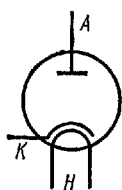


## § 22.3. Электронные и полупроводниковые выпрямители и усилители

1. В этом параграфе мы рассмотрим физические принципы усиления электромагнитных колебаний и выпрямления переменного тока, т. е. превращения электрического тока, переменного как по численному значению, так и по направлению, в ток постоянного направления. Электрические цепи, предназначенные для этих целей, получили названия **усилителей** и **выпрямителей**. Важнейшими элементами цепей усилителей и выпрямителей являются электронные лампы и полупроводниковые устройства.

2. **Электронные лампы** основаны на явлении термоэлектронной эмиссии (см. § 10.3). Простейшим типом электронных ламп является диод (двухэлектродная лампа). Диод представляет собой запаянный стеклянный баллон с высоким вакуумом, в котором находятся два металлических электрода — анод и катод. Анод имеет форму тонкостенного кругового цилиндра, а катод — нити, натянутой по оси этого цилиндра. Условное изображение диода показано на рис. 22.11. При пропускании тока через нить накала (катод) она сильно нагревается и начинает испускать термоэлектроны.

Рис. 22.11



Если анод лампы присоединить к положительному полюсу аккумуляторной батареи, а катод — к отрицательному (см. рис. 10.7), то, как показано в § 10.3, в цепи лампы устанавливается постоянный ток  $I_a$ . Зависимость термоэлектронного тока  $I_a$  в лампе от анодного напряжения  $U_a$  была рассмотрена в § 10.3. Описанный нами **диод прямого накала** обладает существенным недостатком: при нагреве нити переменным током ее температура периодически изменяется, что, в свою очередь, вызывает колебания анодного тока в лампе. Более совершенными являются **диоды с подогревными катодами**.

В подогревном катоде вольфрамовая нить накала помещается внутри изолированного от нее металлического катода и служит только для нагрева последнего. Периодические колебания тока в нити лампы практически не влияют на температуру сравнительно массивного катода. Условное изображение диода с подогревным катодом показано на рис. 22.12.

3. Диоды обладают односторонней проводимостью: ток в лампе возможен только в том случае, когда потенциал анода выше потенциала катода ( $U_a > 0$ ). Поэтому диоды можно применять для выпрямления переменного тока. Вакуумная двухэлектродная электронная лампа, служащая для выпрямления переменного тока, называется **кенотроном**. Схема простейшего **однополупериодного кенотронного выпрямителя** приведена на рис. 22.13. Первичная обмотка  $I$  трансформатора  $T$  соединена с источником переменного тока. Одна из вторичных обмоток  $III$  служит для питания нити накала кенотрона. Концы другой вторичной обмотки  $II$  присоединены к аноду и катоду кенотрона. В эту цепь включен потребитель выпрямленного тока, сопротивление которого обозна-

чено через  $R$ . Легко видеть, что электрический ток в лампе и потребителе может иметь только одно направление, показанное на рис. 22.13 стрелками. Однако сила  $I$  этого тока периодически изменяется. Такой ток называется **пульсирующим**. Если выпрямляемый переменный ток изменяется по гармоническому закону, то в течение первой половины

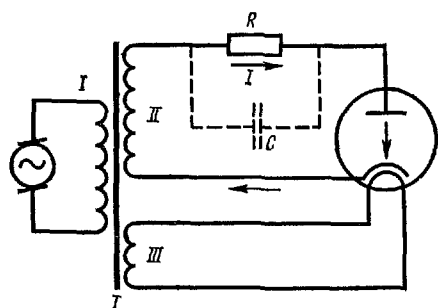


Рис. 22.13

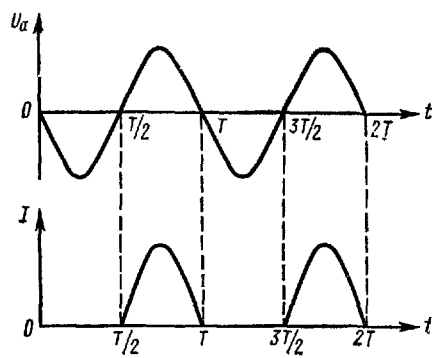


Рис. 22.14

периода, когда анодное напряжение  $U_a$  на лампе отрицательно, ток  $I = 0$ , а в течение второй половины периода постепенно возрастает до максимального значения и затем уменьшается до нуля (рис. 22.14).

Для сглаживания пульсаций выпрямленного тока  $I$  параллельно потребителю  $R$  включают специальные устройства, называемые **фильтрами**. Простейшим фильтром служит конденсатор  $C$ , показанный на рис. 22.13 пунктиром В процессе возрастания тока  $I$  и напряжения  $U_R$  на потребителе конденсатор заряжается, а затем при уменьшении  $U_R$  разряжается, сглаживая пульсации тока  $I$ . Более совершенным является фильтр, изображенный на рис. 22.15. Он состоит из катушки с железным сердечником, обладающей большой индуктивностью  $L$  и называемой **дрроселем**, и из двух конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ . Сглаживающее действие дросселя на пульсирующий ток основано на явлении самоиндукции.

Используя два диода или диод с двумя анодами (сдвоенный

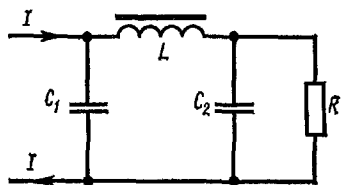


Рис. 22.15

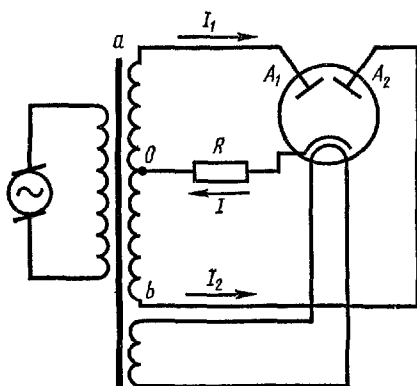


Рис. 22.16

диод), можно осуществить двухполупериодное выпрямление тока. Схема двухполупериодного кенотронного выпрямителя показана на рис. 22.16. Потребитель  $R$  тока присоединен к катоду сдвоенного диода и к средней точке  $O$  вторичной обмотки  $ab$  трансформатора. Направление выпрямленного тока  $I$  показано стрелкой. Аноды  $A_1$  и  $A_2$  лампы работают поочередно. Пусть в течение первого полупериода э. д. в во вторичной обмотке трансформатора имеет такой знак ( $\mathcal{E}_{ab} > 0$ ), что на-

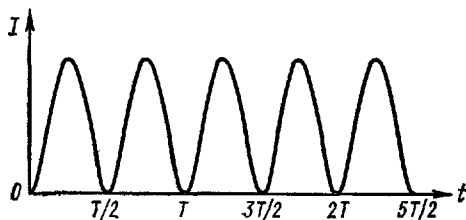


Рис. 22.17



Рис. 22.18

пряжение  $U_1$  между анодом  $A_1$  и катодом положительно, а напряжение  $U_2$  между анодом  $A_2$  и катодом отрицательно. В этом случае ток в лампе идет от анода  $A_1$  к катоду ( $I = I_1$ ). Во втором полупериоде знак э. д. с. изменяется на противоположный, так что  $U_1 < 0$ , а  $U_2 > 0$ . Поэтому ток в лампе идет уже от анода  $A_2$  к катоду ( $I = I_2$ ). Зависимость выпрямленного тока  $I$  от времени представлена на рис. 22.17. Сглаживание такого пульсирующего тока проще, чем в случае, изображенном на рис. 22.14.

4 Наряду с электронными выпрямителями переменного тока широкое распространение в технике получили ионные и полупроводниковые выпрямители. Примером ионного выпрямителя является упомянутый в § 12.5 ртутный выпрямитель.

Действие полупроводниковых выпрямителей — купроксного (меднозакисного), селенового и германиевого — основано на односторонней (вентильной) проводимости  $p$ - $n$ -перехода, т. е. контакта дырочного и электронного полупроводников (см. § 13.7).

Рабочий элемент купроксного выпрямителя (купроксный вентиль) показан на рис. 22.18. На медную пластину 3 путем ее химической обработки нанесен слой 2 закиси меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ , покрытый сверху тонким слоем серебра 1. Медная пластина и слой серебра играют роль электродов выпрямителя. Благодаря специальному выбору способа окисления меди и температурного режима этого процесса в закиси меди образуются два слоя с различными видами проводимости. Слой, прилегающий к медной пластине, обладает электронной проводимостью, а следующий слой — дырочной проводимостью. Граница между этими слоями закиси меди ( $p$ - $n$ -переход) обладает вентильными свойствами: пропускает ток только в направлении от закиси меди к медному электроду. Таким образом, купроксный вентиль, подобно электронному диоду, выпрямляет переменный ток. Анодом купроксного диода является серебряный электрод, а катодом — медный.

В рабочем элементе **селенового выпрямителя** анодом служит алюминиевая или стальная пластина, на которую нанесен слой кристаллического селена, являющегося дырочным полупроводником. В качестве катода применен специальный сплав, содержащий кадмий. Вблизи катода образуется слой селенида кадмия, представляющий собой электронный полупроводник<sup>1</sup>. *p-n*-Переход на границе между селеном и селенидом кадмия вызывает выпрямление переменного тока в селеновом вентиле — диоде.

Следует заметить, что наименование электродов полупроводниковых диодов введено нами по аналогии с наименованием электродов электронных ламп, т. е. на основании направления тока в н у т р и диода. При этом получается, что во внешней цепи диода ток идет от катода к аноду. Так как для потребителя выпрямленного тока полупроводниковый вентиль играет роль источника тока, то указанное выше наименование его электродов противоречит общепринятой терминологии. Поэтому для внешней цепи анодом купроксного выпрямителя является медная пластина, а анодом селенового выпрямителя — «катодный» сплав.

Основным элементом **германиевого силового диода** является кристалл германия, одна часть которого обладает электронной, а другая — дырочной проводимостью. Для получения области дырочной проводимости в кристалл германия, обладающий проводимостью *n*-типа, вводится небольшая примесь индия. Германиевые диоды позволяют выпрямлять переменные токи со сравнительно большой амплитудой напряжения (до 400 В). Они имеют малые габариты и вес.

Все рассмотренные выше полупроводниковые диоды очень чувствительны к изменениям температурного режима работы. При повышении температуры их вентильное действие заметно понижается. В случае низких температур сильно возрастают электрическое сопротивление слоя полупроводника в диоде и потери энергии при выпрямлении тока. Поэтому рабочий диапазон температуры для различных типов полупроводниковых диодов колеблется от  $-60$  до  $+(50 \div 90)$  °С.

На рис. 22.19 показано условное обозначение полупроводникового диода, а на рис. 22.20 и 22.21 — соответственно схемы однополупериодного и двухполупериодного полупроводниковых выпрямителей.

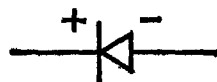


Рис. 22.19

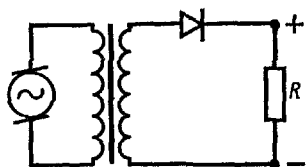


Рис. 22.20

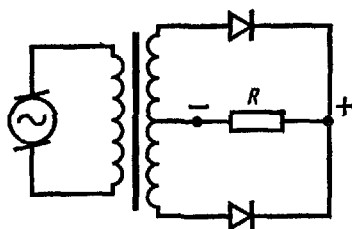


Рис. 22.21

<sup>1</sup> В некоторых селеновых вентилеях роль электронного полупроводника играет сульфид кадмия. В этом случае поверхность селена до нанесения катодного сплава покрывается тонким слоем серы.

5. Важной задачей радиотехники является усиление электромагнитных колебаний. Для этой цели применяются электронные и полупроводниковые триоды, а также более сложные многоэлектродные электронные лампы (тетроды, пентоды).

Трехэлектродная электронная лампа (**триод**) отличается от рассмотренного выше диода тем, что в ней между анодом и катодом помещен третий электрод, называемый **управляющей сеткой**. В простейшем триоде прямого накала с цилиндрическим анодом сетка  $C$  представляет

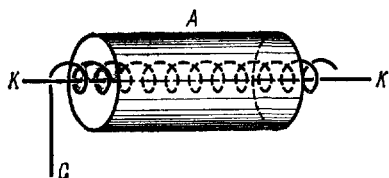


Рис. 22.22

собой тонкий металлический провод, изогнутый по винтовой линии, ось которой совпадает с осью анода  $A$  и нитью накала  $K$  (рис. 22.22). Условное обозначение триода прямого накала показано на рис. 22.23,а, а триода с подогревным катодом — на рис. 22.23,б.

Управляющая сетка триода расположена вблизи катода. Поэтому даже при малом напряжении  $U_c$  между сеткой и катодом вблизи последнего создается сильное электрическое поле, оказывающее существенное влияние на движение электронов в триоде. На рис. 22.24 показана зависимость анодного тока  $I_a$  в триоде от сеточного напряжения  $U_c$  при одном и том же накале лампы и различных постоянных значениях напряжения  $U_a$  между анодом и катодом. Зависимость  $I_a$  от  $U_c$  при  $U_a = \text{const}$  и неизменном накале называется **статической сеточной характеристикой** лампы. Вид сеточных характеристик триода, изображенных на рис. 22.24, легко понять, если учесть, что движение электронов в лампе определяется результирующим электрическим полем анода и сетки. Если потенциал сетки выше потенциала катода ( $U_c > 0$ ), то создаваемое ею вблизи катода электрическое поле совпадает по направлению с основным электрическим полем, обусловленным различием потенциалов анода и катода. Это дополнительное поле способствует рассасыванию электронного облака у катода. Поэтому с увеличением  $U_c$  анодный ток в триоде возрастает. Наоборот, если  $U_c < 0$ , то концентрация электронов в облаке увеличивается, а анодный ток уменьшается. Потенциал сетки, при котором анодный ток полностью прекращается, называется **потенциалом запирания лампы**. Потенциал запирания лампы зависит от анодного напряжения  $U_a$ : чем оно больше,

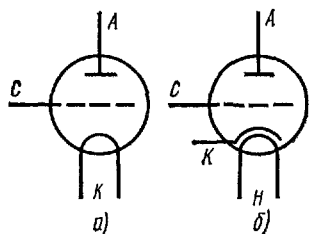


Рис. 22.23

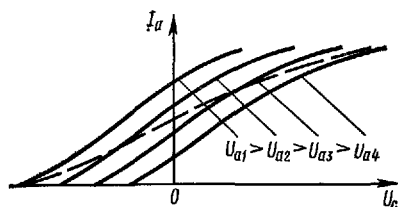


Рис. 22.24

тем больший по абсолютному значению отрицательный потенциал следует создать на сетке для того, чтобы нейтрализовать основное электрическое поле и «запереть» лампу.

Во всех предыдущих рассуждениях не принималась во внимание возможность улавливания электронов положительно заряженной сеткой (при  $U_c > 0$ ). Это связано с тем, что площадь поверхности сетки мала по сравнению с площадью свободных промежутков между ее витками. Поэтому подавляющая часть электронов, испускаемых катодом, свободно пролетает сквозь сетку. Однако по мере увеличения положительного потенциала сетки утечка электронов через нее (так называемый **сеточный ток**) возрастает. При больших значениях  $U_c$  влиянием этого эффекта пренебрегать уже нельзя.

Сеточные характеристики триода имеют довольно сложную форму. Однако в области значений  $U_c$ , близких к нулю, сеточные характеристики триода можно приближенно заменить семейством наклонных прямых<sup>1</sup>. Величина  $S$ , численно равная тангенсу угла наклона сеточной характеристики к оси  $U_c$ , называется **крутизной сеточной характеристики триода**

$$S = \left( \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right) U_a.$$

Зависимость анодного тока  $I_a$  от анодного напряжения  $U_a$  при  $U_c = \text{const}$  и постоянном накале называется **статической анодной характеристикой лампы**. На рис. 22.25 показано семейство статических анодных характеристик триода, соответствующих различным значениям потенциала сетки. Эти характеристики легко построить, если даны статические сеточные характеристики лампы. Наоборот, зная анодные характеристики триода, можно построить его сеточные характеристики. Величина  $R_i$ , численно равная котангенсу угла между касательной к статической анодной характеристике и осью  $U_a$ , называется **внутренним сопротивлением триода**

$$R_i = \left( \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right) U_c.$$

При постоянном напряжении

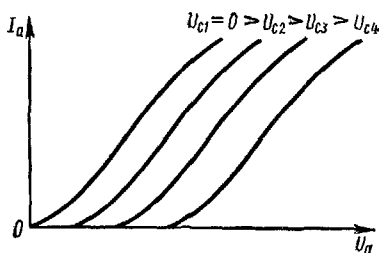


Рис. 22.25

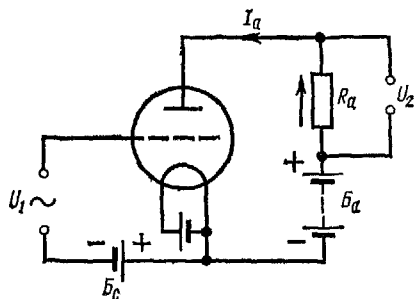


Рис. 22.26

<sup>1</sup> В зависимости от конструкции у некоторых триодов эта область может быть смещена в сторону отрицательных значений  $U_c$  (левые лампы) или в сторону положительных значений  $U_c$  (правые лампы).

накала анодный ток в триоде зависит только от анодного и сеточного напряжений:  $I_a = f(U_a, U_c)$ . Следовательно, приращение  $dI_a$  анодного тока, вызванное одновременно изменением анодного напряжения на  $dU_a$  и сеточного на  $dU_c$ , будет равно

$$dI_a = \left( \frac{\partial I_a}{\partial U_a} \right)_{U_c} dU_a + \left( \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right)_{U_a} dU_c, \quad \text{или} \quad dI_a = \frac{1}{R_i} dU_a + S dU_c.$$

Обозначив

$$\mu = R_i S, \quad (22.36)$$

получим приращение анодного тока в триоде:

$$dI_a = \frac{1}{R_i} (dU_a + \mu dU_c). \quad (22.37)$$

Из формулы (22.37) видно, что приращение сеточного напряжения вызывает в  $\mu$  раз большее изменение анодного тока в триоде, чем такое же изменение анодного напряжения. Величина  $\mu$  называется **статическим коэффициентом усиления** трехэлектродной лампы. Величина

$D = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{R_i S}$  называется **проницаемостью лампы**.

6. На рис. 22.26 представлена простейшая схема усилителя переменного напряжения, основанного на свойствах электронного триода. Переменное напряжение  $U_1$ , подлежащее усилению, подается на сетку триода. Усиленное напряжение  $U_2$  снимается с концов активного сопротивления  $R_a$ , включенного в анодную цепь. Аккумуляторные батареи  $B_c$  и  $B_a$  создают соответственно постоянное отрицательное напряжение  $U_{c0}$  между сеткой и катодом триода и положительное напряжение  $U_a$  между анодом и катодом. Величина  $U_{c0}$  называется **сеточным смещением**. Если э. д. с. батареи  $B_c$  равна  $\mathcal{E}_1$ , то  $U_{c0} = -\mathcal{E}_1$ . Полное напряжение между сеткой и катодом

$$U_c = U_{c0} + U_1 = -\mathcal{E}_1 + U_1. \quad (22.38)$$

Анодное напряжение лампы

$$U_a = \mathcal{E}_2 - I_a (R_a + r_a),$$

где  $\mathcal{E}_2$  — э. д. с. батареи  $B_a$ ,  $r_a$  — ее внутреннее сопротивление,  $I_a$  — сила анодного тока. Обычно  $r_a \ll R_a$ , поэтому можно считать, что

$$U_a = \mathcal{E}_2 - I_a R_a. \quad (22.39)$$

Так как

$$I_a R_a = U_2, \quad (22.40)$$

окончательно получаем

$$U_a = \mathcal{E}_2 - U_2. \quad (22.39')$$

Выше было показано, что анодный ток в триоде зависит от напряжения  $U_c$  (см. рис. 22.24). Из формулы (22.39) следует, что при посто-

янных  $\mathcal{E}_2$  и  $R_a$  анодное напряжение уменьшается с ростом  $U_c$ . Поэтому зависимость  $I_a$  от  $U_c$  при постоянных  $\mathcal{E}_2$  и  $R_a$  изображается более пологой кривой, чем статические сеточные характеристики. Такая зависимость называется **динамической характеристикой триода**. Она изображена пунктирной линией на рис. 22.25.

Из формул (22.38), (22.39') и (22.40) следует, что

$$dU_c = dU_1, \quad dU_a = -dU_2 \quad \text{и} \quad dI_a = dU_2/R_a.$$

Подставив эти значения в формулу (22.37), получим

$$\frac{dU_2}{R_a} = \frac{1}{R_i} (-dU_2 + \mu dU_1)$$

или

$$K = \frac{dU_2}{dU_1} = \frac{R_a}{R_a + R_i} \mu = \frac{\mu}{1 + R_i/R_a}. \quad (22.41)$$

Величина  $K$ , показывающая, во сколько раз изменение выходного напряжения  $U_2$  больше изменения входного напряжения  $U_1$ , называется **коэффициентом усиления**. Таким образом, коэффициент усиления напряжения в рассмотренной нами схеме пропорционален статическому коэффициенту усиления триода и зависит от отношения внутреннего сопротивления триода к величине активного сопротивления в его анодной цепи. При  $R_a \gg R_i$   $K \approx \mu$ .

Если статические анодные и сеточные характеристики триода имеют форму прямых линий, то его параметры  $R_i$  и  $S$ , а следовательно, и  $\mu$  постоянны независимо от значений  $U_c$  и  $U_a$ . В этом случае коэффициент усиления  $K$  также постоянен. Тогда формулу (22.41) можно переписать в интегральной форме, заменив бесконечно малые приращения  $U_1$  и  $U_2$  их конечными приращениями:

$$\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \frac{\mu}{1 + R_i/R_a}. \quad (22.41')$$

В действительности параметры  $R_i$  и  $\mu$  триода зависят от напряжений на аноде и сетке. Однако при не слишком больших значениях изменения напряжения  $\Delta U_1$  на сетке можно так выбрать сеточное смещение  $U_{c0}$  и э. д. с.  $\mathcal{E}_2$  анодной батареи, чтобы в пределах изменения  $U_c$  от  $U_{c0} - \Delta U_1$  до  $U_{c0} + \Delta U_1$  характеристики триода были близки к прямым линиям, а  $R_i$  и  $\mu$  — приблизительно постоянны.

7. Из сказанного выше следует, что в усилительных схемах целесообразно применять лампы с возможным большим значением статического коэффициента усиления  $\mu$ . Если в триоде анод удалить от катода, т. е. уменьшать их взаимную емкость  $C_{a,k}$ , называемую **выходной емкостью лампы**, то электрическое поле, обусловленное одним и тем же анодным напряжением  $U_a$ , будет

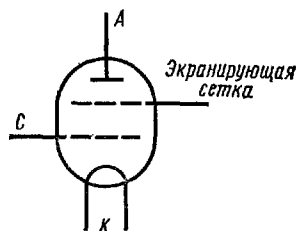


Рис. 22.27



ослабляться, а статический коэффициент усиления  $\mu$  возрастет. Более радикальным способом уменьшения выходной емкости  $C_{a,н}$  является установка между анодом и управляющей сеткой лампы четвертого электрода — **экранирующей сетки**. Такая четырех-электродная лампа называется **тетродом**. Схематическое изображение тетрода прямого накала представлено на рис. 22.27. Потенциал экранирующей сетки поддерживается постоянным и более низким,

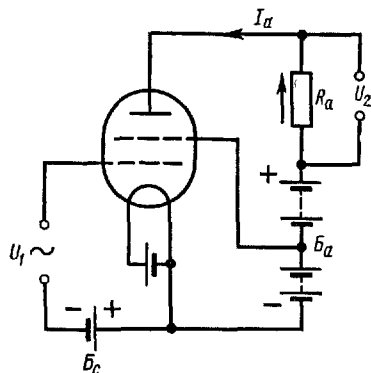


Рис. 22.28

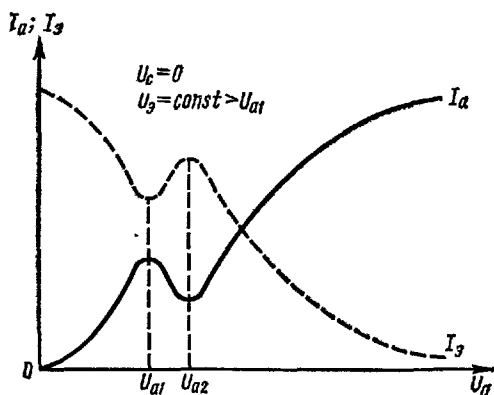


Рис. 22.29

чем потенциал анода. Благодаря этому экранирующая сетка ослабляет электрическое поле анода вблизи управляющей сетки и катода, увеличивая тем самым статический коэффициент усиления лампы. Схема простейшего усилителя напряжения, в котором используется четырех-электродная лампа, изображена на рис. 22.28.

Большим недостатком тетродов является немонотонный характер зависимости анодного тока от анодного напряжения при постоянных напряжениях на управляющей ( $U_c$ ) и экранирующей ( $U_g$ ) сетках (рис. 22.29). При малых анодных напряжениях анодный ток в тетроде, так же как и в триоде, возрастает с увеличением  $U_a$ . Однако начиная с некоторого значения  $U_a = U_{a1}$  дальнейшее повышение анодного напряжения вызывает резкое ослабление анодного тока и лишь при  $U_a > U_{a2}$  анодный ток вновь начинает увеличиваться. Это своеобразие анодной характеристики тетрода объясняется влиянием вторичной электронной эмиссии (см. § 10.4) из анода, называемой **динатронным эффектом**. При  $U_a$ , близких к  $U_{a1}$ , потенциал анода ниже потенциала экранирующей сетки. Поэтому вторичные электроны, выбиваемые из анода, устремляются к экранирующей сетке. В результате этого явления анодный ток уменьшается, а ток  $I_g$  в цепи экранирующей сетки увеличивается. Зависимость сеточного тока  $I_g$  от  $U_a$  показана на рис. 22.29 пунктиром. При малых значениях  $U_a$  влияние вторичной электронной эмиссии ничтожно мало, так как средняя энергия электронов, попадающих на анод, недостаточна для выбивания вторичных электронов. Возрастание  $U_a$  вызывает перераспределение первичных элект-

ронов, испускаемых катодом, между экранирующей сеткой и анодом. Поэтому возрастание анодного тока сопровождается соответствующим уменьшением сеточного тока  $I_s$ . При больших анодных напряжениях потенциал анода выше потенциала экранирующей сетки и вторичные электроны притягиваются к аноду.

Провал в анодной характеристике тетрода, используемого в схеме усилителя, ограничивает допустимое значение амплитуды анодного

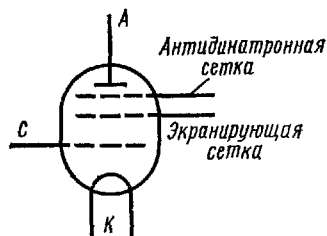


Рис. 22.30

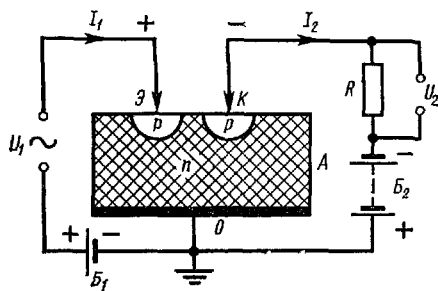


Рис. 22.31

напряжения. Во избежание искажения усиливаемых сигналов тетрод не должен работать в области анодных напряжений от  $U_{a1}$  до  $U_{a2}$ .

Одним из способов устранения вредного влияния динаatronного эффекта является создание в лампе еще одной (третьей) сетки, называемой антидинаatronной. Она помещается между анодом и экранирующей сеткой. Такая трехсеточная пятиэлектродная лампа называется пентодом. Ее условное изображение показано на рис. 22.30. Обычно антидинаatronная сетка пентода соединяется с катодом. Между ней и анодом всегда существует электрическое поле, отталкивающее вторичные электроны обратно к аноду. Поэтому анодный ток в пентоде в отличие от тока в тетроде м о н о т о н н о возрастает с увеличением анодного напряжения. Для уменьшения влияния антидинаatronной сетки на движение электронов, испускаемых катодом, ее делают достаточно редкой.

8. В заключение этого параграфа остановимся на принципе действия полупроводниковых триодов (транзисторов). Транзисторы впервые были созданы в 1948 г. Благодаря ряду преимуществ перед электронными лампами (малые габариты и вес, продолжительный срок службы, отсутствие цепей накала) транзисторы нашли широкое и все возрастающее применение в различных радиотехнических устройствах.

Полупроводниковые триоды в отличие от рассмотренных выше диодов содержат два электронно-дырочных перехода. Для изготовления полупроводниковых триодов применяются германий и кремний, так как подвижность носителей заряда в германии и кремнии больше, чем в других полупроводниках. Кроме того, они обладают большой механической прочностью и химической устойчивостью. Наконец, что очень важно для нормальной работы транзисторов, рекомбинация электронов и дырок в этих полупроводниках происходит сравнительно медленно, так что разноименно заряженные носители проходят сквозь

тонкие слои германия или кремния, практически не рекомбинируя друг с другом.

Простейший точечный германиевый триод (рис. 22.31) представляет собой небольшой кристалл *A* германия, обладающий электронной проводимостью (*n*-типа). Снизу кристалл припаян к плоскому металлическому электроду *O* — основанию. Сверху он контактирует с двумя близко расположенными друг от друга точечными электродами: эмиттером *Э* и коллектором *К*, изготовленными из весьма тонкой металлической проволоки. Вблизи эмиттера и коллектора в кристалле германия имеются небольшие области дырочной проводимости (*p*-типа). Схема включения германиевого триода в электрическую цепь усилителя показана на рис. 22.31. Основание триода заземляется, на эмиттер подается усиливаемое переменное напряжение  $U_1$ , в цепь коллектора включены аккумуляторная батарея  $B_2$  и нагрузочное сопротивление  $R$ , с которого снимается усиленное напряжение  $U_2$ . Э. д. с.  $\mathcal{E}_1$  батареи  $B_1$  выбирается таким образом, чтобы при любых значениях  $U_1$  напряжение  $U_{эо}$  между эмиттером и основанием было положительным. Поэтому ток  $I_1$  в цепи эмиттер — основание всегда идет через кристалл германия от *Э* к *O*, т. е. в пропускном направлении *p-n*-перехода вблизи эмиттера. Иначе обстоит дело в цепи коллектора. Батарея  $B_2$  включена таким образом, что напряжение между коллектором и основанием отрицательно. Следовательно, ток в цепи коллектор — основание должен идти через кристалл германия только от *O* к *К*, т. е. в направлении, я р о т и в о п о л о ж н о м п р о п у с к н о м у для *p-n*-перехода вблизи коллектора. Этот *p-n*-переход играет роль запирающего слоя с очень большим сопротивлением. Напомним, что, как показано в § 13.7, запирающее действие *p-n*-перехода (или, точнее, его малая проводимость) обусловлено обеднением контактного слоя подвижными носителями заряда (электронами и дырками) и связанным с этим ростом его толщины.

Если напряжение между эмиттером и основанием  $U_{эо} > 0$ , то под действием электрического поля дырки свободно переходят из области *p*-германия около эмиттера в основную часть кристалла (*n*-типа). Соответственно электроны проводимости свободно переходят из кристалла *n*-типа в область *p*-типа у эмиттера. При этом в цепи эмиттера идет ток силой  $I_э$ . При изготовлении транзисторов рассматриваемого типа примеси обычно вводят таким образом, чтобы концентрация  $n_p^d$  дырок в *p*-германии была во много раз больше концентрации  $n_n^e$  электронов проводимости в *n*-германии. Поэтому можно считать, что

$$I_э = en_1,$$

где  $e$  — элементарный заряд,  $n_1$  — число дырок, переходящих за единицу времени из *p*- в *n*-германий вблизи эмиттера.

Таким образом, прилегающая к эмиттеру область *p*-германия играет роль, подобную роли катода электронной лампы: является источником возникновения подвижных носителей заряда. Потенциал коллектора значительно ниже потенциалов основания и эмиттера. Следовательно, дырки, инжектированные в *n*-германий, перемещаются в нем

по направлению к коллектору. Контакт  $p$ - и  $n$ -германия вблизи коллектора обладает малым сопротивлением для этих дырок, свободно переходящих из  $n$ - в  $p$ -область, образуя ток в цепи коллектора силой  $I_k$ . Если  $n_2$  — число дырок, проходящих за единицу времени через  $p$ - $n$ -переход вблизи коллектора, то

$$I_k = en_2.$$

Очевидно, что

$$n_2 = n_1 - \Delta n,$$

где  $\Delta n$  — «потери дырок» из-за их рекомбинации с электронами проводимости в  $n$ -германии на пути от эмиттера к коллектору. Коэффициент усиления транзистора по току

$$\alpha = \frac{I_k}{I_0} = 1 - \frac{\Delta n}{n_1} \quad (22.42)$$

не может быть больше единицы и тем ближе к ней, чем меньше величина  $\Delta n$ . Вероятность рекомбинации дырок с электронами, а следовательно, и  $\Delta n$  возрастают при увеличении пути, проходимого дырками в  $n$ -германии. Поэтому эмиттер и коллектор желательно располагать возможно ближе друг к другу. Обычно расстояние между ними не превышает 0,1 мм.

Коэффициент усиления транзистора по напряжению

$$K = \frac{U_2}{U_1},$$

где  $U_2$  — напряжение на нагрузке  $R$  в цепи коллектора. Коэффициент  $K$  зависит не только от собственных свойств транзистора, но и от соотношения сопротивлений нагрузки в цепях коллектора и эмиттера:

$$K = \frac{I_k R}{I_0 R_0} = \alpha \frac{R}{R_0}. \quad (22.42')$$

Поскольку  $R$  может во много раз превосходить  $R_0$ , коэффициент усиления транзистора по напряжению может достигать значительной величины.

Серьезным недостатком полупроводниковых триодов является то, что их нормальная работа возможна в сравнительно малом интервале температур. Для германия температура перехода к области собственной проводимости составляет около 100 °С. Вблизи этой температуры резко возрастает концентрация свободных носителей заряда в полупроводнике и управление их числом, совершенно необходимое для работы усилителя, становится затруднительным. Поэтому верхний предел рабочей температуры германиевых триодов не превышает 55—75 °С. При низкой температуре энергия теплового движения оказывается недостаточной для освобождения в объеме полупроводника необходимого числа носителей заряда. Это приводит к сильному увеличению сопротивления прибора и нарушению режима его работы. Для обычных полупроводниковых триодов нижний предел рабочей температуры лежит около —55 °С.

Полупроводниковые триоды с точечными контактами значительно усиливают напряжение, но их выходные мощности малы из-за опасности перегрева. Более мощными являются **плоскостные полупроводниковые триоды**. Для их изготовления применяют монокристаллы германия, в которых введением соответствующих примесей (трехвалентного индия и пятивалентных сурьмы или мышьяка) создают либо прослойку *n*-германия между двумя частями *p*-германия, либо, наоборот, слой *p*-германия между двумя частями *n*-германия. В зависимости от этого различают триоды на основе *n*-полупроводника (типа *p-n-p*) и триоды на основе *p*-полупроводника (типа *n-p-n*).

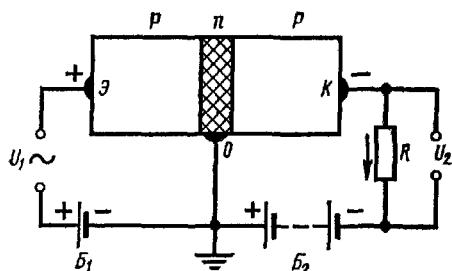


Рис. 22.32

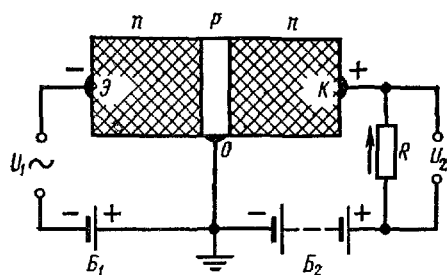


Рис. 22.33

Принцип действия плоскостного триода типа *p-n-p* (рис. 22.32) аналогичен принципу действия точечного германиевого триода. Эмиттером является левая часть кристалла (*p*-германий), коллектором — его правая часть, а прослойка из *n*-германия заземлена через основной электрод. Толщина слоя *n*-германия обычно не превышает 0,025 мм, так как ее увеличение приводит к возрастанию «потерь дырок» вследствие рекомбинации с электронами.

Схема включения плоскостного триода типа *n-p-n* показана на рис. 22.33. По сравнению с триодом типа *p-n-p* полярности эмиттера и коллектора изменены на противоположные. Это сделано потому, что в рассматриваемом случае подвижные носители заряда, инжектируемые в разделительный слой *p*-германия, представляют собой отрицательно заряженные электроны, а не положительно заряженные дырки. В остальном принципы действия плоскостных триодов обоих типов совпадают.

## § 22.4. Автоколебания

1. В § 22.2 мы рассмотрели вынужденные незатухающие электромагнитные колебания, происходящие под действием синусоидальной э. д. с. При этом потери энергии в колебательном контуре на лев-джоулево тепло компенсировались путем подвода энергии от внешнего источника. Мы показали, что частота, амплитуда и начальная фаза таких колебаний зависят от частоты, амплитуды и начальной фазы вынуждающей э. д. с.