

УДК 53

Исследование электронных ламп диода и триода, Лабораторная работа  
/Горьковский государственный университет. 1988, стр. 14/

Описание к лабораторной работе предназначено для студентов второго курса радиофизического факультета, выполняющих работы общего физического практикума в лаборатории кафедры общей физики. Содержит краткое описание устройства вакуумного диода и триода, методику снятия их характеристик и определение основных параметров, а также работу простейшего усилителя электрических сигналов на триоде.

Печатается по решению Совета радиофизического факультета ГГУ

Составители: доцент Черемухин А.М.

ст. инженер Королев И.Я.

Рецензенты: зав кафедрой физики ГИИВТ,

профессор Яшин Ю.Я.

доцент кафедры радиотехники ГГУ

Силин А.В.

- 3 -

В настоящей работе Вам предстоит познакомиться с работой простейших электронных ламп - диода и триода. Необходимо отметить, что хотя современные радиоэлектронные приборы создаются на элементной базе, основанной почти исключительно на полупроводниковой технологии, в последнее время вновь появился интерес именно к электронным лампам. Это связано, в частности, с тем, что с помощью электронных ламп можно изготовить усилители низкой частоты, которые по сравнению с полупроводниковыми усилителями, работающими на такие же по классу акустические системы, обладают более естественным звучанием.

### Д И О Д

Конструктивно диод состоит из баллона (стеклянного, металло-стеклянного, керамического), в котором создается вакуум  $\sim 10^{-7}$  мм ртутного столба, и системы плоских или цилиндрических электродов: катода и анода.

Катод в простейшем случае представляет собой накаливаемую током вольфрамовую нить, которая при достаточно высокой температуре начинает испускать электроны (это явление получило название термоэлектронной эмиссии). Но такие прямоканальные катоды применяются очень редко; значительно большее распространение получили катоды с косвенным подогревом, где источником электронов служит эмиттер, электрически изолированный от вольфрамового подогревателя. Преимуществом таких катодов является возможность питания подогревателя переменным током (вследствие достаточно большой инерционности всей системы) и эквипотенциальность поверхности эмиттера. Эмиттеры таких катодов часто покрываются оксидной пленкой из материалов, имеющих малую работу выхода электронов, что позволяет получить хорошую эмиссию при сравнительно небольшом подогреве.

Если соединить анод с катодом через чувствительный гальванометр, то можно обнаружить в этой цепи анодный ток, величина

которого невелика, так как вылетевшие из катода электроны создают вокруг него отрицательный пространственный заряд. Преодолеть отталкивающее действие пространственного заряда могут лишь немногие электроны, обладающие большой кинетической энергией; электроны же, имеющие недостаточную кинетическую энергию, возвращаются на катод. Для получения в диоде большого тока нужно скомпенсировать действие пространственного заряда, создав между анодом и катодом электрическое поле, которое ускорило бы электроны в их движении от катода к аноду. Для этого между анодом и катодом нужно включить источник постоянного напряжения  $E_a$  и в цепь катода - источник накала  $E_n$ , как показано на рис.1.

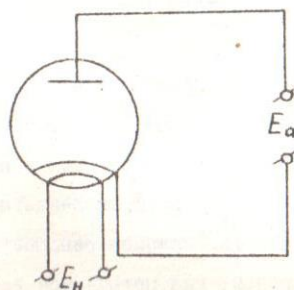


Рис.1

Анодный ток тем больше, чем сильнее поле между анодом и катодом, т.е. чем больше напряжение источника  $E_a$ . При некотором значении этого напряжения пространственного заряда в диоде не будет; все электроны, излученные катодом, достигнут анода, и дальнейшее увеличение анодного напряжения уже не будет вызывать увеличения тока (так называемый режим насыщения).

У электронных ламп с оксидным катодом насыщения анодного тока нет (рис.2, пунктир) вплоть до полей, разрывающих катод.

Если изменить полярность анодного источника (т.е. подклю-

чить его минусом к аноду, а плюсом к катоду), то ток через лампу естественно, протекать не будет. Таким образом, диод обладает односторонней проводимостью, что позволяет использовать его в качестве выпрямителя переменного тока (такие диоды называются кенотронами), детекторов в радиоприемниках и т.д.

При постоянной температуре катода величина анодного тока диода зависит только от анодного напряжения. Функция, выражающая зависимость анодного тока от анодного напряжения, называется анодной характеристикой лампы.

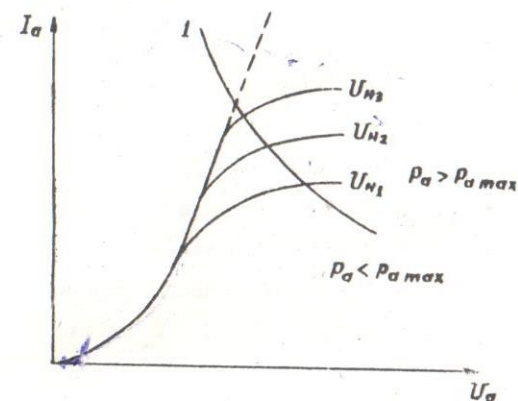


Рис.2

На рис.2 приведено семейство анодных характеристик диода, снятых для трех напряжений накала  $U_{n1}$ ,  $U_{n2}$  и  $U_{n3}$ . Ток насыщения пропорционален количеству электронов, излученных катодом, и при различных температурах катода он будет тем больше, чем выше эта температура, т.е. чем больше напряжение накала. На рис.2  $U_{n1} < U_{n2} < U_{n3}$ .

При прохождении тока через диод в нем, как и в обычном резисторе (хотя, конечно, полной аналогии с резистором тут нет, т.к. сопротивление диода существенно нелинейно) будет рассеиваться



определенная электрическая мощность. Электроны, излучаемые катодом, увеличивают свою кинетическую энергию за счет энергии электрического поля. При ударе об анод электрон отдает ему свою энергию. Энергия электронов выделяется на аноде в виде тепловой энергии и излучается им в окружающее пространство. С повышением анодного напряжения увеличивается количество достигших анода электронов, их скорость и кинетическая энергия, и, следовательно, возрастает и мощность, рассеиваемая анодом. Для каждого типа лампы существует максимальная допустимая величина этой мощности -  $P_{amax}$ . Превышение ее при работе лампы может вывести последнюю из строя. Величину мощности, рассеиваемой анодом, можно подсчитать по формуле

$$P_a = U_a I_a$$

Уравнение  $P_{amax} = U_a I_a = \text{const}$  на плоскости  $U_a$ ,  $I_a$  изображается гиперболой, асимптотами которой являются координатные оси. На рис. 2 эта кривая отмечена индексом "1". Чтобы лампа не вышла из строя, всегда надо следить за тем, чтобы при работе с ней не превышать максимально допустимой мощности, рассеиваемой анодом, т.е. работать только в области  $P_a < P_{amax}$ . Для каждого типа лампы величина  $P_{amax}$  определяется конструкцией электродов и их геометрическими размерами. У очень мощных ламп для повышения этой мощности приходится применять меры принудительного охлаждения анода (водяное и воздушное охлаждение).

Функция, выражающая зависимость анодного тока диода от величины напряжения накала  $I_a = f(U_n)$ , называется температурной характеристикой диода. По ней можно судить об эмиссионной способности катода, о возникновении и исчезновении пространственного заряда между катодом и анодом лампы. Для каждого типа лампы существует нормальное напряжение накала, величину которого нельзя превышать.

Представление о работе диода можно составить и не зная его

характеристик, если известны параметры диода: крутизна вольт-амперной характеристики  $S = \frac{dI_a}{dU_a}$ , измеряемая обычно в мв/в, или обратная ей величина - внутреннее сопротивление  $R_i = \frac{1}{S}$ . Т.к. характеристика диода существенно нелинейна, то эти дифференциальные параметры зависят от значений  $I_a$  и  $U_a$ , т.е.

$S = f(U_a)$ . На практике приближенное значение крутизны можно определить по вольт-амперной характеристике. Возьмем небольшое приращение анодного напряжения  $\Delta U_a$  так, чтобы в этих пределах участок анодной характеристики можно считать линейным, по характеристике определим приращение тока  $\Delta I_a$ . И тогда  $S \approx \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}$ .

## 2. ТРИОД

У триода помимо катода и анода имеется еще один электрод - управляющая сетка, расположенная вблизи катода между катодом и анодом. Конструктивно сетка выполняется в виде металлической проволоочной спирали. Изменение потенциала сетки по отношению к катоду изменяет величину электрического поля между ними. При потенциале сетки  $U_c > 0$  (относительно катода) электрическое поле ускоряет электроны и, следовательно, увеличивает  $I_a$ ; при  $U_c < 0$  поле между сеткой и катодом оказывает тормозящее действие на электроны и уменьшает  $I_a$ . Таким образом наличие сетки в лампе позволяет управлять величиной анодного тока. Обычно используют тормозящее действие сетки, т.е. работают при  $U_c < 0$ , так как при этом сеточный ток отсутствует, и в цепи сетки для управления анодным током не затрачивается никакой мощности.

У триода анодный ток зависит как от напряжения на сетке, так и от напряжения на аноде  $I_a = f(U_c, U_a)$ . Эта зависимость (при постоянной температуре катода  $T_n = \text{const}$ ) изображается обычно в виде двух семейств статических характеристик (статическими они называются потому, что снимаются на постоянном токе)

$I_a = f_1(U_c)_{U_a = \text{const}}$  - статические анодно-сеточные характеристики, которые представлены на рис.3 и  $I_a = f_2(U_a)_{U_c = \text{const}}$  - статические анодные характеристики, изображенные на рис.4.

При увеличении  $U_a$  анодно-сеточные характеристики смещаются влево. То же происходит с анодными характеристиками при увеличении  $U_c$ .

Анодный ток  $I_a$  меняется нелинейно как с изменением  $U_c$ , так и с изменением  $U_a$ . Параметры  $S = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \left[ \frac{dI_a}{dU_c} \right]_{U_a = \text{const}}$  и  $R_i = \frac{\partial U_a}{\partial I_a} = \left[ \frac{dU_a}{dI_a} \right]_{U_c = \text{const}}$  по аналогии с диодом называются соответственно крутизной и внутренним сопротивлением триода.

Крутизна характеристики графически может быть определена как тангенс угла наклона касательной к сеточной характеристике в данной точке. Из-за нелинейности сеточной характеристики значение крутизны в каждой точке характеристики различно.

У существующих триодов  $S$  порядка нескольких десятков ма/в.

Внутреннее сопротивление графически может быть определено как котангенс угла наклона касательной к анодной характеристике в рабочей точке. У триода  $R_i$  принимает значения от нескольких единиц до нескольких десятков килоом. Практически значения  $S$  и  $R_i$  могут быть приближенно определены, как и для диода, через соответствующие приращения.

Параметры  $S$  и  $R_i$  изменяются в зависимости от действующих напряжений на электродах триода. Найдем связь между этими параметрами, вычисляя полный дифференциал функции  $I_a = f(U_c, U_a)$

$$dI_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} dU_c + \frac{\partial I_a}{\partial U_a} dU_a.$$

Если  $U_c$  и  $U_a$  изменять так, чтобы анодный ток  $I_a$  оставался постоянным, т.е. ( $dI_a = 0$ ), то учитывая, что изменения сеточного и анодного напряжений при этом различного знака, получим

$$0 = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} dU_c + \frac{\partial I_a}{\partial U_a} \left[ \frac{dU_a}{dU_c} \right]_{I_a = \text{const}}$$

или  $S = \frac{1}{R_i} M$ , где  $M = \left[ \frac{dU_c}{dU_a} \right]_{I_a = \text{const}}$  - статический коэффи-

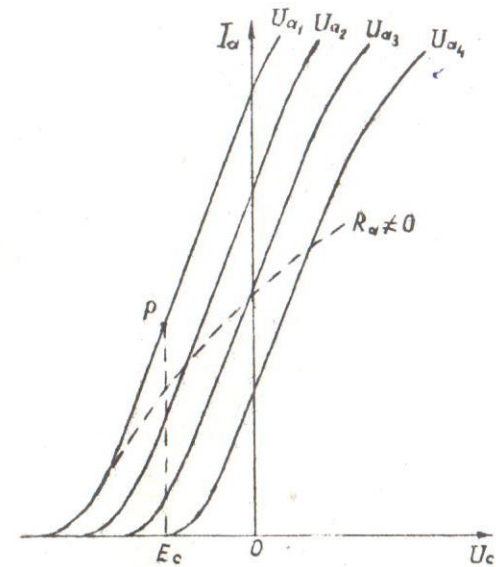


Рис. 3

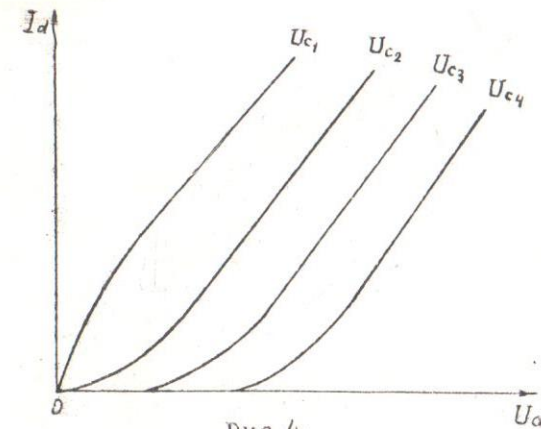


Рис. 4



циент усиления — величина, показывающая во сколько раз действие на анодный ток приращения  $U_c$  эффективнее действия такого же приращения  $U_a$ .

Величина, обратная коэффициенту усиления, которой удобно пользоваться в некоторых случаях, носит название проницаемости лампы и обозначается буквой  $D$ :  $D = 1/\mu$ .

Таким образом, используя соотношения  $SR_i = \mu$  или  $SR_i D = 1$ , по двум известным параметрам всегда можно найти третий. Эти соотношения справедливы не только для триодов, но и для более сложных электронных ламп, имеющих большое количество электродов.

Триод в режиме усиления

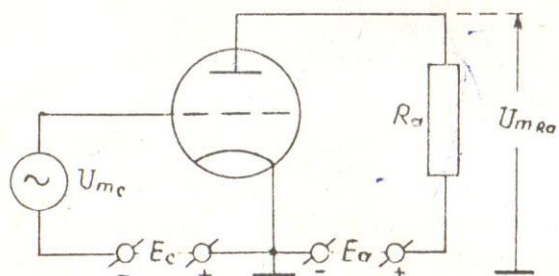


Рис. 5

Из-за того, что сетка гораздо ближе к катоду, чем анод, управляющее действие ее на поток электронов сильнее. Если между сеткой и катодом приложено переменное напряжение, а в анодную цепь лампы включено сопротивление, то анодный ток будет меняться, следуя за изменением напряжения на сетке. Изменение анодного тока приводят к изменению напряжения на сопротивлении в анодной цепи. Таким образом, меняя напряжение на сетке, можно управлять мощностью, выделяемой в анодной цепи, не расходуя никакой энергии в сеточной цепи (если, конечно, мгновенное значение сеточного напряжения всегда отрицательно). Источником энергии при этом является

анодная батарея. Это свойство триода позволяет использовать его для усиления и для генерации электрических колебаний.

Упрощенная схема усилительного каскада приведена на рис. 5. Источник  $E_c$  носит название источника сеточного смещения и служит для задания так называемой рабочей точки на анодно-сеточной характеристике (точка  $P$  на рис. 3). Необходимо отметить, что анодно-сеточная характеристика при  $R_a \neq 0$  будет отличаться от статической анодно-сеточной характеристики, т.к. при изменении будет меняться напряжение на аноде лампы ( $U_a = E_a - I_a R_a$ ). Такая характеристика, называемая динамической, показана на рис. 3 пунктиром.

Как и в статическом режиме, управляющее действие сетки при работе лампы с нагрузкой характеризуется крутизной

$$S_H = \frac{dI_a}{dU_c},$$

но в отличие от статической эта крутизна определяется при изменяющемся напряжении на аноде. Нетрудно показать, что динамическая крутизна связана со статической соотношением

$$S_H = \frac{S}{1 + R_a/R_i}.$$

Усиление сигнала, обеспечиваемое лампой, характеризуется динамическим коэффициентом усиления  $K$ , равным отношению амплитуды переменного напряжения на сопротивлении нагрузки  $U_{ma}$  к амплитуде напряжения на сетке  $U_{mc}$ :

$$K = \frac{U_{ma}}{U_{mc}}.$$

Выразим его через статические параметры лампы. Для этой цели запишем коэффициент усиления в виде

$$K = \frac{dU_a}{dU_c},$$

заменив амплитуды бесконечно малыми приращениями, что в линейном режиме допустимо и учитывая также, что  $dU_a = R_a dI_a$ , получим

$$K = \frac{R_a dI_a}{dU_c} = R_a S_n = \frac{R_a S}{1 + R_a/R_i} = \frac{\mu}{1 + R_i/R_a},$$

из этой формулы следует, что динамический коэффициент усиления тем больше, чем больше  $R_a$  и  $K-\mu$  при  $R_a \rightarrow \infty$ . На практике же при больших значениях  $R_a/R_i$  дальнейшее увеличение  $R_a$  может не дать никакого роста  $K$ . Дело в том, что увеличение  $R_a$  при постоянном  $E_a$  приводит к смещению рабочей точки на динамической анодно-сеточной характеристике ближе к основанию, где  $R_i$  возрастает, а  $\mu$  уменьшается. Практически в усилителях на триодах  $R_a/R_i$  лежит в пределах 2-5.

С ростом частоты усиливаемого сигнала усилительные свойства триода ухудшаются. Это связано, в основном, с влиянием междупроводных емкостей и индуктивностей вводов лампы. Особенно сильное влияние на частотные свойства триода оказывает емкость между сеткой и анодом, которую называют проходной емкостью  $C_{ac}$ . В курсе электроники доказывается, что предельная частота, до которой триод может быть использован как усилитель при заданном коэффициенте усиления  $K$ , определяется выражением:

$$f_{np} = 25 \frac{S}{K^2 C_{ac}}, \text{ МГц (} S \text{ в } \frac{\text{мА}}{\text{В}}, C_{ac} \text{ в пФ)}.$$

### З а д а н и е

Внимательно ознакомьтесь с экспериментальной установкой. Снятие статических характеристик производится при помощи схемы, изображенной на рис. 6.

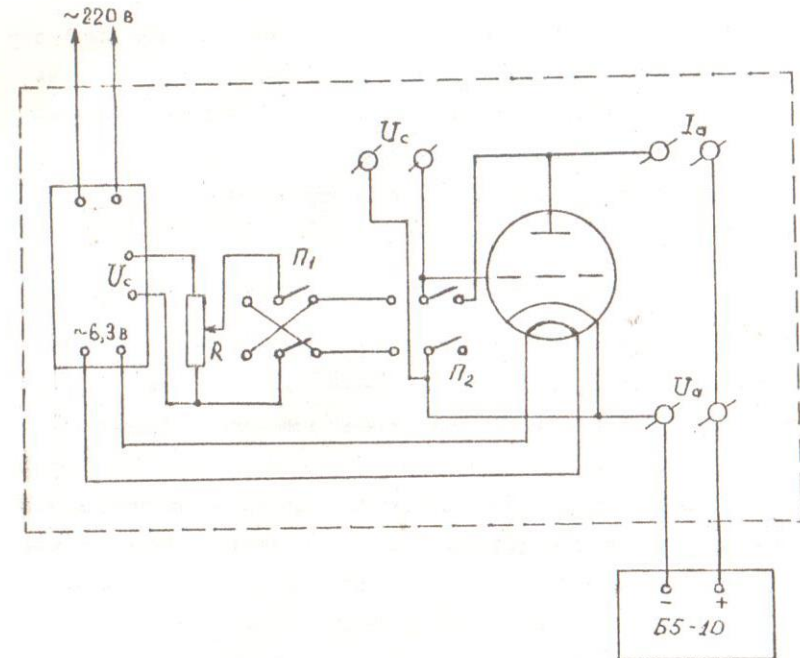


рис. 6

В качестве исследуемой лампы используется одна половина двойного триода 6Н8С. Соединение управляющей сетки с анодом позволяет использовать эту же лампу в качестве диода.

Схема для исследования работы триода в режиме усиления собрана внутри установки. На корпус выведены лишь разъемы "вход" и "выход" и тумблер, с помощью которого подается анодное напряжение на лампу. Сопротивление нагрузки меняется скачком с помощью переключателя.



### Снятие статической характеристики диода

Подключите к соответствующим клеммам на установке вольтметр и миллиамперметр и подайте напряжение на лампу (вначале накальное, а затем анодное). Меняя величину  $U_a$  для каждого ее конкретного значения считывайте величину  $I_a$ . По полученным данным постройте соответствующую характеристику и вычислите крутизну в нескольких точках характеристики.

### Снятие статических характеристик триода

Прежде, чем приступить к снятию характеристик, вычертите на графике гиперболу  $P_{атм} = U_a I_a = \text{const}$  и при снятии характеристик строго следите, чтобы рассеиваемая мощность не превышала предельную допустимую для данной лампы.

Снимите семейство анодных характеристик при нескольких значениях сеточного напряжения, начиная от величин этого напряжения минус 15 в до плюс 5 в (но не выше!).

Аналогичным образом снимите семейство сеточных характеристик при нескольких значениях анодного напряжения. Напряжение на сетке меняйте таким образом, чтобы в одном крайнем положении лампа запырлась, а в другом - анодный ток был бы такой величины, чтобы мощность, рассеиваемая анодом была бы несколько меньше максимально допустимой. Для средних участков характеристик вычислите параметры  $S$ ,  $R_i$  и  $\mu$ .

### Определение коэффициента усиления усилителя

С выхода генератора ГЗ-112 подайте на вход осциллографа сигнал с частотой  $f \sim 1$  кГц и амплитудой  $\sim 100$  мВ.

Далее подключите этот сигнал к гнезду "вход" усилителя, а на осциллограф подайте сигнал с гнезда "выход". Определив по осциллограмме амплитуду выходного сигнала, вычислите величину  $K$ .

Проверьте частотные свойства усилителя, для чего снимите зависимость коэффициента усиления от частоты. Определите частоту, на которой коэффициент усиления уменьшается в 2 раза.

Вычисления  $K$  проводите последовательно для всех возможных значений сопротивления нагрузки  $R_a$ . Проверьте, выполняется ли соотношение

$$K = \frac{\mu}{1 + R_i/R_a}$$

Если указанное соотношение не выполняется, то объясните, чем это может быть вызвано.

### В о п р о с ы

1. Объясните качественно ход анодной характеристики лампы, включенной диодом.
2. Пренебрегая начальной скоростью вылета электронов из катода и считая поле между анодом и катодом однородным, а анодное напряжение заданным, найти скорость электронов у поверхности анода и время пролета электроном расстояния между катодом и анодом.
3. Каков будет анодный ток триода, если его сетку оставить никуда не подключенной?
4. Каков будет характер движения электронов, если на сетку подать большой положительный потенциал, а на анод небольшой отрицательный по отношению к катоду?
5. В чем отличие внутреннего сопротивления триода от его сопротивления постоянному току?
6. Чем определяются частотные свойства триода?