

внутренний цилиндр. Ленгмюр рассмотрел также случай сферических электродов. Во всех случаях, как и следовало ожидать, получился закон трех вторых.

При малых напряжениях закон трех вторых дает заниженные значения для термоэлектронного тока, так как этот закон не учитывает теплового разброса скоростей электронов. При больших напряжениях закон был бы точным, если бы эмиссионная способность катода была бесконечно велика. Поскольку это не так, наблюдаются отступления от закона трех вторых и при больших напряжениях. При увеличении напряжения в конце концов наступает насыщение, и закон трех вторых утрачивает силу.

## § 102. Электронные лампы и их применения

1. Электроны в вакуумном диоде, испускаемые катодом, двигаются к аноду. Если на анод подать положительный потенциал, то ток через диод пойдет. Если же подать отрицательный потенциал, то

тока не будет. На этом основано применение вакуумных диодов для выпрямления переменных токов. Схема «однополупериодного»

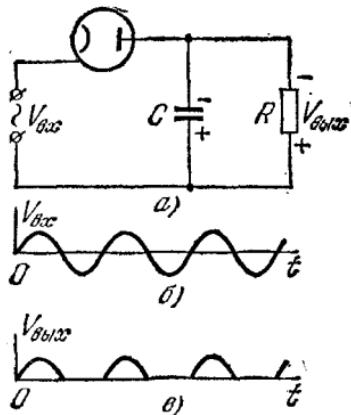


Рис. 245.

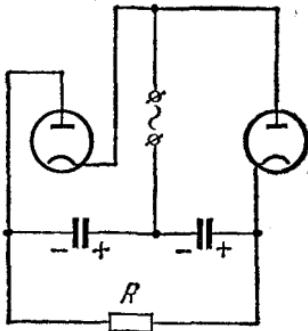


Рис. 246.

лампового выпрямителя представлена на рис. 245, а. Если входное напряжение представляется кривой рис. 245, б, то при отсутствии конденсатора  $C$  выходное напряжение изобразилось бы кривой рис. 245, в. Оно состояло бы из импульсов напряжения, следующих друг за другом через половину периода  $T/2$ . Такую же форму имела бы и кривая тока  $I$ , текущего через *нагрузочное сопротивление*  $R$ . Для того чтобы получить непрерывное течение тока  $I$  и сгладить его пульсации, вводится конденсатор  $C$ . Тогда за каждую половину периода, когда через лампу течет ток, последний не только поступает в сопротивление  $R$ , но и заряжает конденсатор  $C$ . В течение других полупериодов, когда лампа тока не пропускает, конденсатор разряжается через сопротивление  $R$ . Пульсации тока будут тем меньше,

чем больше время  $\tau = RC$ , характеризующее быстроту разрядки конденсатора (см. § 48). Недостаток описанного выпрямителя состоит в том, что он пропускает ток только в течение одной половины периода  $T$ , а в течение другой половины — не пропускает. На рис. 246 приведена схема «двухполупериодного» выпрямителя, в котором этот недостаток устранен.

2. Введением внутрь электронной лампы дополнительных электродов можно легко управлять электронным током. Эти дополнительные электроды называются *сетками*, так как им обычно придают форму металлических сеток или спиралей, окружающих катод. Простейшей является *трехэлектродная лампа*, или *триод*, имеющая всего одну сетку, называемую *управляющей сеткой*. Управляющая сетка располагается значительно ближе к катоду, чем анод. Поэтому изменение сеточного напряжения (т. е. разности потенциалов между сеткой и катодом) значительно сильнее влияет на напряженность электрического поля вблизи катода, а следовательно, и на электронный ток в лампе, чем равное по величине изменение анодного напряжения (т. е. разности потенциалов между анодом и катодом). Когда сеточное напряжение равно нулю, сетка практически не влияет на силу электронного тока в лампе. Если сетку зарядить положительно, то электронный ток увеличится. Если же ее зарядить отрицательно, то ток через лампу уменьшится и даже может совсем прекратиться. Изменениями потенциала сетки можно, следовательно, управлять силой электронного тока. Благодаря малости массы электрона инерционность триода также очень мала, и его управляющее действие сохраняется даже при очень быстрых изменениях сеточного напряжения.

Часть электронов, исходящих из катода, попадает на сетку, и в цепи последней возникает ток  $I_c$ , называемый *сеточным током*. Полный ток в лампе  $I$  слагается из анодного тока  $I_a$  и тока на сетку  $I_c$ :  $I = I_a + I_c$ . Появление заметного сеточного тока нежелательно, так как оно приводит к бесполезному расходованию электрической энергии в цепи сетки. Однако в большинстве случаев основной поток электронов проходит сквозь редкую сетку, так что сеточный ток мал по сравнению с анодным током. Поэтому величиной  $I_c$  мы, как правило, будем пренебрегать и считать, что  $I = I_a$ .

Анодный ток  $I_a$  является функцией сеточного  $V_c$  и анодного  $V_a$  напряжений:  $I_a = I_a(V_c, V_a)$ . На практике эту функцию принято характеризовать двумя семействами кривых, называемых *сеточными* и *анодными характеристиками*. Сеточная характеристика есть кривая  $I_a = I_a(V_c)$ , изображающая зависимость анодного тока  $I_a$  от сеточного напряжения  $V_c$  при условии, что анодное напряжение и накал катода поддерживаются постоянными. Аналогично, анодная характеристика есть кривая, представляющая зависимость того же тока от анодного напряжения, если остаются постоянными сеточное напряжение и накал катода. Схематически сеточные

и анодные характеристики представлены на рис. 247 и 248. Сеточные характеристики поднимаются более круто, чем анодные. При увеличении параметра  $V_a$  сеточные характеристики смещаются влево. То же происходит с анодными характеристиками при увеличении параметра  $V_c$ . При повышении температуры накала катода возрастает ток насыщения и оба семейства характеристик вытягиваются вверх.

Анодный ток  $\mathcal{I}_a$  меняется нелинейно как с изменением  $V_c$ , так и с изменением  $V_a$ . Только на средних участках характеристики

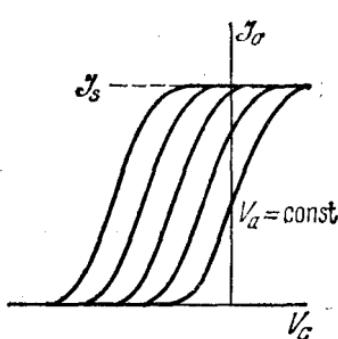


Рис. 247.

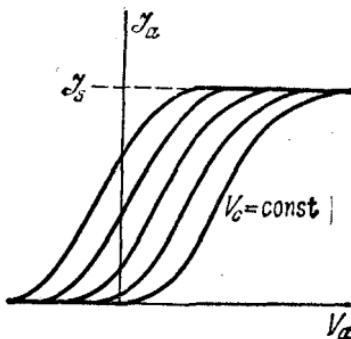


Рис. 248.

почти прямолинейны, так что здесь приближенно соблюдается закон Ома. На этих участках производные

$$S = \left( \frac{\partial \mathcal{I}_a}{\partial V_c} \right)_{V_a} \quad \text{и} \quad R_i = \left( \frac{\partial V_a}{\partial \mathcal{I}_a} \right)_{V_c} \quad (102.1)$$

практически постоянны. Производная  $S$  называется *крутизной (сеточной) характеристики*, а производная  $R_i$  — *дифференциальным или внутренним сопротивлением лампы*.

Как видно из рис. 247, при изменении параметра  $V_a$  форма сеточной характеристики практически остается неизменной, но вся характеристика смещается влево (при увеличении  $V_a$ ) или вправо (при уменьшении  $V_a$ ). При этом равным приращениям параметра  $V_a$  соответствуют равные смещения характеристики. Отсюда следует, что анодный ток  $\mathcal{I}_a$  зависит не от напряжений  $V_c$  и  $V_a$  в отдельности, а только от их комбинации  $V_y = V_c + DV_a$ , где  $D$  — положительная постоянная, называемая *проницаемостью сетки*. Она меньше единицы, так как изменения сеточного напряжения значительно сильнее влияют на величину анодного тока, чем такие же изменения анодного напряжения. Таким образом, функция двух переменных  $\mathcal{I}_a = \mathcal{I}_a(V_c, V_a)$  фактически переходит в функцию одной переменной  $V_y = V_c + DV_a$ . По этой причине величина  $V_y$  называется

управляющим напряжением. Дифференцируя формулу  $\mathcal{I}_a = \mathcal{I}_a(V_y) = \mathcal{I}_a(V_c + DV_a)$ , получаем

$$S = \left( \frac{\partial \mathcal{I}_a}{\partial V_c} \right)_{V_a} = \frac{d \mathcal{I}_a}{d V_y},$$

$$\frac{1}{R_i} = \left( \frac{\partial \mathcal{I}_a}{\partial V_a} \right)_{V_c} = \frac{d \mathcal{I}_a}{d V_y} \left( \frac{\partial V_y}{\partial V_a} \right)_{V_c} = SD.$$

Отсюда следует, что параметры лампы  $S$ ,  $D$ ,  $R_i$  связаны соотношением

$$SDR_i = 1. \quad (102.2)$$

**3.** Трехэлектродная лампа может служить для усиления электрических сигналов и переменных токов. Принципиальная схема усилителя на триоде приведена на рис. 249.

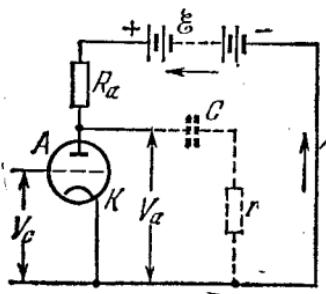


Рис. 249.

В анодную цепь лампы введена батарея с электродвижущей силой  $\mathcal{E}$  и нагрузочное сопротивление  $R_a$ . Усиливаемое напряжение прикладывается между сеткой и катодом. Рассматривая анодный ток как функцию управляющего напряжения  $V_y$ , напишем

$$\Delta \mathcal{I}_a = S \Delta V_y = S (\Delta V_c + D \Delta V_a).$$

Применяя же закон Ома к внешнему участку цепи  $K\mathcal{E}A$  и пренебрегая при этом внутренним сопротивлением батареи и подводящих проводов, получим

$$V_a = \mathcal{E} - R_a \mathcal{I}_a.$$

Так как величина  $\mathcal{E}$  постоянна, то

$$\Delta V_a = -R_a \Delta \mathcal{I}_a = -R_a S (\Delta V_c + D \Delta V_a),$$

и, следовательно,

$$\frac{\Delta V_a}{\Delta V_c} = - \frac{R_a S}{1 + SDR_a}.$$

Используя соотношение (102.2), приведем эту формулу к виду

$$\frac{\Delta V_a}{\Delta V_c} = - \frac{R_a}{R_a + R_i D} \frac{1}{D}. \quad (102.3)$$

Полученная формула показывает, как связаны между собой амплитуды колебаний анодного и сеточного напряжений. В частном случае, когда  $R_i \ll R_a$ , она переходит в

$$\frac{\Delta V_a}{\Delta V_c} = - \frac{1}{D}. \quad (102.4)$$

Поэтому величина  $K = 1/D$  называется коэффициентом усиления лампы. В другом предельном случае, когда  $R_i \gg R_a$ ,

$$\frac{\Delta V_a}{\Delta V_c} = -\frac{R_a}{R_i D} = -SR_a, \quad (102.5)$$

и усиление тем больше, чем больше крутизна характеристики  $S$ . Знак минус в формулах (102.3) — (102.5) означает, что фазы колебаний сеточного и анодного напряжений противоположны.

Усиление электрического сигнала можно повторять многократно. Для этого напряжение, усиленное первой лампой, подается на сетку второй; напряжение, усиленное второй лампой, — на сетку третьей и т. д. Одна из схем такого каскадного усилителя представлена на рис. 250. Напряжение на сетку каждой лампы подается не непосредственно, а через *разделительный конденсатор*  $C$ . Последний, не препятствуя прохождению переменного усиливающего сигнала, не допускает на сетку высокое постоянное напряжение анодной батареи. Между сеткой и катодом каждой лампы включено сопротивление  $r$  (утечка сетки). Делается это с целью предотвращения «запирания» лампы. Дело в том, что в те периоды времени, когда потенциал сетки положителен, на нее попадают электроны. В отсутствие утечки на сетке накопились бы отрицательные заряды такой величины, что ток через лампу прекратился бы. Надлежащим подбором емкости  $C$  и сопротивления  $r$  можно добиться, чтобы колебания напряжения на сетке происходили около небольшого определенного значения, при котором еще сохраняется управляющее действие сетки, а сеточный ток пренебрежимо мал.

4. Для многих целей требуется, чтобы анодный ток зависел от *сеточного* и практически не зависел от анодного напряжения. Это достигается введением между управляющей сеткой и анодом *дополнительной сетки*, на которую подается положительный относительно катода потенциал, несколько меньший потенциала анода. Такая дополнительная сетка называется *экранной*, а *четырехэлектродная лампа*, в которую она входит, — *тетродом*. Введение экранной сетки ослабляет электрическое поле в окрестности анода, уменьшая тем самым влияние потенциала анода на анодный ток. В этом отношении экранная сетка действует так же, как уменьшение проницаемости  $D$  управляющей сетки. Поэтому коэффициент усиления у тетрода при прочих равных условиях гораздо больше, чем у триода. Однако введение экранной сетки легко может привести

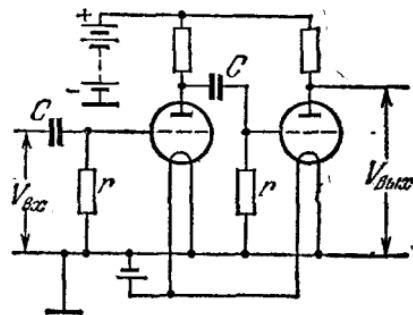


Рис. 250.

к нежелательным явлениям. Электроны, прошедшие через экранную сетку, попадают на анод и выбиваются из него вторичные электроны. Это явление называется *динатронным эффектом*. Такое явление возникает и в триоде. Но в триоде при нормальной работе выбитые электроны обратно возвращаются к аноду под действием электрического поля последнего. В тетроде же экранная сетка всегда заряжена положительно, и в случае сильных колебаний анодного напряжения потенциал анода в отдельные периоды может стать ниже потенциала экранной сетки. Тогда выбитые электроны начнут попадать на экранную сетку и проходить через нее. Это ведет к уменьшению анодного тока, появлению провалов на характеристиках и ухудшению свойств тетрода. Нежелательные явления, вызванные динатронным эффектом, могут быть устранены введением третьей, так называемой *защитной* или *противодинатронной* сетки. Эта сетка помещается между экранной сеткой и анодом (рис. 251). Она соединяется с катодом (часто внутри лампы). Находясь под потенциалом

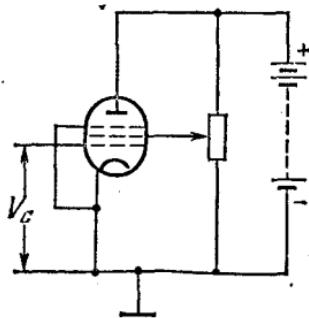


Рис. 251.

катода, она тормозит вторичные электроны, препятствуя попаданию их на экранную сетку. В то же время она не оказывает существенного влияния на движение основного электронного потока. Лампы с пятью электродами, или *пентоды*, имеют высокий коэффициент усиления. Их характеристики гладкие, без провалов. Поэтому они получили более широкое распространение, чем тетроды.

Применение электронных ламп для генерации электрических колебаний будет рассмотрено в § 133.

### § 103. Вторичная и автоэлектронная эмиссия

1. При бомбардировке поверхностей металлов, полупроводников или диэлектриков пучком электронов наблюдается испускание *вторичных электронов*. Это явление называется *вторичной электронной эмиссией* (в электронных лампах его чаще называют *динатронным эффектом*, см. предыдущий параграф). В пучке эмиттируемых электронов наблюдаются три группы электронов; 1) электроны, упруго отраженные поверхностью эмиттера, 2) неупруго отраженные электроны, 3) вторичные электроны, т. е. такие электроны, которые выбиваются из эмиттера первичными электронами. Для количественного описания явления принято вводить *коэффициент вторичной эмиссии*  $\sigma$ . Так называют отношение  $\sigma$  полного количества электронов  $N$ , испущенных эмиттирующей поверхностью, к числу первичных электронов  $N_0$ :

$$\sigma = N/N_0.$$