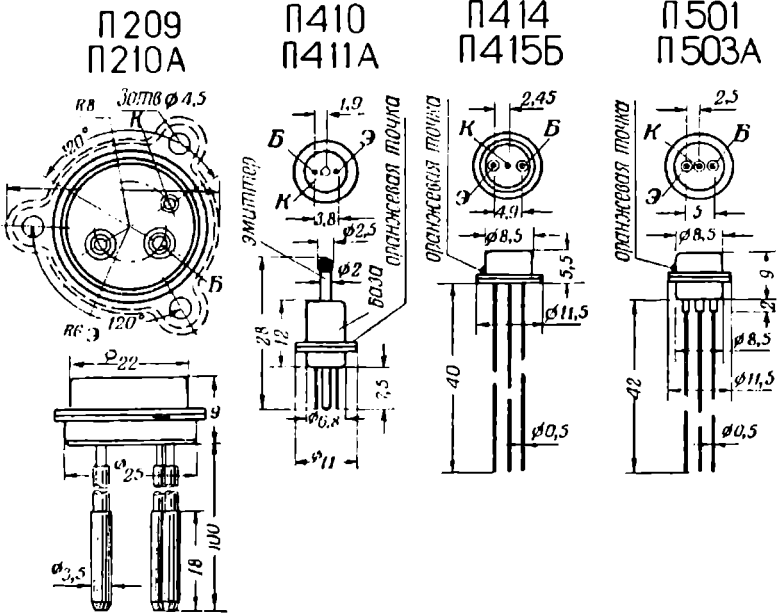
Диоды

Плоскостные

Точечные



Транзисторы



ЛИТЕРАТУРА

1. Власов В. Ф., Электронные и ионные приборы, Связьиздат, 1960.
 2. Гуревич М. Д., Электровакуумные приборы, Военное издательство Министерства обороны Союза ССР, 1960.
 3. Кауфман М. С. и Янкин Г. М., Электронные приборы, Госэнергоиздат, 1960.
 4. Гягунов Г. А., Электровакуумные и полупроводниковые приборы, Госэнергоиздат, 1962.
 5. Степаненко И. П., Основы теории транзисторов и транзисторных схем, Госэнергоиздат, 1963.
 6. Федотов Я. А., Основы физики полупроводниковых приборов, изд-во «Советское радио», 1963.
 7. Бройде А. М. и Тарасов Ф. В., Справочник по электровакуумным и полупроводниковым приборам, Госэнергоиздат, 1962.
 8. Полупроводниковые диоды и транзисторы, Справочник под ред. Н. Н. Горюнова, изд-во «Энергия», 1964.
 9. Дулин В. Н., Электронные и ионные приборы, Госэнергоиздат, 1963.
-