

$I_c = 0$. Но даже в таком случае реальные характеристики триода отличаются от идеальных, построенных на основании этой формулы в силу сложности явлений, происходящих в триоде и не учтенных при выводе данной формулы.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИОДА

Итак, анодный ток триода является функцией двух переменных величин — анодного напряжения U_a и сеточного напряжения U_c . Зависимости анодного тока I_a от одного из этих напряжений при постоянном другом напряжении и представляют собой семейства статических характеристик триода. Схема для снятия этих характеристик показана на рис. 6.6.

Анодные характеристики $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$ (рис. 6.7) являются выходными характеристиками триода. Для снятия анодных характеристик постоянное напряжение устанавливают с помощью потенциометра $R1$ в цепи питания триода, а затем потенциометром $R2$ в цепи питания анода плавно меняют напряжение U_a , фиксируя миллиамперметром «мА» значение тока I_a . Анодная характеристика, снятая при $U_c = 0$, проходит через начало координат, а снятые при $U_c \neq 0$ свинуты вправо от нулевой характеристики, так как при отрицательном потенциале на сетке анодный ток уменьшается. Для компенсации тормозящего электрического поля, созданного напряжением $-U_c$, требуется подать определенное напряжение $+U_a$, и только тогда появится ток I_a . При том же значении напряжения $-U_c$ для появления тока I_a требуется тем большее напряжение $+U_a$, чем меньше проницаемость D , так как значение напряжения $-U_c$ для компенсации тока I_a требуетася тем большее напряжение $+U_a$, чем меньше проницаемость D , так как экранирующее действие управляющей сетки становится сильнее и влияние поля анода на ток I_a уменьшается.

Анодные характеристики, снятые при $U_c > 0$, располагаются левее характеристики при $U_c = 0$. При этом наблюдается ток I_a даже при $U_a = 0$, что объясняется созданием ускоряющего поля для электронов положительным напряжением на сетке, которое увеличивает энергию электронов, позволяя некоторым из них пролететь

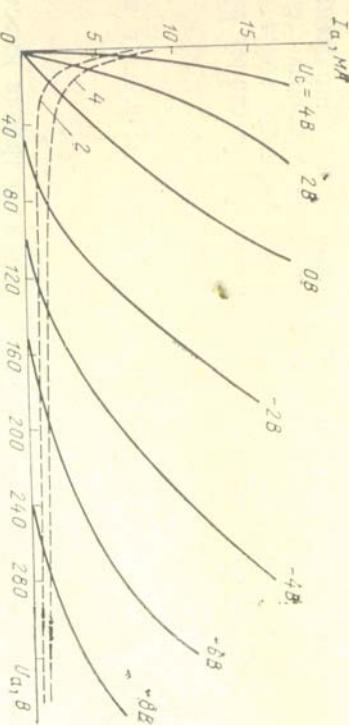


Рис. 6.7. Анодные характеристики триода

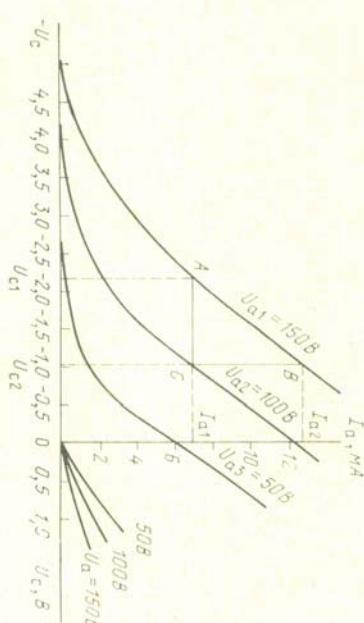


Рис. 6.8. Анодно-сеточные характеристики триода

между витками сетки и долететь до анода. При небольших напряжениях U_a наблюдается вначале резкое увеличение тока I_a , затем характеристика становится более пологой. Это объясняется тем, что при $U_a = 0$ в пространстве между сеткой и анодом образовался еще один пространственный заряд электронов, который расположжен между катодом и сеткой. При подаче даже небольших напряжений U_a этот пространственный заряд рассеивается полем анода, а электроны его притягиваются к аноду, увеличивая ток I_a . При дальнейшем увеличении напряжения U_a ток I_a растет медленнее, так как его увеличение идет только за счет околосеточного пространственного заряда.

Анодно-сеточные характеристики триода $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ приведены на рис. 6.8. Для снятия этих характеристик с помощью потенциометра $R2$ в цепи питания анода устанавливают постоянное напряжение U_a , отмечаемое по вольтметру U_2 , а по потенциометру $R1$ в цепи сетки плавно меняют напряжение на сетке U_c , фиксируя значение тока I_a . Чем больше напряжение U_a , тем левее расположены характеристики. Это следует из уравнения действующего напряжения (6.4), так как при большем U_a увеличивается по абсолютной величине и напряжение $-U_c$, при котором триод запирается. При том же значении $-U_c$ ток I_a будет тем больше, чем больше $+U_a$. Расположение анодно-сеточных характеристик, как и анодных, сильно зависит от проницаемости триода D . Чем больше проницаемость D , тем левее расположены характеристики, так как требуется большее отрицательное напряжение на сетке для компенсации поля анода и запирания лампы. Триоды с малой проницаемостью D , у которых лампа запирается при сравнительно небольших отрицательных напряжениях на управляемой сетке, получили название *противод*, в отличие от левых ламп с редкой намоткой сетки, т. е. большой проницаемостью D , которые запираются при сравнительно больших отрицательных напряжениях на сетке.

Характеристики сеточного тока. Как уже отмечалось, при положительном напряжении на сетке появляется сеточный ток I_{c1} .

Учитывая, что мощные триоды работают при положительных напряжениях на сетке, большой интерес представляют характеристики зависимостей сеточных токов от сеточных и анодных напряжений.

Для анализа работы триода при положительных напряжениях на сетке вводятся понятия о двух режимах работы триода: *режиме возврата* и *режиме перехвата* электронов.

Электроны, пролетающие через сетку к аноду, создают в промежутке сетка—анод пространственный заряд. В режиме возврата электронов к сетке ($U_c \geq U_a$) значительная часть электронов пространственного заряда возвращается обратно к сетке под действием сильного электрического поля сетки. При анодном напряжении $U_a = 0$ сеточный ток I_a достигает максимального значения. С ростом анодного напряжения U_a происходит резкое возрастание анодного тока I_a , а сеточный уменьшается, что объясняется возрастанием влиянием электрического поля сетки на электроны пространственного заряда в промежутке сетка—анод.

В режиме перехвата $U_c < U_a$ пространственный заряд рассеивается и сеточный ток образуется только за счет электронов, непосредственно перехваченных сеткой, благодаря положительному напряжению между сеткой и катодом.

Характеристики сеточного тока $I_c = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$ даны на рис. 6.7 штриховыми линиями.

При небольших анодных напряжениях наблюдается режим перехвата, сеточный ток резко уменьшается при возрастании анодного напряжения U_a . В режиме перехвата сеточный ток мало меняется при изменении анодного напряжения. Чем больше напряжение на сетке, тем выше расположены характеристики сеточного тока, так как большое количество электронов перехватывается сеткой. Характеристика сеточного тока $I_c = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$, которую по аналогии с биполярными транзисторами можно назвать входной характеристикой триода, показана на рис. 6.8. Эти характеристики представляют собой ряд веерообразно расположенных кривых. Чем меньше анодное напряжение при том же напряжении на сетке, тем сеточный ток больше.

СТАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРИОДА

На основе анализа статических характеристик, которые отражают основные зависимости между токами и напряжениями в триоде, можно определить его параметры. Дифференциальные параметры триода те же, что и у полевых транзисторов.

Кругизна характеристики S. При $U_a = \text{const}$ $S = \Delta I_a / \Delta U_c$. Кругизна показывает, на сколько миллиампер изменится анодный ток при изменении напряжения на сетке на 1 В при неизменном U_a . Кругизна — дифференциальный параметр и в разных точках характеристики имеет различные значения. Конструктивно S зависит от расстояния между катодом и управляющей сеткой: чем меньше это расстояние, тем сильнее влияние поля сетки на элек-

тронов пространственного заряда у катода, тем больше S. На величину S оказывает влияние также и площадь катода, так как при большей плошади катода и прочих неизменных условиях анодный ток получит большее приращение ΔI_a при изменении напряжения ΔU_c на 1 В. У мощных триодов значение крутизны S составляет 1...10 мА/В, у мощных 50...60 мА/В.

Внутреннее сопротивление R_i . При $U_c = \text{const}$ $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$. R_i характеризует влияние поля анода на ток I_a . Величина I_a зависит от шага намотки управляющей сетки, т. е. от проницаемости D. Совершенно очевидно, что чем гуще намотана управляющая сетка, тем проницаемость D меньше, тем меньше влияние поля анода на I_a и тем больше R_i . Следовательно, у ламп с правыми характеристиками R_i больше, чем у ламп с левыми характеристиками, так как лампы с левыми характеристиками имеют большую проницаемость за счет редкой намотки управляющей сетки. R_i у триодов составляет единицы и десятки килоом.

Входное сопротивление $R_{\text{вх}}$. При $U_a = \text{const}$ $R_{\text{вх}} = \Delta U_c / \Delta I_c$. Входное сопротивление триода зависит от режима работы: без сеточных токов или с сеточными токами.

При работе без сеточных токов $R_{\text{вх}}$ составляет сотни мегом. Дело в том, что даже при отрицательном сеточном напряжении возможен приход тех электронов на сетку, у которых начальная скорость вылета из катода достаточно велика, чтобы преодолеть тормозящее поле сетки. Таких электронов очень незначительное количество, но если они накапливаются на сетке, ее потенциал становится все более отрицательным и лампа запирается. Поэтому для стекания электронов, попавших на сетку, требуется создать гальваническую цепь между управляющей сеткой и катодом. Этой цели служит сопротивление, включаемое между сеткой и катодом, которое получило название *сопротивления утечки*.

При наличии сеточных токов входное сопротивление уменьшается. В этом случае происходит заметное потребление мощности входной цепью. Таким образом, работа с сеточными токами характеризуется малым $R_{\text{вх}}$ и заметным потреблением мощности входной цепи. Следовательно, если подавать направляющее напряжение U_c такой амплитуды, чтобы триод работал без сеточных токов, то $R_{\text{вх}}$ будет очень велик и управление происходит практически без поглощения мощности в цепи сетки. У триодов с левыми характеристиками большой участок анодно-сеточной характеристики лежит слева от оси I_a , что позволяет подавать большие управляющие напряжения без опасности появления сеточных токов. У правых ламп этот участок небольшой, и при подаче больших управляющих напряжений между сеткой и катодом появляется сеточный ток, а $R_{\text{вх}}$ резко уменьшается, что весьма нежелательно.

Коэффициент усиления μ . При $I_a = \text{const}$ $\mu = -\Delta U_a / \Delta U_c$; и показывает, во сколько раз влияние поля сетки на анодный ток сильнее влияния поля анода. Численно μ равно величине, которая показывает, на сколько надо изменить анодное напряжение при

изменении сеточного напряжения на 1 В, чтобы анодный ток остался неизменным. Знак минус показывает, что для взаимной компенсации влияния на анодный ток ΔU_a и ΔU_c должны иметь различные знаки. При этом знак минус обычно опускается, так как для характеристики усилительных свойств лампы важно знать абсолютное значение μ . Коэффициент усиления μ и проникаемость D связаны соотношением $\mu = 1/D$.

Таким образом, чем гуще намотана сетка и меньше влияние электрического поля анода на пространственный заряд у катода, тем больше μ . Нетрудно определить связь между величиной μ и расположением аподно-сеточных характеристик. Очевидно, что чем меньше μ , тем сильнее влияние поля анода, тем требуется большее отрицательное напряжение, чтобы запереть триод, и аподно-сеточная характеристика располагается левее. Следовательно, лампы с правыми характеристиками имеют большой коэффициент μ . Для ламповых триодов имеет место внутреннее уравнение параметров

$$\mu = R_i S \text{ или } SR_i D = 1.$$

Действительно,

$$\frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \frac{\Delta U_c}{\Delta U_a} = 1.$$

Это позволяет в справочниках помещать только два параметра из четырех.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПО СТАТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТРИОДА

Для определения параметров триода используется метод треугольника, построенного на статических характеристиках. Построим характеристический треугольник ABC на семействе аподно-сеточных характеристик (см. рис. 6.8). Напряжению U_{c1} соответствует ток I_{a1} , напряжению U_{c2} — ток I_{a2} . Находим приращение

$$|\Delta U_a| = |U_{c1}| - |U_{c2}| \text{ и } \Delta I_a = I_{a2} - I_{a1},$$

$$\Delta U_c = |2,25| - |1| = 1,25 \text{ В, } \Delta I_a = 12,8 - 7 = 5,8 \text{ мА}$$

при неизменном напряжении U_a . Определяем крутизну $S = \Delta I_a / \Delta U_c$ при $U_a = \text{const}$. $S = 5,8 / 1,25 = 4,64 \text{ мА/В}$. Из этого же треугольника определим μ . Приращению $|\Delta U_c| = |U_{c2}| - |U_{c1}|$ соответствует приращение $\Delta U_a = U_{a1} - U_{a2}$ при неизменном значении анодного тока I_a

$$\mu = \Delta U_a / \Delta U_c \text{ при } I_a = \text{const},$$

$$\Delta U_a = 150 - 100 = 50 \text{ В } \Delta U_c = 1,25 \text{ В,}$$

$$\mu = 50 / 1,25 = 40.$$

По этим же характеристикам определяем R_i

$$\Delta I_a = I_{a2} - I_{a1}, \Delta U_a = U_{a1} - U_{a2};$$

при этом U_c постоянно и равно U_{c2} . $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$ при $U_c = \text{const}$ $R_i = 50 / 5,8 \cdot 10^{-3} = 8,62 \text{ кОм}$. Для определения параметров триода можно использовать также и анодные характеристики, построив между двумя соседними характеристиками соответствующий трехугольник и определив те же приращения.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРИОДА

К предельным параметрам триода относятся: допустимая мощность, рассеиваемая анодом, допустимое напряжение U_a тока, допустимый анодный ток. Сущность этих предельных параметров та же, что и в ламповом диоде.

На семействе анодных характеристик триода обычно проводится линия предельной мощности, выделяемой на аноде. По этой линии можно определить для каждого значения U_a максимальное значение I_a в точке пересечения с линией предельно допустимой мощности на аноде.

МЕЖЭЛЕКТРОДНЫЕ ЕМКОСТИ ТРИОДА

На работу триода, как и на работу других электронных приборов, большое влияние оказывают межэлектродные емкости. Наличие трех электролдов свидетельствует о наличии трех емкостей: C_{ck} — сетка-катод, C_{ak} — анод-катод, C_{ac} — анод-сетка (рис. 6.9).

Емкость C_{ck} подключается параллельно источнику входного управляющего напряжения. С повышением частоты сопротивление X_c уменьшается. Это ведет к уменьшению общего входного сопротивления, которое шунтирует источник управляющего напряжения, что весьма нежелательно.

Емкость C_{ak} также оказывает заметное влияние на высоких частотах. Уменьшение сопротивления этой емкости с повышением частоты ведет к уменьшению общего выходного сопротивления, а это во многих случаях также нежелательно.

Особенно большое влияние на работу лампы на высоких частотах оказывает емкость C_{ac} — проходная емкость, так как через эту емкость проходит обратный ток из цепи анода в цепь сетки. Чем выше частота управляющего напряжения или больше емкость C_{ac} , тем меньше становится сопротивление этой емкости, и тем большая часть тока I_a с выхода попадает обратно на вход. Этот обратный ток создает на входе дополнительное управляющее напряжение, которое может совпасть по фазе с основным управляющим напряжением и полно-

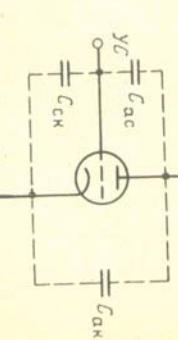


Рис. 6.9. Межэлектродные емкости триода

стью нарушить нормальную работу лампы. Проходная емкость является важнейшим параметром, по которому выбирается лампа для работы на высоких и особенно на сверхвысоких частотах.

Межэлектродные емкости составляют единицы пикофарад у маломощных триодов, а у мощных триодов достигают десятки крупных недостатков триода. Следует иметь в виду, что межэлектродные емкости, приводимые в справочниках, измерены в холодных лампах, при разогреве же происходит изменение расстояний между электродами, что влияет на величину этих емкостей. Кроме того, при появлении электронов в пространстве между электродами емкости между ними увеличиваются.

Основные недостатки триодов: 1. Большая проходная емкость. Наличие этой емкости создает большие трудности при работе триода на высоких частотах. Желательно иметь электронную лампу с малой проходной емкостью. 2. Триоды с большим коэффициентом усиления μ имеют правые характеристики, что связано с появлением сеточных токов даже при небольших амплитудах управляющего напряжения.

Выводы. 1. Наличие управляющей сетки в триоде позволяет более эффективно управлять анодным током, чем в диоде. 2. Эффективность управляющего действия сетки будет тем больше, чем ближе она расположена к катоду. 3. Чем гуще намотана сетка, т. е. меньше ее проницаемость, тем больше внутреннее сопротивление R_s и коэффициент усиления μ триода. 4. При появлении сеточных токов в триоде его входное сопротивление резко уменьшается. 5. Основным недостатком триода является большая величина проходной емкости C_{ac} .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем объяснить, что управляющее действие поля сетки на анодный ток I_a выше, чем поля анода?
2. Поясните аномальные характеристики, снятые при отрицательных напряжениях на сетке, не начинающиеся при $U_a = 0$?

3. Какие факторы влияют на величину крутизны характеристики S_v триода?
4. Как и почему изменится сеточный ток при постоянном напряжении на сетке $+U_c$ и уменьшении анодного напряжения U_a ?
5. Чему равно внутреннее сопротивление триода R_s , если $\mu = 80$, в $S = 2 \text{ МА/В}^2$?
6. Дайте сравнительную оценку основных свойств левых и правых триодов.

6.4. МНОГОСЕТОЧНЫЕ ЛАМПЫ

ТЕТРОДЫ

Устройство и принцип действия. На примере создания тетрода интересно проследить пути устранения недостатков триода: уменьшение проходной емкости C_{ac} и получение электронной лампы с большим μ и левой характеристикой.

Для уменьшения проходной емкости между анодом и управляющей сеткой помещается еще одна сетка. Дополнительная сетка, благодаря своей роли, получила название *экранирующей*. Наличие этой сетки затрудняет взаимодействие между зарядами на аноде и управляющей сетке, и емкость C_{ac} становится меньше. Благодаря экранирующей сетке, проходная емкость между анодом и управляющей сеткой резко уменьшается по сравнению с триодом. У триода $C_{ac} = (1..15) \text{ пФ}$, у тетрода $— (0,01..0,07) \text{ пФ}$. Вторая задача — получение левой характеристики и большого коэффициента усиления μ — решается следующим образом: управляемая сетка в тетроде редкая, а на экранирующую сетку подается положительное напряжение $+U_{c2}$. Таким образом, внутренняя роль анода выполняется триод с левыми характеристиками, у которого роль анода выполняется управляемой сетки и значительном напряжении U_{c2} этот триод запирается при сравнительно большом отрицательном напряжении на управляющей сетке. В отличие от триода анод в тетроде закрыт от пространственного заряда двумя сетками, поэтому влияние поля анода на электроны пространственного заряда гораздо меньше, чем поля управляющей сетки, и поэтому коэффициент усиления резко возрастает по сравнению с триодом. Уравнение действия управляющего напряжения у тетрода можно записать

$$U_\pi = U_{c1} + D_{c1} U_{c2} + D_{c1} D_{c2} U_a \approx U_{c1} + D_{c1} U_{c2};$$

так как $D_{c1} D_{c2} \ll D_{c1}$. Из этой формулы следует, что действие поля анода на пространственный заряд у катода ослаблено двумя сетками — экранирующей и управляющей, а действие поля экранирующей сетки — только одним экраном — управляющей сеткой. Следовательно, влияние напряжения экранирующей сетки на анодный ток гораздо больше, чем влияние анодного напряжения. Вследствие положительного потенциала на экранирующей сетке к ней притягиваются электроны, образуя ток I_{c2} . Таким образом, катодный ток тетрода $I_k = I_a + I_{c1} + I_{c2}$.

При отрицательном потенциале на управляющей сетке в тетроде протекают только токи — I_a и I_{c2} . Условное обозначение тетрода — на рис. 6.10, а. Рассмотрим те же семейства статических характеристик тетрода, что и триода.

Анодно-сеточные характеристики $I_a = f(U_{c1})$ при $U_a = \text{const}$, $U_{c2} = \text{const}$. На рис. 6.10, б показаны характеристики, снятые при разных U_a и U_{c2} . Зная характер влияния поля анода и поля экранирующей сетки на электроны пространственного заряда, нетрудно провести анализ этих характеристик. Анод отделен от пространственного заряда у катода двумя сетками, которые экранируют его, резко ослабляя влияние поля анода, поэтому даже большие изменения напряжения U_a вызывают незначительные изменения тока I_a . Экранирующая сетка отделена от пространственного заряда у катода всего одной сеткой, которая для получения левой характеристики имеет обычно большую проницаемость, поэтому

$$\begin{aligned} I_a, \text{mA} &= 2000 \\ U_a &= 150 \text{ В} \end{aligned} \quad \left. \begin{aligned} U_{c2} &= 120 \text{ В} \\ U_{c1} &= 150 \text{ В} \end{aligned} \right\}$$

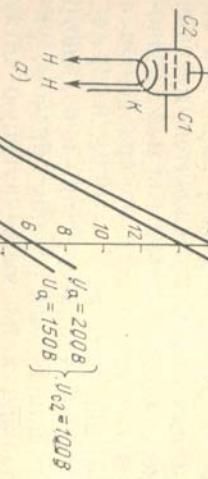


Рис. 6.10. Условное обозначение тетрода (a) и его анодо-сеточные характеристики (б)

даже небольшие изменения напряжения U_{c2} вызывают значительные изменения анодного тока.

Анодные характеристики $I_a = f(U_a)$ при $U_{c1} = \text{const}$, $U_{c2} = \text{const}$. На рис. 6.11 показана одна характеристика изменения анодного тока I_a и также тока экранирующей сетки $I_{c2} = f(U_a)$ при $U_{c1} = \text{const}$ и $U_{c2} = \text{const}$. При отсутствии анодного напряжения $U_a = 0$ и наличии заданного напряжения U_{c1} и U_{c2} электроны, пролетевшие экранирующую сетку, попадают в сильное электрическое поле этой сетки, искривляют свою траекторию и возвращаются обратно на нее. Возникает режим возврата электронов, подобный тому, который был ранее рассмотрен для триодов. Ток экранный сетки I_{c2} становится максимальным, а ток анода $I_a = 0$. На участке АВ с увеличением анодного напряжения происходит значительный рост анодного тока I_a и соответственно уменьшение тока экранирующей сетки I_{c2} , что можно объяснить воздействием ускоряющего поля анода на электроны пространственного заряда, расположенного между экранирующей сеткой и анодом.

При дальнейшем увеличении анодного напряжения (участок ВС) неожиданно анодный ток I_a начинает уменьшаться, а ток экранирующей сетки I_{c2} растет. Это объясняется следующим образом. При анодных напряжениях свыше 15–20 В скорость электронов, подлетающих к аноду, настолько возрастают, что они способны выбрать из анода вторичные электроны, т. е. возникает вторичная электронная эмиссия с анода. Вторичные электроны, вылетевшие с анода, попадают в сильное электрическое поле экранирующей сетки, так как напряжение $U_{c2} > U_a$ и частично попадают на нее, при этом анодный ток уменьшается, а ток экранирующей сетки I_{c2} увеличивается.

Изменение тока в цепях электродов лампы за счет вторичной эмиссии называется *динатронным эффектом*.

Таким образом, на анодной характеристике тетрода за счет динатронного эффекта образуется участок, где с ростом напряжения на аноде анодный ток уменьшается, а следовательно, тетрод в этом случае обладает отрицательным сопротивлением, подобно туннельному диоду и тиристору, которые были рассмотрены ранее.

При дальнейшем увеличении анодного напряжения (участок СД) скорость и энергия электронов возрастают и, хотя вторичная эмиссия с анода увеличивается, но сильное электрическое поле анода притягивает обратно вторичные электроны и поэтому наблюдаются рост анодного тока I_a и соответствующее уменьшение тока I_{c2} .

Дальнейшее повышение анодного напряжения на изменение тока сказывается незначительно из-за электрического действия двух сеток, отделяющих анод от пространственного заряда электронов у катода. При этом ток экранирующей сетки I_{c2} образуется только электронами, которые перехватываются витками этой сетки на их пути к аноду.

Анализ работы тетрода показывает, что его преимуществами, по сравнению с триодом, являются:

- резкое уменьшение проходной емкости и, как следствие, возможность работы на высоких частотах;
- сочетание в одной лампе левых характеристик и большого коэффициента усиления.

Основной недостаток тетрода — наличие динатронного эффекта. Появление отрицательного сопротивления вследствие динатронного эффекта ограничивает возможность работы тетрода при малых анодных напряжениях и является серьезным препятствием к применению тетродов в схемах усиления электрических сигналов. Отсюда возникла необходимость в усовершенствовании тетрода, т. е. при сохранении всех его достоинств потребовалось устранить динатронный эффект. Решение этой проблемы было найдено в двух типах ламп: лучевом тетроде и пентоде.

ЛУЧЕВЫЕ ТЕТРОДЫ

Основная идея устранения динатронного эффекта в лучевом тетроде — создание отдельных пучков первичных электронов большой плотности (электронных лучей), которые за счет своего тормозящего электрического поля отбрасывают вторичные электроны, вылетевшие с анода, обратно. Задача получения электронных лучей решается следующими путями: управляющая 2 и экранирующая 3 сетки имеют одинаковое число витков, расположенных точно друг против друга, это способствует формированию электронных пучков (рис. 6.12). Для того чтобы электроны пучка не разлетались в стороны, ставятся два экрана, которые представляют собой две пластины 4, соединенные с катодом 1, и, следовательно, имеют нулевой потенциал относительно катода. Это создает тормозящее поле для вторичных электронов. Кроме того, расстоя-

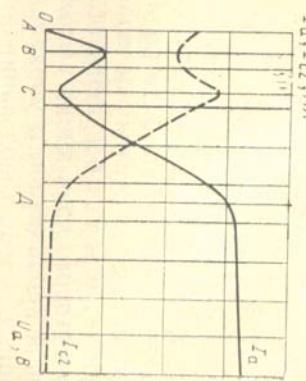


Рис. 6.11. Анодная и сеточная характеристики тетрода

трического поля между экранирующей сеткой и анодом становится недостаточной, чтобы отбросить вторичные электроны, поэтому часть из них достигает экранирующей сетки. Лучевые тетроды применяют в мощных усилителях.

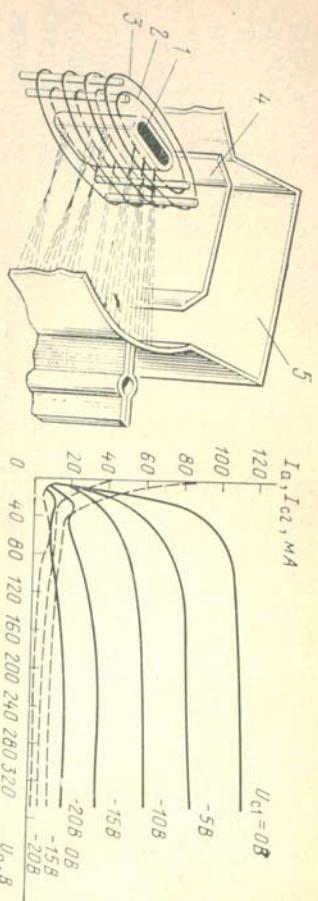


Рис. 6.12. Устройство лучевого тетрода

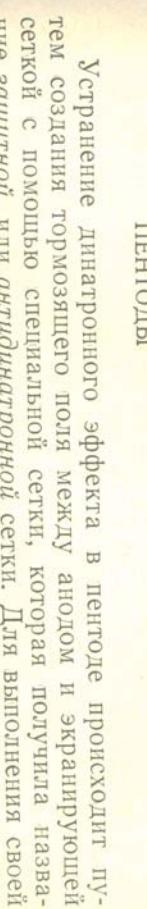
Рис. 6.13. Амплификационные характеристики лучевого тетрода

ние между анодом 5 и экранирующей сеткой в лучевом тетроде больше, чем в обычных тетродах, что также способствует созданию тормозящего поля для вторичных электронов, вылетающих с анода, так как при большем расстоянии в промежутке анод—экранирующая сетка одновременно находится большее количество электронов.

Таким образом, в лучевом тетроде динатронный эффект устраняется путем увеличения объемной плотности электронного потока первичных электронов за счет его фокусировки в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Такой луч образует потенциальный барьер для электронов, выбитых с анода. Так как шаг намотки величины шага намотки является важной проблемой, которая сильно влияет на свойства лучевого тетрода. Действительно, если выбирать малый шаг намотки, т. е. выполнить сетки густыми, то имеется несомненный выигрыш — уменьшится проходная емкость, уменьшится общая проницаемость лампы и увеличится коэффициент усиления. Но недостатком лампы в этом случае будет то, что анодо-сеточные характеристики будут правыми и при небольших амплитудах управляющего напряжения появятся сеточные точки, что нежелательно. Поэтому обычно сетки имеют большой шаг намотки для получения ламп с левыми характеристиками. При этом проходная емкость получается больше, чем у обычных тетролов, но все же много меньше, чем у триодов, коэффициент усиления μ также меньше, чем у тетролов, но значительно больше, чем у триодов.

Из анализа этих характеристики лучевых тетролов даны на рис. 6.13. Из динатронный эффект практически устраняется;

незначительный динатронный эффект проявляется только при малых анодных напряжениях и подаче большого отрицательного напряжения на управляющую сетку. При этих условиях уменьшается число электронов, летящих к аноду, и, следовательно, уменьшается плотность электронного луча, сила тормозящего элект-



Устранение динатронного эффекта в пентоде происходит путем создания тормозящего поля между анодом и экранирующей сеткой с помощью специальной сетки, которая получила название *защитной*, или *антидинатронной* сетки. Для выполнения своей задачи — создания тормозящего поля для вторичных электронов, выбитых из анода, на защитную сетку обычно подается нулевой потенциал или даже небольшое постоянное напряжение, отрицательное или положительное, в зависимости от выполняемой лампой функции. Для того чтобы третья сетка не оказывала заметного влияния на скорость движения первичных электронов, проницаемость защитной сетки увеличивается, т. е. ее делают редкой, но чтобы скомпенсировать тормозящее действие этой сетки, на экранирующую сетку подается повышенное положительное напряжение, составляющее $(0,7...0,9) U_a$.

Таким образом, для первичных электронов, летящих к аноду с большой скоростью и обладающих большой энергией, защитная сетка не представляет заметного препятствия, но для вторичных электронов, вылетающих с анода с небольшой скоростью, поле защищенной сетки является настолько тормозящим, что не позволяет им попасть на экранирующую сетку и предотвращает динатронный эффект. (Условное обозначение — смотри на рис. 6.14.)

Уравнение действующего напряжения для пентода составлено по аналогии с триодом и тетродом:

$$U_\pi = U_{c1} + D_{c1} U_{c2} + D_{c1} D_{c2} U_{c3} + D_{c1} D_{c2} D_{c3} U_a \approx U_{c1} + DU_{c1}.$$

Анализ этого уравнения позволяет сделать следующие выводы. Общая проницаемость пентода $D = D_{c1} D_{c2} D_{c3}$ очень мала, а значит, коэффициент усиления μ очень велик. Если управляющая сетка редкая, то при больших напряжениях U_a лампа запирается при большом отрицательном напряжении на сетке, т. е. имеет левые характеристики.

Влияние поля анода на пространственный заряд у катода еще

меньше, чем в тетроле, так как между анодом и катодом находятся три сетки. Наибольшее влияние на пространственный заряд оказывают напряжения управляющей сетки U_{c1} и экранирующей

сетки U_{c2} , которая закрыта от катода только одной и при том редкой управляющей сеткой. Так как между анодом и управляющей сеткой находятся две сетки, оказывающие экранирующее действие, то проходная емкость в пентоде еще меньше, чем в тетроде, и во много раз меньше, чем в триоде, что обеспечивает возможность работы пентода на очень высоких частотах.

Рассмотрим статические характеристики пентода. *Анодно-сеточные характеристики пентода* $I_a = f(U_a)$ при $U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} = \text{const}$ представлены на рис. 6.15. При напряжении на аноде $U_a = 0$ анодный ток $I_a = 0$, а ток экранирующей сетки I_{c2} достигает максимального значения, что соответствует режиму захвата, рассмотренному ранее при анализе работы тетрода. При небольших анодных напряжениях анодный ток I_a резко возрастает. Это объясняется возрастанием влияния ускоряющего электрического поля анода на электроны, пролетающие через экранирующую сетку. При этом происходит перераспределение тока катода — с увеличением напряжения U_a растет ток I_a и соответственно уменьшается ток I_{c2} , а ток катода I_k остается почти неизменным, так как влияние поля анода на него незначительно. При дальнейшем увеличении анодного напряжения возникает режим перехвата электронов, и анодный ток меняется незначительно вследствие экранующего действия трех сеток, ослабляющих воздействие ускоряющего поля анода на пространственный заряд электронов около катода. Чем больше отрицательное напряжение на управляющей сетке, тем ниже проходят анодные характеристики, так как сильнее становится тормозящее поле сетки, и анодный ток I_a уменьшается.

Характеристики зависимости токов I_a и I_{c2} от напряжения U_{c3} (рис. 6.16). В радиопередающих устройствах защитную сетку

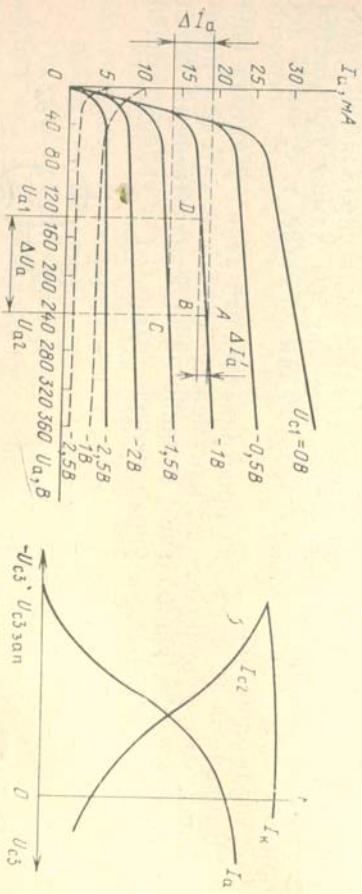


Рис. 6.15. Анодные характеристики пентода

Рис. 6.16. Характеристика зависимости $I_k, I_a, I_{c2} = f(U_{c3})$

мало отличаются от аналогичных характеристик тетрода (рис. 6.10, б). Следует иметь в виду, что анодно-сеточные характеристики пентодов и тетролов более нелинейны, чем триодов.

Анодно-сеточные характеристики пентода $I_a = f(U_a)$ при $U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} = \text{const}$ представлены на рис. 6.15. При напряжении на аноде $U_a = 0$ анодный ток $I_a = 0$, а ток экранирующей сетки I_{c2} достигает максимального значения, что соответствует режиму захвата, рассмотренному ранее при анализе работы тетрода. При небольших анодных напряжениях анодный ток I_a резко возрастает. Это объясняется возрастанием влияния ускоряющего электрического поля анода на электроны, пролетающие через экранирующую сетку. При этом происходит перераспределение тока катода — с увеличением напряжения U_a растет ток I_a и соответственно уменьшается ток I_{c2} , а ток катода I_k остается почти неизменным, так как влияние поля анода на него незначительно. При дальнейшем увеличении анодного напряжения возникает режим перехвата электронов, и анодный ток меняется незначительно вследствие экранующего действия трех сеток, ослабляющих воздействие ускоряющего поля анода на пространственный заряд электронов около катода. Чем больше отрицательное напряжение на управляющей сетке, тем ниже проходят анодные характеристики, так как сильнее становится тормозящее поле сетки, и анодный ток I_a уменьшается.

Характеристики зависимости токов I_a и I_{c2} от напряжения U_{c3} (рис. 6.16). В радиопередающих устройствах защитную сетку

СТАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕТРОДОВ И ПЕНТОДОВ

Крутизна характеристики S . $S = \Delta I_a / \Delta U_{c1}$ мА/В при $U_a, U_{c2}, U_{c3} = \text{const}$. В тетродах и пентодах влияние управляющей сетки на ток I_a такое же, как и в триоде, поэтому крутизна характеристики в этих лампах составляет, как и в триоде, единицы — десятки миллиампер на вольт. Вследствие нелинейности характеристики пентода и тетрода S резко меняется от точки к точке. При напряжениях, близких к U_{c1} запирания, крутизна очень мала, так как начальный участок анодно-сеточной характеристики довольно пологий, но при дальнейшем уменьшении отрицательного напряжения на управляющей сетке крутизна увеличивается.

Внутреннее сопротивление R_i . $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$ при $U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} = \text{const}$. У пентода и тетрода R_i очень велико и достигает сотен килоом. Это объясняется тем, что даже при очень больших приращениях анодного напряжения ΔU_a ток I_a меняется очень незначительно.

Коэффициент усиления μ . $\mu = -\Delta U_a / \Delta U_c$ при $I_a = \text{const}$, $U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} = \text{const}$. Как уже отмечалось выше, μ экранированных ламп в сотни раз больше, чем у триода. Это связано с тем, что электрическое поле управляющей сетки непосредственно воздействует на пространственный заряд катода, а электрическое поле анода экранировано от этого заряда двумя или тремя сетками.

Большим достоинством пентода является очень малая проходная емкость C_{ac} . Определение параметров производится по анодным характеристикам (см. рис. 6.15). Для определения крутизны характеристики S находят приращения анодного тока ΔI_a по точкам A и C , которые взяты при разных напряжениях на управляющей сетке U_c и постоянном анодном напряжении U_{a2} ,

$$\Delta U_c = |U_{c1}| - |U_{c2}|, S = \Delta I_a / \Delta U_c, \text{ при } U_a = \text{const},$$

$$\Delta U_c = 1,5 - 1 = 0,5 \text{ В},$$

$$\Delta I_a = 6 \text{ мА} S = 6/0,5 = 12 \text{ мА/В}.$$

иногда применяют в качестве управляющей, т. е. при постоянном напряжении U_a, U_{c2} и U_{c3} меняют напряжение U_{c1} . В этом случае токи I_a и I_{c2} меняются, как показано на рис. 6.16. Обратите внимание, что при определенном отрицательном напряжении на защитной сетке U_{c1} запирания происходит запирание пентода по анодному току, при этом ток I_{c2} будет максимальным и равным току катода. Это нетрудно объяснить, учитывая образование пространственного заряда между экранирующей сеткой и защитной сеткой. Электроны, пролетевшие экранирующую сетку, возвращаются на экранирующую сетку (режим возврата). При уменьшении отрицательного напряжения на защитной сетке наблюдается резкое увеличение тока I_a и уменьшение тока I_{c2} . При этом ток катода остается почти неизменным, так как влияние поля защиты сетки на пространственный заряд у катода незначительно.

Внутреннее сопротивление R_i определяется по характеристике, снятой при постоянном U_c , $\Delta U_a = U_{a2} - U_{a1}$. Катет AB в треугольнике АВД равен приращению тока I'_a

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I'_a \text{ при } U_c = \text{const},$$

$$\Delta U_a = 240 - 140 = 100 \text{ В},$$

$$\Delta I'_a = 1 \text{ мА}, R_i = \frac{100}{1 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ кОм}.$$

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕНТОДОВ И ЛУЧЕВЫХ ТРИОДОВ

Маломощные электронные лампы получили название приемно-усилительных ламп. В настоящее время эти лампы применяются только в аппаратуре старых выпусков. Приемно-усилительные лампы по своему назначению и в зависимости от диапазона рабочих частот делятся на следующие типы: низкочастотные и высокочастотные. Высокочастотные пентоды и триоды применяются в радио- и телевизионных устройствах для усиления высокой частоты. Их основной особенностью является очень малая проходная емкость C_{as} , которая может иметь значения до 0,003 пФ. Для сравнения укажем, что у биполярных транзисторов проходная емкость составляет в лучших образцах единицы пикофарад.

Конструктивная особенность высокочастотных пентодов — наличие очень густой экранирующей сетки, благодаря чему резко увеличивается внутреннее сопротивление R_i этих ламп, которое достигает 1—2 Мом и коэффициент усиления μ до значений, равных 2000...3000.

Низкочастотные пентоды и лучевые тетроды в основном применялись для усиления мощности низкой частоты. В этих лампах экранирующая сетка делается более редкой, благодаря чему уменьшается внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления μ . Основными требованиями к низкочастотным пентодам и лучевым тетродам являются: получение левых анодно-сеточных характеристик, высокой крутизны характеристики S .

КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛАМПЫ

Комбинированные лампы представляют собой две или три лампы, заключенные в одном баллоне. Благодаря этому, упрощается монтаж аппаратуры, уменьшаются габаритные размеры, экономится питание на накал.

Имеются лампы — двойные диоды, двойные триоды, триод-пентод, двойные лучевые тетроды.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП И ТРАНЗИСТОРОВ

Ознакомившись с работой электронных ламп и транзисторов, можно указать основные причины, которые привели к тому, что электронные лампы сейчас не применяют в аппаратуре малой и средней мощности.

1. Малый срок службы. Долговечность электронных ламп составляет в среднем не более 10 тыс. часов, что гораздо ниже долговечности транзисторов, которые могут работать до 100 тыс. часов.
2. Большие габаритные размеры по сравнению с транзисторами и особенно с интегральными микросхемами.
3. Низкая экономичность, связанная с большими затратами мощности на накал лампы.

МАРКИРОВКА ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП

Первый элемент обозначения — число, которое окружлено указывает напряжение накала. Наиболее распространенные лампы имеют напряжение накала $U_n = 6,3$ В. Второй элемент — условное обозначение лампы:

Д — диоды, П — кенотроны, Х — двойные диоды, С — триоды, Н — двойные триоды, Э — тетроды, П — низкочастотные выходные пентоды и лучевые тетроды, Ж — пентоды с короткой анодно-сеточной характеристикой, К — пентоды с удлиненной анодно-сеточной характеристикой, у которых крутизна характеристики S меняется в очень широких пределах, Г — диод — триоды, Б — диод — пентоды, Ф — триод — пентоды.

Выходы. 1. Для уменьшения паразитной проходной емкости анод — управляемая сетка в тетроде введена экранирующая сетка. 2. С помощью экранирующей сетки удалось также создать лампу с левыми характеристиками и с большим коэффициентом усиления.

3. Основным недостатком тетрода является наличие динатронального эффекта.

4. Для устранения динатронного эффекта, свойственного обычным тетродам, были созданы пентоды и лучевые тетроды.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким образом в тетроде можно получить левые характеристики и большой коэффициент усиления μ ?
2. В чем сущность динатронного эффекта?
3. Каким внутренним сопротивлением обладает тетрод при динатронном эффекте, когда ток I_a уменьшается при увеличении напряжения U_a ? В каких еще электронных приборах Вы встречались с подобным явлением?
4. Как и почему будут меняться I_a и I_e в пентоде, если подавать отрицательное напряжение на защитную сетку?
5. Сравните параметры μ , R_i и C_{as} у лучевых тетролов и пентолов?
6. Дайте сравнительную оценку электронных ламп и транзисторов.

6.5. ГЕНЕРАТОРНЫЕ И МОДУЛЯТОРНЫЕ ЛАМПЫ

НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Как уже отмечалось, маломощные приемно-усилительные лампы в настоящее время практически не применяются и сохранились в аппаратуре, которая выпускалась до 70-х годов.

В

настоящее время электронные лампы являются основным электронным прибором только в аппаратуре с большой мощностью, достигающей сотен киловатт. При этом мощные лампы, которые применяются в высокочастотной аппаратуре, получили название генераторных, а в низкочастотной — модуляторных.

Генераторные и модуляторные лампы вследствие работы с большими мощностями отличаются своей конструкцией и рами.

Основные требования к этим лампам вытекают из их назначения и условий работы: большое допустимое анодное напряжение, у некоторых ламп оно достигает 10...12 кВ; большая допустимая мощность, рассеиваемая анодом, — до 500 кВт; очень большой ток катода — до 300 А.

К генераторным лампам, работающим на СВЧ, предъявляются дополнительные требования получения малых значений проходной емкости C_{ac} и индуктивностей вводов. При мощности, рассеиваемой на аноде, свыше 1...1,5 кВт естественное лучистое охлаждение становится недостаточным и приходится применять принудительное охлаждение.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ГЕНЕРАТОРНЫХ И МОДУЛЯТОРНЫХ ЛАМП

Мощные лампы, которые используются в диапазонах длинных, средних и коротких волн, имеют в основном торированные карбидированные вольфрамовые катоды прямого накала — ТКВ. В наиболее мощных лампах токи накала достигают до 1000 А. Напряжение накала составляет 20...26 В.

Использование этих катодов вместо вольфрамовых, применявшихся ранее, снизило температуру нагрева катода до 2000 К вместо 2500 К у вольфрама, а это, в свою очередь, позволило приблизить сетку к катоду, так как уменьшился ее обогрев.

Уменьшение расстояния между сеткой и катодом позволило увеличить крутизну характеристики, т. е. дало возможность получить большие изменения анодного тока при тех же изменениях напряжения на управляющей сетке.

Сетки мощных ламп изготавливают из тугоплавких металлов — молибдена или вольфрама. Конструкция и крепление сеток должны предусматривать возможность рассеивания значительной мощности, достигающей у наиболее мощных ламп 10...20 кВт.

У многосеточных мощных ламп возникают особенно большие трудности с отводом тепла от сеток, что, естественно, ограничивает их мощность по сравнению с триодом. Несколько понизить температуру сеток за счет усиления лучепреломления позволяет их чернение.

Конструкция анода мощных ламп зависит от типа охлаждения.

Воздушное охлаждение (рис. 6.17) осуществляется с помощью воздуха, который протянут под большим давлением.

Лампа имеет медный анод, к которому присоединяется радиатор с большой поверхностью охлаждения, полученный за счет ребер, изготавляемых из меди и алюминия. Медный цилиндр анода образует часть баллона лампы, а остальная часть изготавливается из стекла или керамики.

Лампа с радиатором помещается в трубу, которая соединяется через воздухопровод с мощным вентилятором.

Как недостаток системы воздушного охлаждения следует отметить сильный акустический шум, создаваемый потоком воздуха.

Водяное охлаждение, предложенное советским ученым

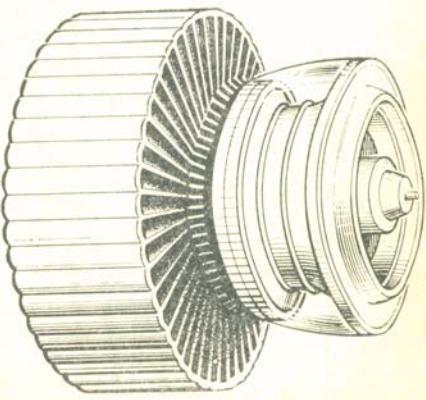
М. А. Бонц-Бруевичем еще в 20-е годы, применяется в лампах с мощностью в десятки и сотни киловатт и выше. Конструкция анода, как и в лампе с воздушным охлаждением, цилиндрическая, но без радиатора. Анод помещается в бачок с проточной водой.

Вода, протекая через бачок с большой скоростью, нагревается и отводит тепло от анода. Так как анод имеет очень высокий полезный потенциал, то соединение анодного бачка с системой охлаждения воды осуществляется через изоляционные трубы — вставки. Система водяного охлаждения имеет два контура — внутренний, в котором течет вода, непосредственно охлаждающая анод, и внешний, где происходит теплообмен горячей воды с анодом и водой, которая непрерывно проходит искусственное охлаждение. Во внутреннем контуре протекает дистиллированная вода, благодаря чему уменьшается оседание накипи на стеклах анода и бачка, ухудшающей условия отдачи тепла анодом. Во внешнем контуре течет обычная вода. К сожалению, система водяного охлаждения очень громоздка и неэкономична.

Пароводяное охлаждение применяется также в лампах с мощностью в сотни киловатт. Принцип пароводяного охлаждения: тепло, выделяемое анодом, тратится на испарение (парообразование). Данная система более экономична, чем система водяного охлаждения, так как для испарения одного грамма воды от комнатной температуры до температур, допустимых в системе водяного охлаждения, — всего 30...40 кал.

Анод лампы имеет ребристую поверхность и помещается в испарительный бак. В промежутках между ребрами температура максимальная, и вода здесь закипает, и образовавшийся пар уходит, отводя тепло. Пар поступает в специальное устройство, где,

Рис. 6.17. Устройство генераторной лампы с воздушным охлаждением



охлаждаясь, конденсируется в капельки воды, стекающие обратно в бак.

Лампы с пароводяным охлаждением называются **валотронами**. Наиболее перспективными системами охлаждения являются воздушная и пароводяная, благодаря своей экономичности и относительной простоте по сравнению с водяной системой.

Катод и сетки мощных ламп размещаются внутри цилиндра анода. Выводы их пропускаются наружу через стеклянную часть баллона и обдуваются воздухом с помощью вентилятора.

МАРКИРОВКА МОЩНЫХ ЛАМП

Первый элемент обозначения — буква, характеризующая область применения лампы — Г — генераторная. Второй элемент — также буква, указывает частотный диапазон: К — использование в диапазонах ДВ, СВ и вплоть до КВ, У — в диапазонах КВ и УКВ, С — в диапазоне ДМВ. Иногда на втором месте стоит буква М, что означает модуляторная, ГМ, или И — импульсная — ГИ.

Цифры, стоящие после букв, соответствуют номеру разработки. После цифр обычно идут буквы, которые означают тип принудительного охлаждения анода: А — волнистое, Б — воздушное. Отсутствие букв говорит об отсутствии принудительного охлаждения, хотя иногда ставится буква и после цифр, которая означает, что лампа модернизированная.

Например, ГУ-53А — генераторная лампа с волнистым охлаждением, используемая в диапазонах КВ и УКВ, ГК-10Б — генераторная лампа с воздушным охлаждением, диапазон частот до КВ включительно.

Как известно, для работы на высоких частотах более подходит пентоды и тетроды, имеющие меньшую проходную емкость, чем триоды. Однако в этих лампах возникают трудности с отводом тепла от сеток, что ограничивает их мощность. Поэтому тетроды применяют только при мощностях не более 80...100 кВт, пентоды — до 1 кВт, в то время как допустимая мощность рассеяния на аноде у триодов достигает 500 кВт (ГУ-49А).

Генераторные триоды для получения большого коэффициента усиления μ обычно правые и, следовательно, их анодно-сеточные характеристики большей частью расположены в области сеточных токов при $+U_c$. Для получения большой выходной мощности управляемое напряжение, приложенное между сеткой и катодом, может стать равным или даже больше анодного напряжения. Это вызовет резкое возрастание тока сетки I_c , который может стать даже больше анодного тока I_a . Токи управляющих сеток I_c в мощных триодах достигают десятков ампер.

Выводы. 1. Генераторные и модуляторные лампы работают при мощностях в десятки и сотни киловатт. 2. При этих мощностях естественное охлаждение становится недостаточным и применяется принудительное охлаждение анодов. 3. Существует три основ-

ных вида охлаждения анодов мощных ламп — воздушное, водяное и пароводяное. Наиболее перспективными являются воздушное и пароводяное охлаждения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается преимущество применения катодов типа ТКВ в генераторных и модуляторных ламп по сравнению с вольфрамовыми?

2. В чем заключаются трудности создания пентодов и тетродов мощных генераторных и модуляторных ламп?

3. Почему у мощных ламп на накал вначале подают пониженное напряжение, а только через некоторое время постепенно его повышают до заданного? 4. В чем заключается преимущество пароводяного охлаждения анода по сравнению с водяным?

Г л а в а 7. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРИБОРЫ

7.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТРУБОК

НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТРУБОК

Электронно-лучевыми приборами называют электровакуумные приборы, в которых формируется сконцентрированный в виде луча электронный поток, управляемый электрическими сигналами. Эти приборы находят широкое применение в телевидении, осциллографии, радиолокации, вычислительной технике и т. д.

Напомним, что каждый электронный прибор предназначен для преобразования одного вида энергии в другой. По видам преобразования существует несколько основных типов электронно-лучевых приборов:

приборы, преобразующие электрические сигналы в видимое изображение, — осциллографические трубы, приемные телевизионные трубы; приборы, преобразующие видимое изображение в электрические сигналы, — передающие телевизионные трубы; приборы, преобразующие невидимые глазом изображения в видимые, — электронные микроскопы.

В соответствии с программой изучаемого предмета, в данной главе рассмотрены только те приборы, которые преобразуют электрические сигналы в видимое изображение.

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ

Преобразование электрической энергии в видимое изображение происходит на экране соответствующих электронно-лучевых трубок. Экран представляет собой тонкий слой вещества, которое

обладает способностью светиться под воздействием бомбардировки его поверхности электронами и называется **люминофором**.

В зависимости от энергии электронов, бомбардирующих экран, возможны следующие явления:

1. Вторичная эмиссия с экрана. Она происходит в том случае, если энергия электронов равна работе выхода вещества люминофора или больше ее.

2. Воздействие атомов люминофора. Оно происходит в случае, если энергия электронов меньше работы выхода вещества люминофора. При этом часть электронов из валентной зоны и примесных уровней вещества люминофора переходит в зону проводимости. Состояние возбуждения неустойчиво, так как при взаимодействии с ионами кристаллической решетки электроны, попавшие в зону проводимости, теряют полученную энергию и очень быстро возвращаются на прежние уровни. Электроны отдают в окружающее пространство ровно столько энергии (в виде электромагнитных волн), сколько они получили при возбуждении и переходе на более удаленную от ядра орбиту. При создании люминофора добиваются, чтобы энергия излучения попала в спектр видимых глазом электромагнитных волн. Каждой длине волн этого излучения будет соответствовать и определенный цвет свечения экрана.

Для того чтобы произошло возбуждение атомов люминофора, требуется значительная энергия

$$W = nqU_a,$$

где q — заряд электрона, n — число электронов, U_a — ускоряющее напряжение, действующее на электрон.

Для получения требуемой энергии ускоряющее напряжение должно быть не менее единиц — десятков киловольт.

Общее число электронов n , бомбардирующих экран, должно быть велико, т. е. требуется пучок электронов или электронный луч. Получение пучка электронов в электронно-лучевых трубках, как и в электрических лампах, происходит на основе термоэлектронной эмиссии. Бомбардировка экрана лучом тем эффективней и свечение точки на экране тем ярче, чем больше электронов сосредоточится на единице поверхности экрана. Следовательно, в электронно-лучевой трубке необходимо добиться минимально возможного сечения электронного луча. По аналогии с оптикой это явление называют **фокусировкой луча**.

Чтобы электронный луч вычерчивал на экране изображение, он должен перемещаться по экрану, поэтому в электронно-лучевой трубке необходима **система отклонения луча по экрану**. Таким образом, как и во всех ранее изученных приборах, и здесь остаются те же принципы — создание потока заряженных частиц, управление этим потоком и, как результат, преобразование одного вида энергии в другой.

Следует отметить, что управление электронным лучом в электронно-лучевых трубках гораздо сложнее, чем в лампах: кроме изменения тока луча, как в лампах, требуются еще его фокуси-

ровка и отклонение. Для воздействия на луч с целью его фокусировки и отклонения используются либо электростатические, либо электромагнитные поля.

7.2. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ И ОТКЛОНЕНИЕМ УСТРОЙСТВО

Трубка состоит из **электронного прожектора**, системы отклонения и экрана.

Назначение электронного прожектора — формирование электронного луча и его фокусировка, а также создание сильного уско-
ряющего поля для электронов луча.

Электронный прожектор (рис. 7.1) содержит обычный подогревный катод. Нить катала HH находится внутри цилиндра, а оксидный катод K нанесен на его торец. Назначение катода — термоэлектронная эмиссия. Катод помещен внутри другого цилиндра — модулятора M , торцевая часть которого представляет собой диафрагму с узким круглым отверстием. Модулятор играет ту же роль, что и управляющая сетка в лампе: на него подается отрицательное относительно катода напряжение. При изменении этого напряжения меняются ток луча и яркость свечения экрана.

Кроме того, прожектор имеет два анода, представляющих собой полые цилиндры с диафрагмами, имеющими очень маленькие отверстия для пролета электронов, что также позволяет уменьшить сечение луча, так как электроны, которые сильно отклонились от оси трубы, не пройдут дальше.

На второй анод A_2 подается высокое напряжение в единицы киловольт в зависимости от типа трубок, на первый анод A_1 — меньшее напряжение — сотни вольт. Оба анода создают сильное ускоряющее поле для электронного луча с тем, чтобы сообщить

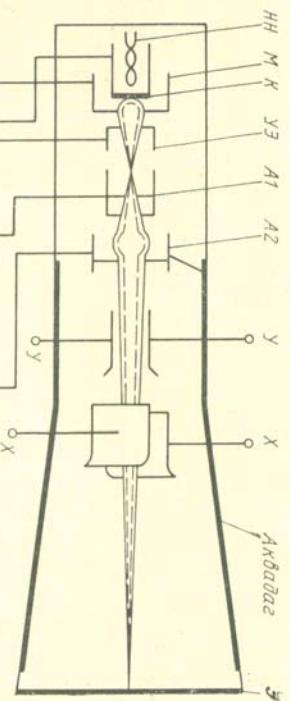


Рис. 7.1. Устройство электронно-лучевой трубы с электростатическим управлением

электронам достаточную кинетическую энергию, необходимую для возбуждения атомов люминофора.

Как уже отмечалось, при бомбардировке экрана электронным лучом, также возникает вторичная эмиссия электронов. Вторичные электроны притягиваются к проводящему графитовому слою, который падает на внутреннюю поверхность колбы. Этот слой называется *аквадаг*. Он соединен внутри колбы со вторым анодом.

Внутри баллона трубы, как и в электронных лампах, создается вакуум. На внутренней торцевой поверхности расширенной части баллона наносится люминофор, образующий экран \mathcal{E} .

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ ЛУЧА

Цель фокусировки — получение минимального поперечного сечения луча в заданной точке на экране. В отсутствие фокусировки изображение на экране становится расплывчатым, так как электронный луч захватывает большую поверхность экрана, и его воздействие на отдельные атомы люминофора становится меньше. Электронный луч — это поток одновременно заряженных частиц, испытывающих силы взаимного отталкивания, и это является противодействием фокусировке.

В системе с электростатической фокусировкой луча электроды, составляющие прожектор, создают такое электрическое поле, с помощью которого решаются две задачи — ускорение электронов в направлении экрана и их фокусировка. В фокусировке участвуют все электроды прожектора: катод, модулятор и аноды. Вследствие разницы потенциала на этих электродах в пространстве между ними создаются электрические поля, действующие на электронный луч. Под действием сил поля электронный луч изменяет направление своего движения, подобно лучу света при прохождении оптической линзы. Поэтому система фокусировки электронного луча получила название электронной линзы по аналогии с подобными оптическими системами.

В электронно-лучевых трубках фокусировка электронного луча производится с помощью двух электронных линз: первая обраzuется катодом, модулятором и первым анодом, вторая — первым и вторым анодом. В поле действия первой линзы скорость электронов значительно ниже, чем в поле действия второй линзы, так как $U_{a1} < U_{a2}$, поэтому траектория электронов под действием электрического поля первой линзы искривляется сильнее, чем под действием электрического поля второй линзы. Поэтому первая линза короткофокусная (скрепление траекторий электронов происходит в области между модулятором и первым анодом, т. е. на небольшом расстоянии от катода), а вторая длиннофокусная (скрепление траекторий электронов происходит уже на экране).

Так как принцип действия обеих электронных систем одинаков, рассмотрим действие второй линзы, т. е. системы, состоящей из двух анодов (рис. 7.2).

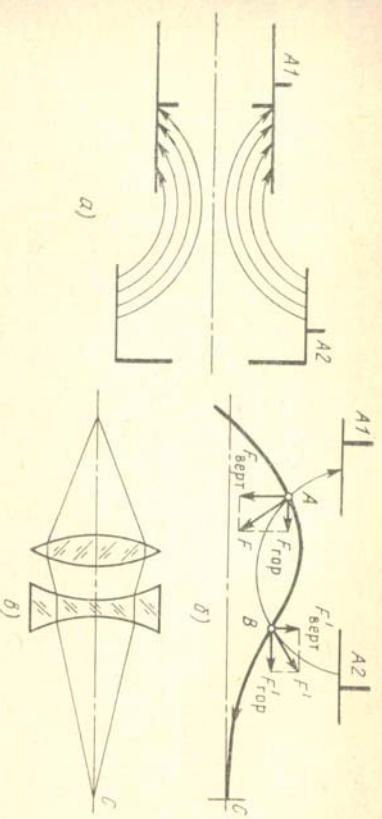


Рис. 7.2. Фокусировка электронного луча в электронно-лучевой трубке с электростатической фокусировкой:
а — электрическое поле между анодами A_1 и A_2 , б — траектория движения электрона в электрическом поле, в — оптический эквивалент электростатической фокусировки

Электрическое поле между двумя электродами всегда направлено от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом, т. е. в данном случае от второго анода к первому аноду (рис. 7.2, а).

Для примера рассмотрим траекторию движения одного электрона, который под действием ускоряющего поля анодов движется к экрану. Как известно, на заряд, движущийся в электрическом поле, действует сила, направленная в каждой точке по касательной к силовой линии (рис. 7.2, б).

Выберем две точки: A — в пространстве первого анода и B — в пространстве второго анода. Силу F , действующую в каждой из этих точек, можно разложить на две составляющие — вертикальную и горизонтальную. Горизонтальные составляющие в обеих точках ускоряют движение электронов к экрану. В точке A вертикальная составляющая силы, действующей на электрон, прижимает его к оси симметрии трубы, в точке B отклоняет его от оси. Скорость электрона в точке B значительно выше, чем в точке A , поэтому отклоняющая сила воздействует на электрон в меньшей степени, так как он находится в поле ее действия меньше времени. Следовательно, собирающее действие линзы в правой части гораздо сильнее, чем рассеивающее действие в левой части, в результате чего в точке C произойдет скрещивание всех траекторий электронов, летящих к аноду.

Рассмотренная система фокусировки по своему действию эквивалентна оптической системе, состоящей из собирающей и рассеивающей линз, подобранных так, что действие собирающей линзы сильнее, чем рассеивающей (рис. 7.2, в). Регулировку точек фокусировки можно производить, изменяя напряжение на первом или втором аноде. Естественно, что удобнее это делать, меняя напряжение на первом аноде, так как он

входит в систему обеих электронных линз, и, кроме того, напряжение на первом аноде гораздо ниже, чем на втором.

Следует иметь в виду, что только условно можно говорить о фокусировке электронного луча в точке. Учитывая отталкивание электронов между собой и целый ряд дополнительных факторов, связанных с электронной системой, фактически получаем светящуюся поверхность. Но из-за малой площади этой поверхности она воспринимается глазом, как светящаяся точка.

МОДУЛЯЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРУБКИ

Как уже отмечалось, основное назначение данного типа электронно-лучевых трубок — преобразование электрического тока в видимое изображение. Яркость светящейся точки на экране зависит от плотности тока луча и напряжения на втором аноде. Ток луча в трубке, как в электронных лампах, регулируется при измененных анодных напряжениях изменением напряжения на управляемым анодом — модуляторе. Зависимость $I_a = f(U_{\text{mod}})$ при $U_{a1} = U_{a2} = \text{const}$ называют *модуляционной характеристикой* трубы (рис. 7.3). Эта характеристика напоминает анодно-сеточную характеристику электронной лампы.

При определенном отрицательном напряжении на модуляторе по отношению к катоду трубка заперта, ток луча равен нулю, экран затемнен. При уменьшении отрицательного напряжения на модуляторе результирующее поле у катода становится ускоряющим и появляется ток луча, экран начинает светиться. Чем меньше отрицательное напряжение на модуляторе, тем ярче светится экран.

Модуляционная характеристика позволяет определить пределы изменения напряжения, которое подается на модулятор для управления яркостью экрана и получения необходимого изображения. Нижний предел, естественно, — напряжение запирания. Наличие верхнего предела связано с тем обстоятельством, что модулятор входит в систему первой линзы, и при напряжениях на нем, близких к нулю, наступает расфокусировка луча.

С другой стороны, изменение напряжения на анодах, особенно на первом, при фокусировке влияет на ток луча, а следовательно, и на яркость. Это явление объясняется также, как и в электронных лампах. Чтобы устранить влияние напряжения U_{mod} на фокусировку и влияние напряжения U_a на ток луча, между модулятором и первым анодом помещают дополнительный ускоряющий электрод УЭ, который (см. рис. 7.1) играет ту же роль, что экранная сетка в электронной лампе, т. е. является электрическим

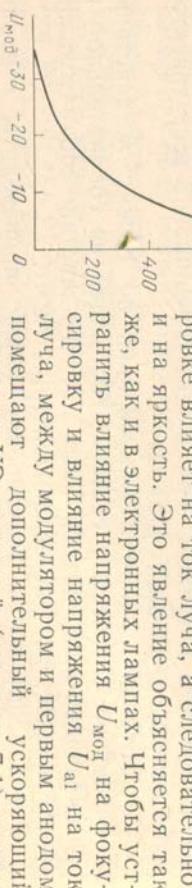


Рис. 7.3. Модуляционная характеристика электронно-лучевой трубы

экраном между модулятором и первым анодом. Ускоряющий электрод имеет более высокий положительный потенциал, чем первый анод, благодаря чему происходит увеличение скорости электронов, и, следовательно, при изменении яркости, т. е. при изменении напряжения на модуляторе, не происходит расфокусировка луча. Так как прямое измерение тока луча затруднительно, то обычно в качестве модуляционной характеристики берется зависимость $I_{a2} = f(U_{\text{mod}})$, где I_{a2} — ток вторичных электронов экрана, притянутых ко второму аноду. Этот ток практически можно считать пропорциональным току луча.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОТКЛОНЕНИЯ ЛУЧА

Для того чтобы электронный луч вычерчивал на экране требуемое изображение, он должен перемещаться в определенной последовательности как по горизонтали, так и по вертикали. Для управления перемещением луча на экране служит система отклонения или развертки.

Система электростатического отклонения состоит из двух взаимно перпендикулярных пар отклоняющих пластин — одной пары Y , осуществляющей вертикальное отклонение луча, другой X , осуществляющей горизонтальное (см. рис. 7.1).

В отсутствие потенциалов на пластинах или при равенстве их сфокусированный луч создаст неподвижную светящуюся точку в центре экрана (см. рис. 7.1). Если потенциалы пластин неодинаковы, то между ними создается электрическое поле и электронный луч, имеющий отрицательный заряд, отклонится в сторону положительно заряженной пластины, прочертит на экране соответствующую линию. При переносе полярности напряжения на пластинах луч отклонится в противоположную сторону. Обе пары взаимно перпендикулярно расположенных пластин под действием приложенного к ним напряжения позволяют перемещать луч в любую точку экрана.

Рассмотрим действие отклоняющего напряжения на электрон, движущийся между одной парой пластин, например, вертикального отклонения. На этот электрон действуют ускоряющее поле продольного перемещения к экрану и поперечное электрическое поле отклонения. Подобно камню, брошенному горизонтально, электрон начнет перемещаться по параболе, отклоняясь на экране в требуемую сторону (рис. 7.4).

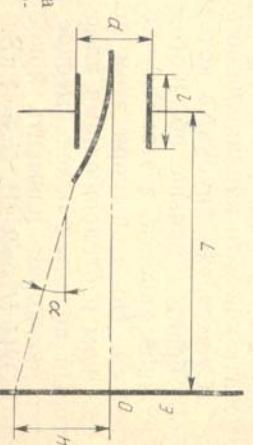


Рис. 7.4. Отклонение электронного луча с помощью электрического поля отклоняющих пластин

Математический анализ движения луча позволяет получить следующую формулу для определения величины отклонения:

$$h = \frac{U_{\text{откл}} l L}{2 U_{a2} d} \quad (7.1)$$

Отклонение луча h прямо пропорционально напряжению на отклоняющих пластинках $U_{\text{откл}}$, длине пластин l , так как чем длинее пластины, тем длительней воздействие напряжения $U_{\text{откл}}$ на электронов луча, расстоянию L между пластинами и экраном, так как с увеличением L луч отклонится на большее расстояние при том же угле отклонения.

Отклонение луча h обратно пропорционально расстоянию между пластинами d , с уменьшением расстояния d возрастает напряженность электрического поля отклонения, а также напряжению U_{a2} , так как при возрастании U_{a2} увеличивается скорость движения электронов луча и меньше времени луч будет находиться под воздействием отклоняющего напряжения.

Важным параметром трубы является ее чувствительность (в миллиметрах на вольт)

$$h_0 = \frac{h}{U_{\text{откл}}} = \frac{lL}{2U_{a2}d} \quad (7.2)$$

Чувствительность трубы характеризует возможность ее отклоняющей системы получить заметное отклонение луча при небольших изменениях отклоняющего напряжения.

Из (7.2) видно, что для повышения чувствительности требуется: увеличивать длину пластин; уменьшать расстояние между ними; однако при уменьшении расстояния между пластинами возникает опасность попадания луча непосредственно на пластины, поэтому пластины делают с отогнутыми со стороны экрана краями (см. рис. 7.1); увеличивать расстояние между пластинами и экраном, но это приведет к увеличению габаритных размеров трубы, что нежелательно, при прочих равных условиях та пара пластин, что дальше от экрана, больше влияет на чувствительность; уменьшать напряжение U_{a2} , однако это приведет к уменьшению производительной скорости электрона, а следовательно, и к уменьшению его энергии, а значит, и яркости свечения экрана.

Таким образом, повышение чувствительности трубы связано с ухудшением других ее параметров. В таких случаях приходится либо идти на компромисс, выбирая усредненные показатели, либо искать какое-то кардинальное решение проблемы.

Существуют трубы, в которых это противоречие решают так: U_{a2} берется меньше обычного, которое требуется для получения нужной яркости, в этом случае чувствительность трубы увеличивается. Но чтобы при этом получить заданную яркость, между экраном и отклоняющими пластинами ставят третий анод, на который подается более высокое напряжение, чем на второй анод, что позволяет повысить яркость свечения. Например, в трубке 10ЛОИИ $U_{a2}=2$ кВ, $U_{a3}=4$ кВ.

- Выводы.**
1. С помощью электронно-лучевых трубок электрические сигналы преобразуются в видимое изображение.
 2. Система электростатической фокусировки содержит две электронные линзы, которые позволяют свести электроны луча в точку на поверхности экрана.
 3. Система электростатического отклонения луча состоит из двух пар пластин, к которым подводится напряжение, позволяющее отклонять луч как по вертикали, так и по горизонтали.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните принцип преобразования электрической энергии луча в видимое изображение.
2. Как регулируется яркость свечения на экране?
3. Почему изображение на экране становится расплывчатым при расфокусировке луча?
4. Как влияет на изображение на экране уменьшение напряжения на втором аноде?
5. Как и почему влияет на чувствительность трубы длина отклоняющихся пластин?
6. Какова роль ускоряющего электрода между модулятором и первым анодом в трубке?

7.3. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ С МАГНИТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Ранее уже отмечалось, что для управления лучом в трубке используют как электрическое, так и магнитное поле.

Магнитное управление электронным лучом производится с помощью катушек, через витки которых пропускается ток, управляющий движением луча.

В отличие от системы электростатического управления, расположенной внутри самой трубы, катушки магнитной фокусировки и отклонения расположены вне трубы, на ее горловине. Для того чтобы повысить воздействие магнитного поля на электронный

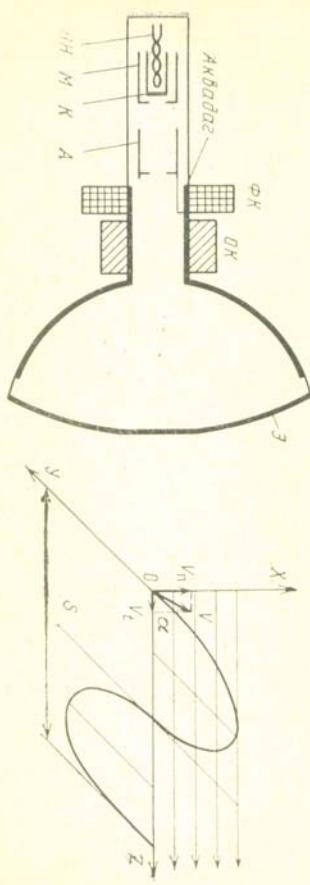


Рис. 7.5. Устройство электронно-лучевой трубы с магнитным отклонением

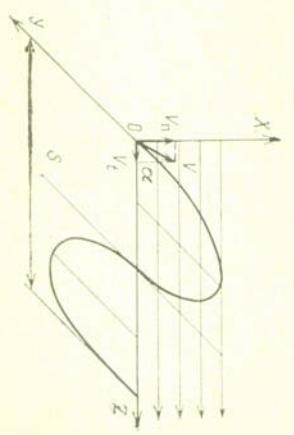


Рис. 7.6. Кривая движения электрона в магнитном поле