

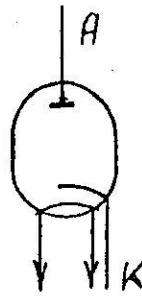
ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ЛАМПЫ

/Вакуум  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  Па/ (Кушманов)

Различают выпрямительные /кинотроны/, генераторные, усилительные, частотно-преобразовательные - по назначению.

Низкочастотные / $10^3$  Гц/, высокочастотные / $10^6$  Гц/, СВЧ - по диапазону.

ДИОД



Устройство двухэлектродной лампы, или высоковакуумного диода, показано на рис. 8.1. В герметичный баллон, в котором создан высокий вакуум \*, помещены два электрода — катод и анод. Катод в простейшем виде представляет собой тонкую металлическую нить, нагреваемую электрическим током. При высокой температуре электроны в металле имеют значительную энергию теплового движения, поэтому часть их, преодолевая силы притяжения к металлу, вылетает из него — возникает термоэлектронная эмиссия.

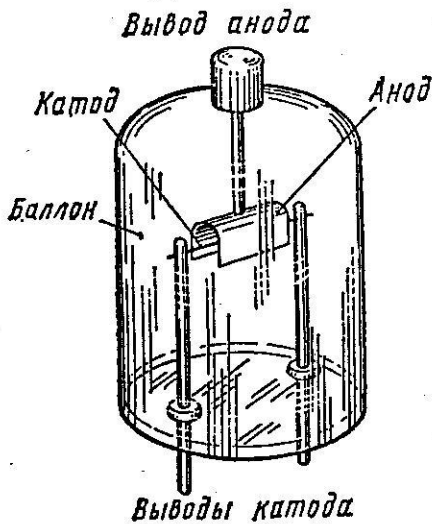


Рис. 8.1

При положительном относительно катода потенциале анода  $U_a$  в междуэлектродном пространстве лампы создается электрическое поле, ускоряющее движение электронов, эмиттируемых катодом, к аноду. В цепи анода возникает электрический ток  $I_a$ , называемый анодным. При отрицательном потенциале анода электрическое поле тормозит испускаемые электроны и возвращает их обратно на катод. В результате анодный ток оказывается равным нулю.

Таким образом, характерным свойством диода является односторонняя проводимость, что широко используют для выпрямления переменного тока и преобразования высокочастотных колебаний.

(Кушманов, Батушев) 164 → 155

## ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ И ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

*Электровакuumный прибор* называется устройство, в котором рабочее пространство, изолированное газонепроницаемой оболочкой (баллоном), имеет высокую степень разрежения или заполнено специальной средой (парами или газами) и действие которого основано на электрических явлениях, связанных с движением заряженных частиц в вакууме или газе.

Классификация.

*Электронные*  
I. Электровакuumные.

II. Ионные.

В соответствии с характером рабочей среды электровакuumные приборы подразделяются на электронные и ионные (газоразрядные).

В I классе используются явления поведения электрона в вакууме под действием напряжения.

*Электронный электровакuumный прибор* (ЭВП) — это прибор, в котором электрический ток обусловлен движением только свободных электронов в вакууме.

Семейство электронных вакуумных приборов весьма обширно и объединяет такие группы приборов, как электронные лампы, электронно-лучевые приборы, электровакuumные фотоэлектронные приборы и др.

Электровакuumные приборы:

1/ Лампы /2<sup>A</sup>, 3<sup>A</sup> ... многоэлектродные/.

2/ Электронно-лучевые приборы /осциллографические трубки, радиолокационные трубки, кинескопы/.

3/ Фотоэлектронные приборы /фотодиод; фотоэлектронные умножители; электронно-оптические приборы — ЭОП/.

*Ионный электровакuumный прибор* — это прибор, принцип действия которого основан на использовании свойств электрического разряда в газе или парах металлов. Эти приборы называют также газоразрядными (ГРП). К ним относятся газоразрядные приборы дугового, тлеющего, высокочастотного разрядов и др.

Ионные приборы:

Используют самостоятельный и несамостоятельный разряд, тлеющий, дуговой, коронный.

29. X. 9

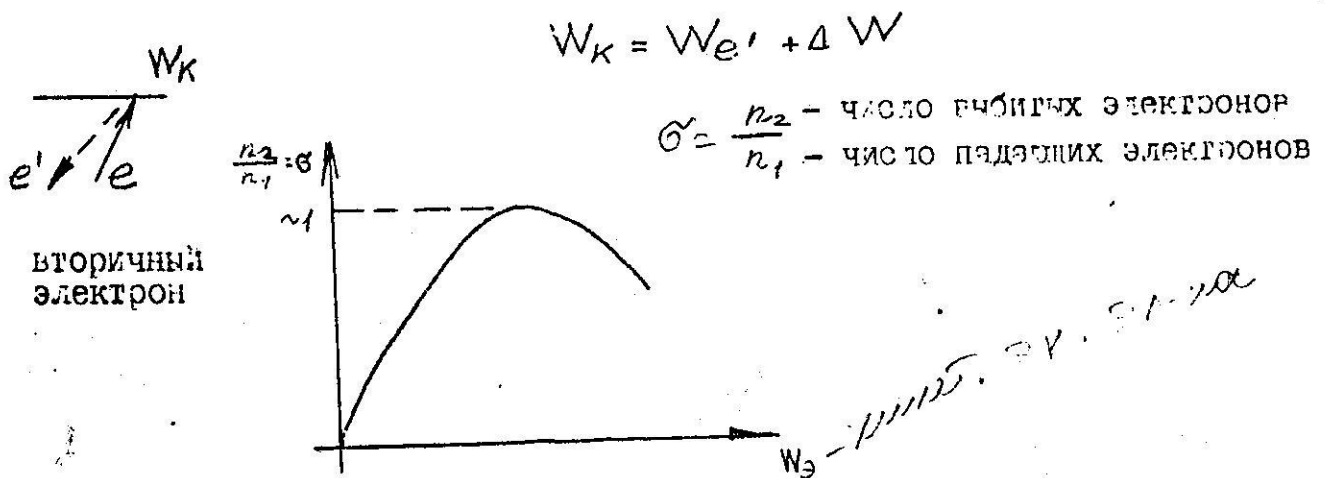
200000  
200000

130

**Электростатическая (автоэлектронная) эмиссия.** Обусловлена сильным электрическим полем, действующим на поверхность катода. При большом положительном относительно катода потенциале электрода, расположенного рядом с катодом, у поверхности последнего происходит значительное понижение энергетического барьера и его толщины. В результате этого уменьшается работа выхода электронов и при некотором значении напряженности электрического поля  $\mathcal{E}$  может возникнуть значительный ток эмиссии за счет туннельного перехода через барьер электронов с поверхности катода во внешнее пространство. Это явление называется электростатической (автоэлектронной) эмиссией. Напряженности электрических полей, необходимые для этого вида эмиссии, должны достигать  $10^6$  В/см и более.

**Вторичная электронная эмиссия.** Происходит при бомбардировке поверхности тела потоками быстрых заряженных частиц. Если используются электронные потоки, то отношение общего числа вторичных, выбитых с поверхности тела электронов  $n_2$  к числу первичных электронов  $n_1$ , попадающих на поверхность тела из электронного потока, называют *коэффициентом вторичной эмиссии*  $\sigma$ . Для большинства металлов и полупроводников максимальное значение  $\sigma \approx 1$ . У сложных соединений, включающих элементы с малой работой выхода,  $\sigma$  может достигать нескольких единиц.

Вторичная электронная эмиссия — при ударе поверхности металла потоком электронов за счет неупругого удара возникает поток вторичных электронов, направленный в обратную сторону.



Зависит связан с глубоким проникновением падающего электрона в поверхность, где он визнет, коэффициент размножения падает.

Фотоэлектронная эмиссия — если  $h\nu > W_0$ , наступит эмиссия.

Различают:

I/ по типу катода:

а/ катод прямого накала;

б/ с косвенным накалом

/с подогревом/

а/ - эмиссия непосредственно с электрода накальная нить, к нити подается накальное напряжение.

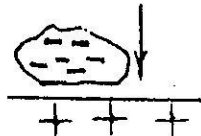
б/ - катод нагревается накальной нитью.

Электронная эмиссия:

Испускание электронов твердым телом называется *эмиссией* и осуществляется путем подведения к телу энергии от внешнего источника.

*Виды эмиссии*

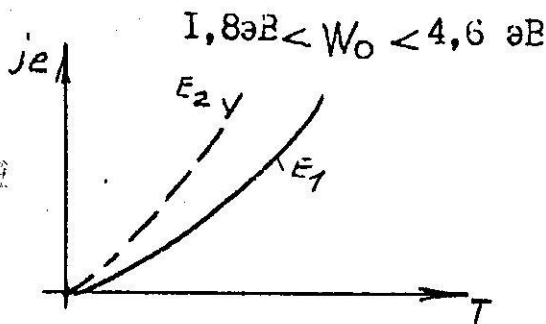
Термоэлектронная - процесс выхода электронов с поверхности металла под действием температуры. Условие  $W_3 > W_0$ .  $W_0$  - работа выхода /разность энергетических уровней свободного и поверхностного электрона/;  $W_3$  - кинетическая энергия электрона. При нагреве формируется двойной поверхностный заряд, образуемый вылетающими электронами и оставшимися ионами. Электрон испытывает притяжение от иона на поверхности.



Эмиссионный ток:

$$j_e = AT^2 e^{-\frac{W_0}{kT}}$$

A - константа, зависит от поверхности, сечения, структуры.



E - напряженность поля вблизи катода.

С увеличением напряженности стремится уменьшить потенциальный барьер,

если E - ускор. /уменьшается  $W_0$ /. *Handwritten notes and scribbles at the bottom of the page.*

# СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА

(Кушманов)

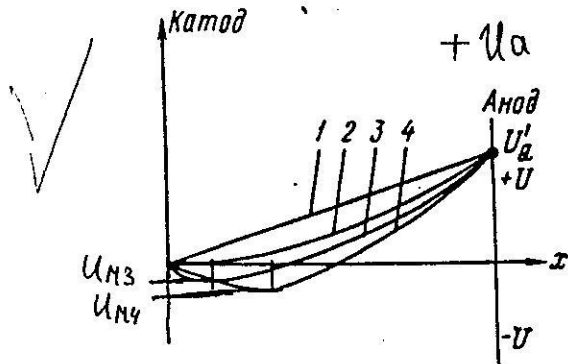
Статической характеристикой диода называется зависимость между действующими в диоде токами и напряжениями, соответствующими статическому режиму. Статическая характеристика может выражаться аналитически или графически. Различают индивидуальные и усредненные статические характеристики. Индивидуальная статическая характеристика соответствует режиму работы одного индивидуального прибора, а усредненная — среднему значению большого числа индивидуальных характеристик. Отклонение точек индивидуальных характеристик от усредненных не должно превышать 10—20%.

Анодный ток в диоде однозначно определяется анодным напряжением и напряжением накала  $I_a = \Phi(U_n, U_a)$ . Для графического изображения этой характеристики требуется трехмерное пространство, что неудобно на практике. Поэтому общую зависимость разбивают на две частные:

- $I_a = \Phi_1(U_n)$  при  $U_a = \text{const}$  — эмиссионная характеристика;
- $I_a = \Phi_2(U_a)$  при  $U_n = \text{const}$  — анодная характеристика;

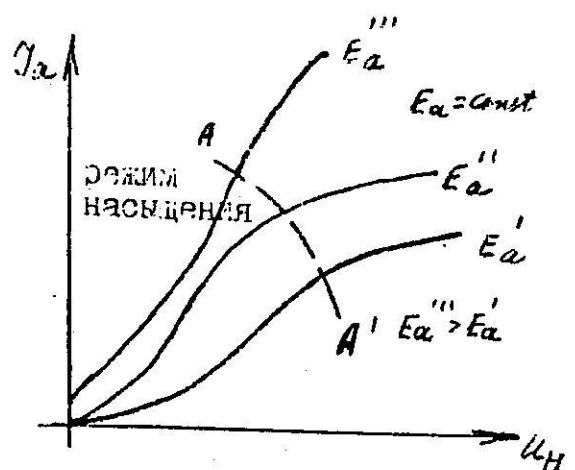
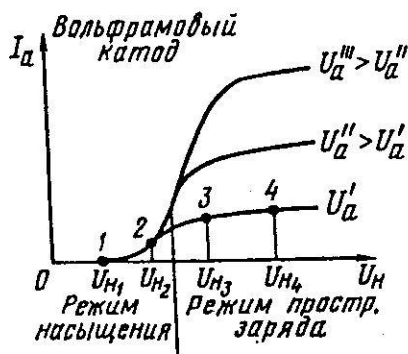
Если определяется не одна, а несколько характеристик при различных постоянных значениях  $U_a$  или  $U_n$ , то такая совокупность характеристик называется семейством.

Статические характеристики диода зависят от распределения потенциала между анодом и катодом



- 1 -  $U_n = 0$
- 2 -  $U_n' > 0$
- 3 -  $U_n'' > U_n'$
- 4 -  $U_n''' > U_n''$

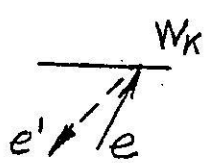
Эмиссионная характеристика диода отражает зависимость анодного тока диода от напряжения накала при постоянном анодном напряжении. Семейство эмиссионных характеристик диода с вольфрамовым катодом  $I_a = \Phi_1(U_n)$  при  $U_a = \text{const}$



**Электростатическая (автоэлектронная) эмиссия.** Обусловлена сильным электрическим полем, действующим на поверхность катода. При большом положительном относительно катода потенциале электрода, расположенного рядом с катодом, у поверхности последнего происходит значительное понижение энергетического барьера и его толшины. В результате этого уменьшается работа выхода электронов и при некотором значении напряженности электрического поля  $E$  может возникнуть значительный ток эмиссии за счет туннельного перехода через барьер электронов с поверхности катода во внешнее пространство. Это явление называется электростатической (автоэлектронной) эмиссией. Напряженности электрических полей, необходимые для этого вида эмиссии, должны достигать  $10^6$  В/см и более.

**Вторичная электронная эмиссия.** Происходит при бомбардировке поверхности тела потоками быстрых заряженных частиц. Если используются электронные потоки, то отношение общего числа вторичных, выбитых с поверхности тела электронов  $n_2$  к числу первичных электронов  $n_1$ , попадающих на поверхность тела из электронного потока, называют коэффициентом вторичной эмиссии  $\sigma$ . Для большинства металлов и полупроводников максимальное значение  $\sigma \approx 1$ . У сложных соединений, включающих элементы с малой работой выхода,  $\sigma$  может достигать нескольких единиц.

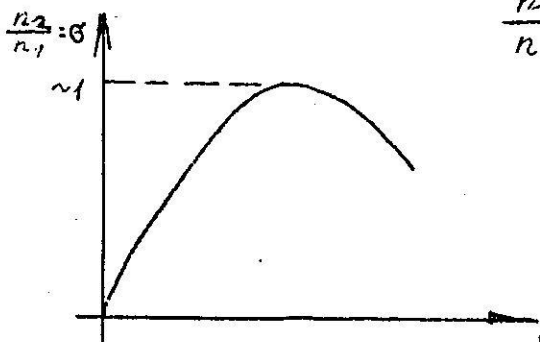
Вторичная электронная эмиссия — при ударе поверхности металла потоком электронов за счет неупругого удара возникает поток вторичных электронов, направленный в обратную сторону.



$$W_k = W_{e'} + \Delta W$$

$\frac{n_2}{n_1}$  — число выбитых электронов  
 $n_1$  — число падающих электронов

вторичный электрон



$W_0$  — работа выхода

Завал связан с глубоким проникновением падающего электрона в поверхность, где он вязнет, коэффициент размножения падает.

Фотоэлектронная эмиссия — если  $(h\nu) > W_0$ , наступает эмиссия.

При  $U_n=0$  катод холодный и эмиссии электронов нет:  $I_a=0$ . Повышение напряжения накала до  $U_{n1}$  приводит к появлению заметного анодного тока. Таким образом, начало характеристики сдвинуто

вправо от начала координат на значительное расстояние. При  $U_{n1}$  ток мал и пространственный заряд электронов существенно не изменяет линейного распределения потенциала  $U_a$  внутри лампы (кривая 1), характерного для плоско-параллельной системы электродов. При  $U_{n2}$  эмиссия электронов возрастает и заряд электронов снижает потенциал в междуэлектродном пространстве (кривая 2). Однако это снижение невелико и результирующее поле на всем протяжении от катода до анода остается для электронов ускоряющим. Все электроны, эмиттированные катодом, попадают на анод. В этом случае имеет место режим насыщения анодного тока.

Режим насыщения наблюдается на восходящем участке характеристики до ее перегиба. Далее режим насыщения переходит в режим пространственного заряда. При  $U_{n3}$  эмиссия электронов значительна и соответственно значительно снижение потенциала внешнего поля (кривая 3)

Этот потенциал является тормозящим для низкоскоростных электронов, и они, не преодолев его, пополняют собою пространственный заряд у катода. Тормозящее поле преодолевают только те электроны, у которых  $\phi > |U_{m3}|$ . Эти электроны, попав в ускоряющее поле, образуют анодный ток, который будет представлять собой часть эмиссионного тока.

Дальнейшее увеличение напряжения накала до значения  $U_{n4}$  существенно увеличивает количество электронов эмиссии, однако анодный ток увеличивается лишь незначительно, так как увеличение термоэлектронной эмиссии приводит к уменьшению потенциала у катода до величины  $U_{m4}$  (кривая 4). Таким образом, благодаря режиму пространственного заряда характеристика идет положительно, анодный ток увеличивается незначительно (несмотря на резкое увеличение температуры катода и термоэлектронной эмиссии). При больших значениях анодного напряжения  $U'_a$  и  $U''_a$  переход режима насыщения в режим пространственного заряда происходит при больших значениях напряжения накала, так как внешнее поле имеет высокий потенциал у катода, который снижается до отрицательного при большом токе термоэлектронной эмиссии.

Анодная характеристика диода отражает зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном напряжении накала. Семейство экспериментальных статических анодных характеристик диода для вольфрамового катода  $I_a = \Phi_2(U_a)$  при  $U_n = \text{const}$ , причем  $U'_n < U''_n < U'''_n$ , изображено на рис. 1.20.

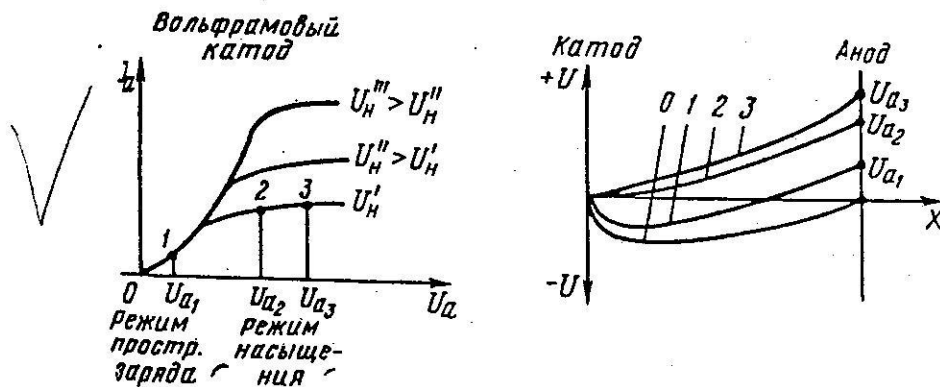


Рис. 1.20. Семейство анодных характеристик диода и его потенциальные диаграммы

При  $U_H = 0$  катод холодный и эмиссии электронов нет:  $I_a = 0$ . Повышение напряжения накала до  $U_{H1}$  приводит к появлению заметного анодного тока. Таким образом, начало характеристики сдвинуто вправо от начала координат на значительное расстояние. При  $U_{H1}$  ток мал и пространственный заряд электронов существенно не изменяет линейного распределения потенциала  $U_a$  внутри лампы (кривая 1), характерного для плоско-параллельной системы электродов. При  $U_{H2}$  эмиссия электронов возрастает и заряд электронов снижает потенциал в междуэлектродном пространстве (кривая 2). Однако это снижение невелико и результирующее поле на всем протяжении от катода до анода остается для электронов ускоряющим. Все электроны, эмиттированные катодом, попадают на анод. В этом случае имеет место режим насыщения анодного тока.

Режим насыщения наблюдается на восходящем участке характеристики до ее перегиба. Далее режим насыщения переходит в режим пространственного заряда. При  $U_{H3}$  эмиссия электронов значительна и соответственно значительно снижение потенциала внешнего поля (кривая 3)

Этот потенциал является тормозящим для низкоскоростных электронов и они, не преодолев его, пополняют собою пространственный заряд у катода. Тормозящее поле преодолевают только те электроны, у которых  $\varphi > |U_{M3}|$ . Эти электроны, попав в ускоряющее поле, образуют анодный ток, который будет представлять собой часть эмиссионного тока.

Дальнейшее увеличение напряжения накала до значения  $U_{H4}$  существенно увеличивает количество электронов эмиссии, однако анодный ток увеличивается лишь незначительно, так как увеличение термоэлектронной эмиссии приводит к уменьшению потенциала у катода до величины  $U_{M4}$  (кривая 4). Таким образом, благодаря режиму пространственного заряда характеристика идет того, анодный ток увеличивается незначительно (несмотря на резкое увеличение температуры катода и термоэлектронной эмиссии). При больших значениях анодного напряжения  $U_a''$  и  $U_a'''$  переход режима насыщения в режим пространственного заряда происходит при больших значениях напряжения накала, так как внешнее поле имеет высокий потенциал у катода, который снижается до отрицательного при большом токе термоэлектронной эмиссии.

Анодная характеристика диода отражает зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном напряжении накала. Семейство экспериментальных статических анодных характеристик диода для вольфрамового катода  $I_a = \Phi_2(U_a)$  при  $U_H = \text{const}$ , причем  $U_H' < U_H'' < U_H'''$ , изображено на рис. 1.20.

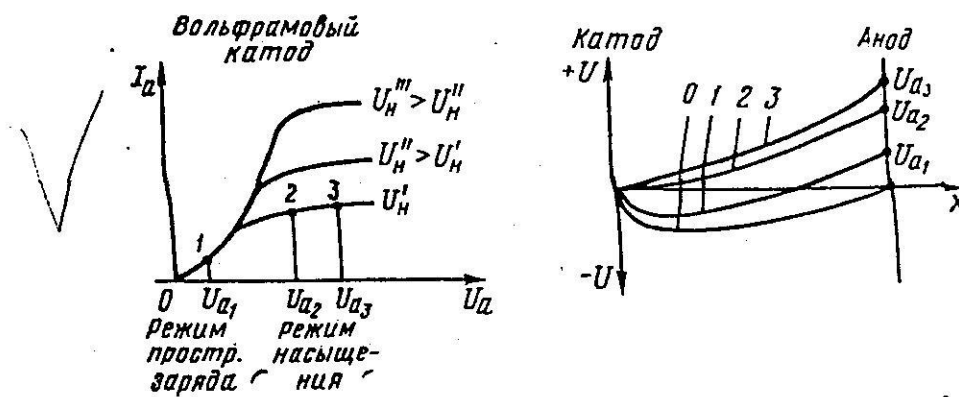
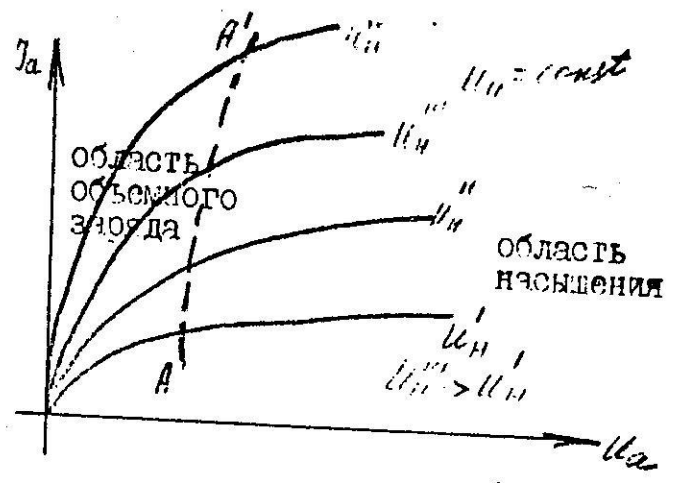


Рис. 1.20. Семейство анодных характеристик диода и его потенциальные диаграммы





Рассмотрим для примера характеристику при  $U'_n$  и потенциальные диаграммы для нескольких точек. При  $U_a=0$  распределение потенциала между электродами будет определяться только пространственным зарядом электронов, покидающих катод (кривая 0). Несмотря на наличие минимума потенциала, часть электронов, вылетающих из катода с большими скоростями, достигнет анода, преодолев этот тормозящий потенциал. Таким образом, при  $U_a=0$  будет существовать небольшой анодный ток. Для прекращения этого тока на анод нужно подать небольшой отрицательный потенциал (доли вольта — несколько вольт). Следовательно, характеристика начинается несколько левее начала координат при небольших отрицательных напряжениях на аноде.

До точки, где характеристика отклоняется, диод работает в режиме пространственного заряда, после этой точки — в режиме насыщения. При  $U_{a1}$  поле анода недостаточно для рассасывания облака электронов у катода (кривая 1 на потенциальной диаграмме). После отклонения характеристики, например, при  $U_{a2}$  потенциальная диаграмма (кривая 2) не имеет минимума, и лампа работает в режиме насыщения. Дальнейшее увеличение анодного напряжения не должно увеличивать анодный ток, так как термоэлектронная эмиссия при постоянном значении  $U'_n$  должна быть постоянной, все электроны в режиме насыщения достигают анода. Однако анодный ток несколько увеличивается, что объясняется увеличением термоэлектронной эмиссии из-за эффекта Шоттки.

**Аппроксимация анодных характеристик.** Для анализа работы диода в электронном устройстве часто требуется приближенное аналитическое выражение его анодной характеристики. Степень приближения зависит от характера поставленной задачи и той точности, с которой она должна быть решена. Иногда требуется приближенное выражение не для всей характеристики, а только для отдельных ее участков. В этом случае задача аппроксимации упрощается.

Иногда уравнение анодного тока диода записывается в виде

$$I_a = g U_a^{3/2}. \tag{1.9}$$

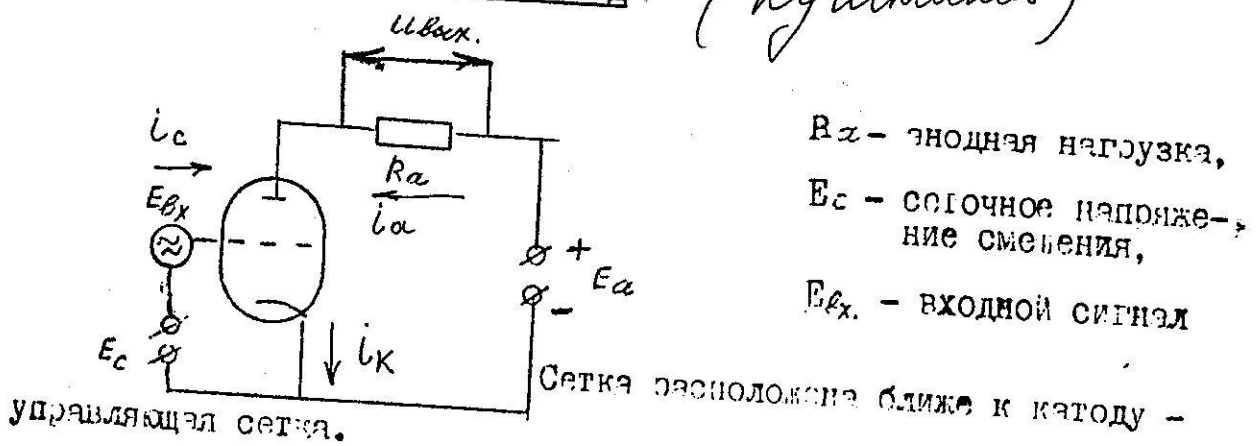
Это уравнение называется «законом степени трех вторых» (вывод его см. в [1]). Здесь  $g = \frac{4}{9} \frac{e N_A}{d^2} \rho^2$  конструктивная постоянная, зависящая от конструкции электродов, их размеров и расстояния между ними;

Реальные характеристики отклоняются от теоретических.

Причины:

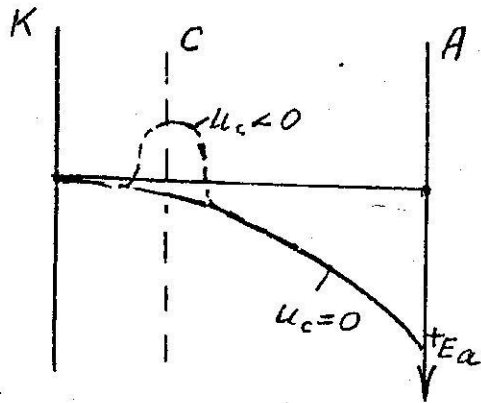
1. Разброс электронов по скоростям.
2. Даже при комнатной температуре имеются быстрые электроны за счет максвелловского распределения по скорости.
3. Температурное поле и распределение потенциала на катоде не равномерны.
4. Не учтено влияние магнитного поля.
5. Неидеальность вакуума /есть соударения/.

### ТРИОД (Кушманов)



Вакуумный триод имеет три электрода: катод, сетку и анод (рис. 1.1). С помощью сетки осуществляется электростатическое управление анодным током, поэтому эта сетка называется управляющей. Напряжение на аноде всегда положительно, а напряжение на сетке может быть и положительным, и отрицательным. Через анод и сетку протекают анодный  $i_a$  и сеточный  $i_c$  токи. Сумма этих токов равна катодному току  $i_k$  (рис. 1.31):

$$i_k = i_c + i_a.$$



При подаче отрицательного напряжения на сетку увеличивается объемный заряд, и, увеличивая анодным или сеточным напряжением.

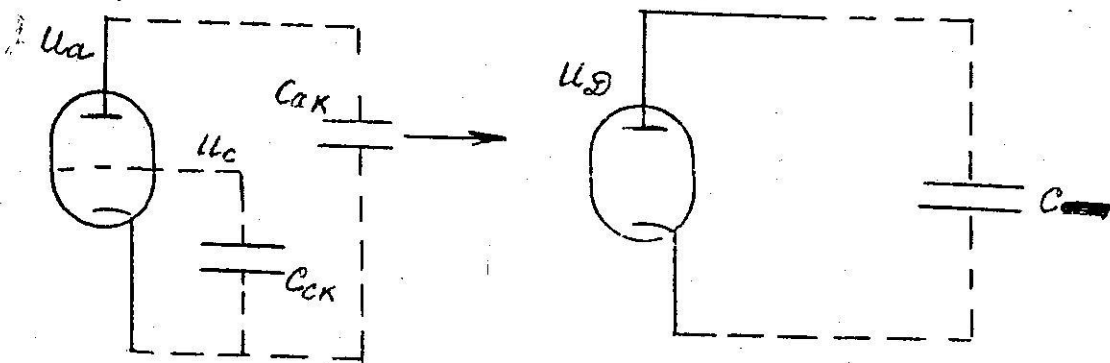
Сущ. режим — режим прямого перехвата — анод перехватывает электроны, которые задержались в пространстве катод — сетка.

Режим возврата электронов — под действием поля сетки электроны возвращаются на катод.

Триод представляется в виде диода, эквивалентность обеспечивает равенство зарядов на всех электродах.

Токи в триоде при постоянной температуре катода зависят от напряжений на аноде и сетке:  $I_k = I_a + I_c = \Phi(U_c, U_a)$ . Частные зависимости  $I_a = \Phi'(U_c, U_a)$  и  $I_c = \Phi''(U_c, U_a)$  можно изобразить графически статическими характеристиками. Однако практический интерес представляет получение приближенного аналитического выражения этих зависимостей. Для этого вводят понятие действующего потенциала электрода.

Тогда реальный триод с напряжениями  $U_c$  и  $U_a$  на его электродах заменяется эквивалентным диодом, анод которого помещается на месте сетки триода, а анодный потенциал эквивалентного диода равен потенциалу, действующему в области сетки



Условием эквивалентности диода триоде является равенство их катодных токов  $i_{кт} = i_{кд}$ . Для выполнения этого равенства необходимо равенство зарядов, наводимых на их катодах соответствующими напряжениями. При равенстве зарядов напряженности поля у катодов, а следовательно, и количества вылетевших с них электронов будут одинаковы.

Заряд на катоде реального триода  $Q_{триода} = C_{ск}U_c + C_{ак}U_a$ , где  $C_{ск}$  — емкость промежутка сетка—катод, а  $C_{ак}$  — емкость между анодом и катодом. Заряд на катоде эквивалентного диода  $Q_{диода} = CU_d$ , где  $C$  — емкость анод—катод эквивалентного диода. Требование эквивалентности  $Q_{диода} = Q_{триода}$  приводит к равенству:  $U_d = (C_{ск}U_c + C_{ак}U_a) / C$ . Поделив числитель и знаменатель этого равенства на  $C_{ск}$ , получим

$$U_d = \left( U_c + \frac{C_{ак}}{C_{ск}} U_a \right) / \frac{C}{C_{ск}}$$

Полагая приближенно  $C/C_{ск} \approx 1$  и вводя соответственно обо-

$$D = \frac{C_{ак}}{C_{ск}} \tag{1.14}$$

— проницаемость сетки лампы для поля анода, получаем приближенное выражение для действующего напряжения:

$$U_d \approx U_c + D U_a \tag{1.15}$$

Тогда катодный ток триода в соответствии с ф-лой (1.9) можно выразить с помощью закона степени трех вторых:  $I_k = I_a + I_c \approx \approx g_t U_d^{3/2} \approx g_t (U_c + D U_a)^{3/2}$ , где  $g_t$  — конструктивная постоянная триода.

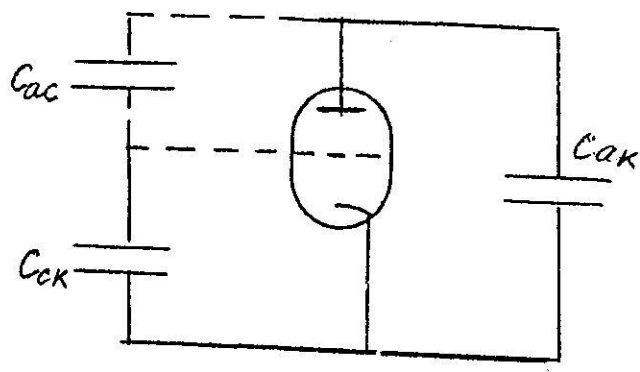
$\frac{C_{ак}}{C_{ск}} = \mathcal{D}$  — проницаемость, указывает сколь сильно ослаблено влияние анодного напряжения за счет наличия сетки по сравнению с сеточным напряжением

$$\mathcal{D} = - \frac{\partial I_c}{\partial U_a}$$

Проницаемость сетки триода  $D = C_{ак}/C_{ск}$  оценивает сравнительное влияние полей анода и сетки на ток катода. Чем гуще сетка, тем меньше проницаемость и тем меньше влияет через сетку анодное напряжение на анодный ток. Если предположить, что сетка является сплошной поверхностью, то поле анода не может проникнуть к катоду и проницаемость равна нулю. Если сетка редкая, то проницаемость ее высока. Проницаемость всегда меньше единицы и в практических конструкциях триодов лежит в пределах 0,01 ÷ 0,1.

Проницаемость  $D$  сетки лампы показывает, какую долю анодного напряжения нужно приложить к аноду эквивалентного диода, чтобы результирующее поле осталось прежним. Допустим для примера, что анодное напряжение  $U_a = 100$  В; а густота сетки такова, что проницаемость  $D = 0,01$ . Тогда  $D U_a = 100 \cdot 0,01 = 1$  В, т. е. анодное напряжение ослабляется в 100 раз и 100 В анодного напряжения, пересчитанные к плоскости витков сетки, действуют на катод так же, как один вольт сеточного напряжения.

Понятие действующего напряжения облегчает рассмотрение физических процессов и характеристик триода.



$C_{ск}$  - входная емкость  
 $C_{ак}$  - выходная емкость  
 $C_{ас}$  - проходная  
 $I \neq 0$

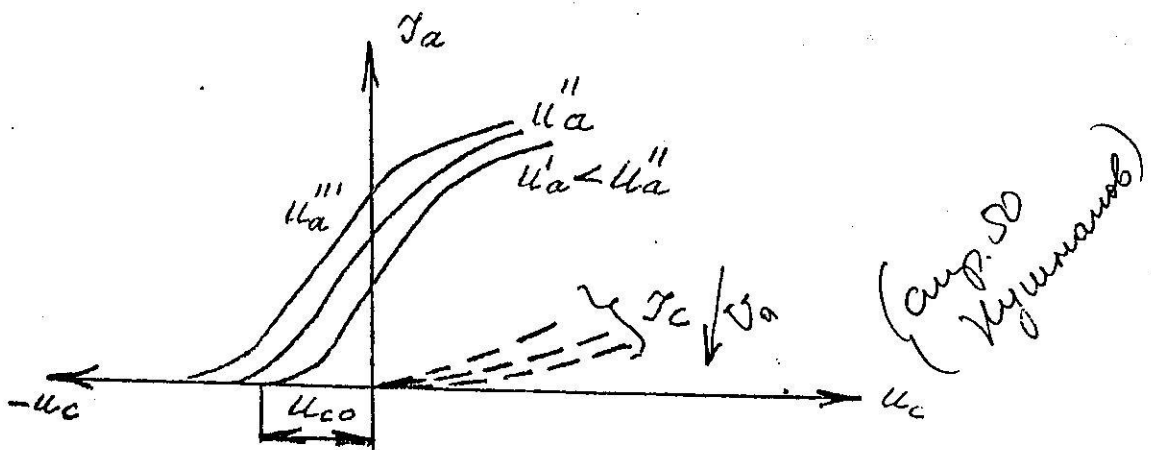
СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИОДА (Кушманов)

Общую зависимость  $I_k = \Phi(U_c, U_a)$  для удобства на практике разбивают на четыре частных уравнения, которые и являются характеристиками триода:

- $I_a = \Phi_1(U_a)$  при  $U_c = \text{const}$  — выходная (анодная) характеристика;
- $I_c = \Phi_2(U_c)$  при  $U_a = \text{const}$  — входная (сеточная) характеристика;
- $I_a = \Phi_3(U_c)$  при  $U_a = \text{const}$  — характеристика прямой передачи (анодно-сеточная);
- $I_c = \Phi_4(U_a)$  при  $U_c = \text{const}$  — характеристика обратной связи (сеточно-анодная).

Целесообразно иметь единые названия характеристик для триода и транзистора. В скобках указаны названия ламповых характеристик, сложившиеся исторически.

Анодно-сеточные характеристики /сеточные/



$U_{c0} \rightarrow I_a = 0$  — напряжение отсечки /защорки/

Начало характеристик определяется отсечкой анодного тока, которая соответствует нулевому действующему напряжению.

$$U_D = U_c + \mu U_a \rightarrow U_{c0} = -\mu U_a \leftarrow U_D = 0$$

/завышена/

На кривых семейства можно выделить участок с высокой линейностью, он определяет динамический диапазон триода в режиме усиления без искажений.

Условием эквивалентности диода триоду является равенство их катодных токов  $i_{кт} = i_{дд}$ . Для выполнения этого равенства необходимо равенство зарядов, наводимых на их катодах соответствующими напряжениями. При равенстве зарядов напряженности поля у катодов, а следовательно, и количества вылетевших с них электронов будут одинаковы.

Заряд на катоде реального триода  $Q_{\text{триода}} = C_{ск} U_c + C_{ак} U_a$ , где  $C_{ск}$  — емкость промежутка сетка—катод, а  $C_{ак}$  — емкость между анодом и катодом. Заряд на катоде эквивалентного диода  $Q_{\text{диола}} = C U_d$ , где  $C$  — емкость анод—катод эквивалентного диода. Требование эквивалентности  $Q_{\text{диола}} = Q_{\text{триода}}$  приводит к равенству:  $U_d = (C_{ск} U_c + C_{ак} U_a) / C$ . Поделив числитель и знаменатель этого равенства на  $C_{ск}$ , получим

$$U_d = \left( U_c + \frac{C_{ак}}{C_{ск}} U_a \right) / \frac{C}{C_{ск}}$$

Полагая приближенно  $C/C_{ск} \approx 1$  и вводя соответственно обо-

$$D = \frac{C_{ак}}{C_{ск}} \quad (1.14)$$

— проницаемость сетки лампы для поля анода, получаем приближенное выражение для действующего напряжения:

$$U_d \approx U_c + D U_a \quad (1.15)$$

Тогда катодный ток триода в соответствии с ф-лой (1.9) можно выразить с помощью закона степени трех вторых:  $I_k = I_a + I_c \approx g_t U_d^{3/2} \approx g_t (U_c + D U_a)^{3/2}$ , где  $g_t$  — конструктивная постоянная триода.

$\frac{C_{ак}}{C_{ск}} = D$  — проницаемость, указывает сколь сильно ослаблено влияние анодного напряжения за счет наличия сетки по сравнению с сеточным напряжением

$$D = - \frac{\partial I_c}{\partial U_a}$$

Проницаемость сетки триода  $D = C_{ак}/C_{ск}$  оценивает сравнительное влияние полей анода и сетки на ток катода. Чем гуще сетка, тем меньше проницаемость и тем меньше влияет через сетку анодное напряжение на анодный ток. Если предположить, что сетка является сплошной поверхностью, то поле анода не может проникнуть к катоду и проницаемость равна нулю. Если сетка редкая, то проницаемость ее высока. Проницаемость всегда меньше единицы и в практических конструкциях триодов лежит в пределах 0,01 ÷ 0,1.

Проницаемость  $D$  сетки лампы показывает, какую долю анодного напряжения нужно приложить к аноду эквивалентного диода, чтобы результирующее поле осталось прежним. Допустим для примера, что анодное напряжение  $U_a = 100$  В, а густота сетки такова, что проницаемость  $D = 0,01$ . Тогда  $D U_a = 100 \cdot 0,01 = 1$  В, т. е. анодное напряжение ослабляется в 100 раз и 100 В анодного напряжения, пересчитанные к плоскости витков сетки, действуют на катод так же, как один вольт сеточного напряжения.

Понятие действующего напряжения облегчает рассмотрение физических процессов и характеристик триода.

(стр. 54)

$$S_i = \frac{\partial i_a}{\partial U_c} / I_a = \text{const} \left[ 1-50 \frac{\mu A}{B} \right]$$

На этих же кривых определяем

$$R_i = \frac{\partial U_a}{\partial i_a} / U_a = \text{const} \quad (0,5-50 \text{ ком})$$

- д.т. или внутреннее сопротивление триода

$$\mu = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} / I_a = \text{const}$$

- статический коэффициент усиления.

$\mu = 4-100$

$$S R_i = \mu$$

основная формула триода

(внутреннее уравнение триода)

/отсутствуют сеточные токи/

хар-т влияния сеточного на анодный ток

$R_i$  - выходная проводимость (крутизна выходной (анодной) хар-ти)

Внутреннее сопротивление триода переменному току характеризует абсолютное влияние анодного напряжения на анодный ток, т. е. показывает сопротивление лампы для малых изменений анодного тока. Величина, обратная внутреннему сопротивлению, — выходная проводимость равна крутизне выходной (анодной) характеристики. Чем круче выходная характеристика, тем меньше внутреннее сопротивление триода. Величина внутреннего сопротивления триодов лежит в пределах  $R_i = 0,5 \div 50$  ком.

Статический коэффициент усиления триода оценивает относительное влияние сеточного и анодного напряжений на анодный ток:

$$\mu = \left| \frac{dU_a}{dU_c} \right| \text{ при } I_a = \text{const} \quad (1.25)$$

или приближенно

$$\mu = \left| \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \right| \text{ при } I_a = \text{const.} \quad (1.26)$$

Коэффициент усиления равен отношению приращений напряжения анода  $\Delta U_a$  и напряжения сетки  $\Delta U_c$ , вызывающих одинаковое изменение анодного тока. Этот коэффициент показывает, во сколько раз приращение напряжения анода больше, чем равноценное по воздействию на анодный ток приращение напряжения сетки. При определении коэффициента усиления изменения  $U_a$  и  $U_c$  противоположны по знаку. Например, увеличение  $U_c$  приводит к увеличению  $I_a$ . Для приведения  $I_a$  к прежнему значению нужно уменьшить значение  $U_a$ . Коэффициент  $\mu$  является безразмерной величиной и имеет в промышленных триодах значение  $\mu = 4 \div 100$ . Подставив в выражение (1.20)  $\partial I_a / \partial U_c = S$ ,  $\partial U_a / \partial I_a = R_i$  и  $-\Delta U_a / \Delta U_c = \mu$ , получим уравнение:

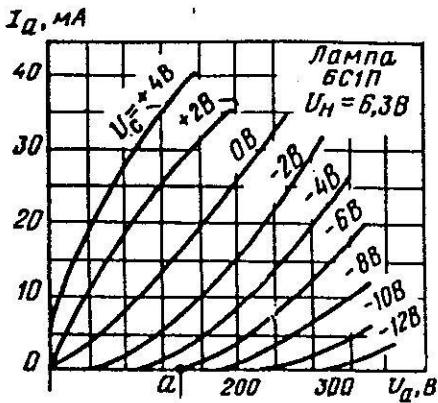
$$\mu = S R_i \quad (1.27)$$

которое называется *внутренним уравнением триода*. Внутреннее уравнение связывает между собой основные параметры статических характеристик триода и позволяет по двум известным параметрам найти третий. При определении с помощью этого уравнения какого-либо неизвестного параметра необходимо крутизну лампы переводить из значений [мА/В] в значения [А/В].

Проницаемость сетки лампы оценивает относительное влияние сеточного и анодного напряжений на катодный ток:

$$D = - \frac{dU_c}{dU_a} \text{ при } I_k = \text{const}$$

**Выходные характеристики триода (анодные).** Выходные характеристики триода являются наиболее важными. Они чаще всего используются для расчетов, особенно для графического определения режима и эксплуатационных параметров при больших амплитудах сигналов, захватывающих значительный участок характеристики.



Выходные характеристики в основном подчиняются закону степени трех вторых. Характеристики, снятые при отрицательных напряжениях на сетке, сдвинуты вправо от начала координат. Анодный ток появляется при значениях анодного напряжения, отличающихся от нуля. И чем большее отрицательное напряжение приложено к сетке, тем больше сдвиг характеристик.

Характеристики при отрицательных напряжениях на сетке и при малых значениях анодного тока имеют значительную кривизну и обращены выпуклостью к оси абсцисс, а при больших токах почти прямолинейны. В прямолинейной части характеристики, снятые при разных  $U_c$ , примерно параллельны друг другу.

При положительных напряжениях  $U_c$  характеристики начинаются из начала координат, резко возрастают на начальном участке, а затем идут прямолинейно и параллельно характеристикам при отрицательных  $U_c$ . Их кривизна меняется, а выпуклость обращена к оси ординат. Резкое возрастание анодного тока объясняется перераспределением в лампе токов между сеткой и анодом.

Главными недостатками триодов являются малый коэффициент усиления и большая проходная емкость. Триод имеет также малое внутреннее сопротивление  $R_i$ , которое сильно шунтирует колебательный контур в резонансном усилителе. Вследствие внесения в контур дополнительного затухания, его резонансные свойства ухудшаются. Триод имеет малый коэффициент усиления на низких частотах и еще меньший на высоких, поэтому использование его на высоких частотах невыгодно (на высоких частотах применяют в основном экранированные лампы — тетроды и пентоды).

Достоинством триода является простота его конструкции и хорошая линейность характеристик.

Электровакuumные диоды, как и триоды, применяют в аппаратуре, работающей в тяжелых условиях (высокая температура, радиация и т. д.), высоковольтных устройствах, мощных электротехнических и энергетических устройствах и в ряде других областей.

Эффективным средством устранения этих недостатков триода является введение в лампу экранирующей сетки, которая размещается между анодом и управляющей сеткой.

Введение экранирующей сетки сильно влияет на активные и реактивные параметры лампы. Изменяется также вид ее статических характеристик.

Проходная емкость экранированной лампы резко уменьшается. Статический коэффициент усиления  $\mu = -\Delta U_a / \Delta U_c$  при  $I_a = \text{const}$  экранированной лампы сильно возрастает.

Внутреннее сопротивление  $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$  при  $U_c = \text{const}$  экранированной лампы также существенно увеличивается.

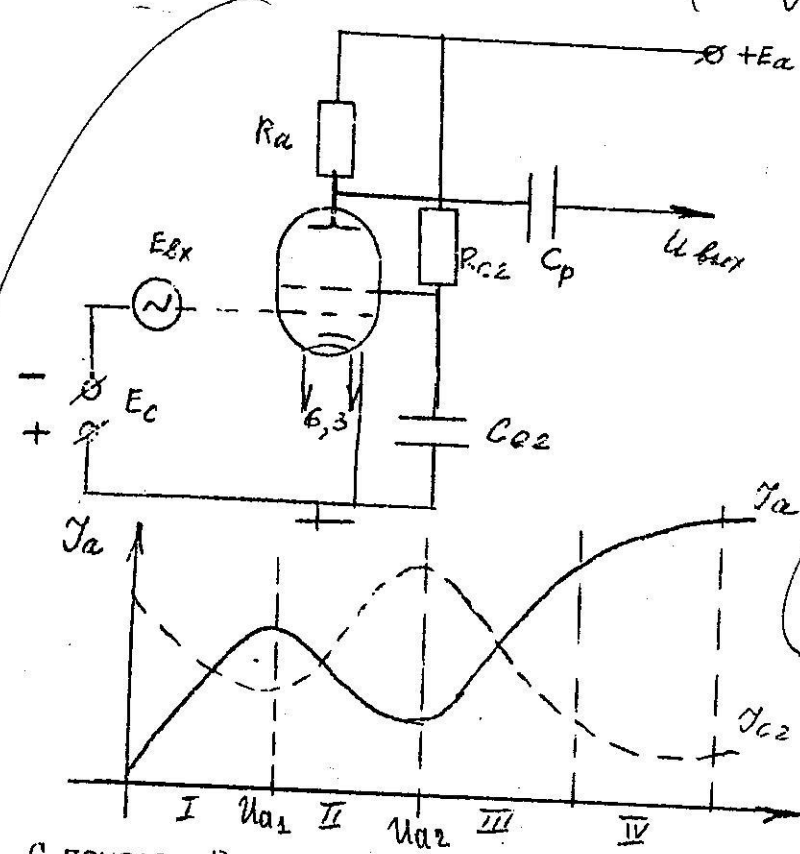
Крутизна характеристики экранированной лампы имеет тот же порядок, что и в триоде. Из внутреннего уравнения лампы  $\mu = SR_i$  следует, что при одновременном росте  $R_i$  и  $\mu$  крутизна не должна сильно изменяться.

*недостатки  
достатки  
применение*

*Тетрод*

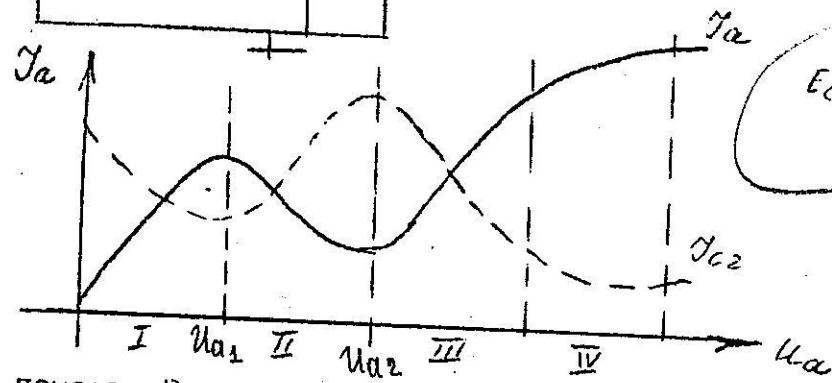


# ТЕТРОД (Кушманов)



Вторая сетка ближе к аноду

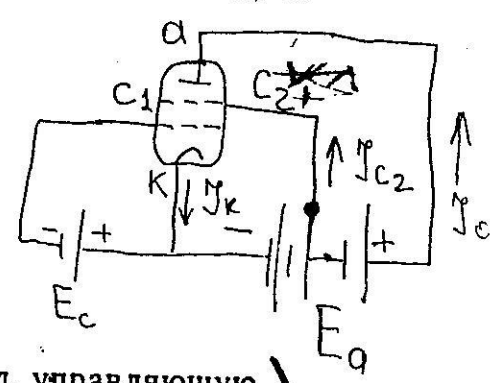
$E_{c2} = 0,8 E_a$   
 $U_a < U_{c2}$



С помощью  $R_{c2}$  обеспечивается необходимое напряжение на экранной сетке.

$$E_{c2} = (0,7 - 1) E_a$$

$C_{c2}$  шунтирует обратную связь экранирующей сетки.  
 $C_p$  - разделительная емкость.

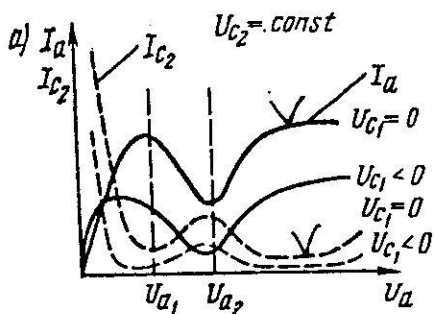


Тетрод имеет четыре электрода: катод, управляющую сетку, экранирующую сетку и анод. Экранирующая сетка существенно влияет на реактивные и активные параметры тетрода. Напряжения на его электроды подаются, как показано на рис. Положительное напряжение  $U_{c2} = (0,5 \div 1,0) U_a$  на экранирующую сетку снимается с источника, питающего анодную цепь. В некоторых случаях экранирующая сетка питается от отдельного источника. Ток экранирующей сетки составляет примерно 20-40% анодного.

Экранирующая сетка - анод - сетка  
 Шкала смещения - анод - сетка

# Анодная характеристика

Из семейства выходных характеристик видно, что при малых значениях анодного напряжения кривая тока имеет провалы. Эти провалы объясняются проявлением динаatronного эффекта по аноду.



Динаatronный эффект в лампе — это процесс перераспределения токов электродов, связанный с наличием вторичной эмиссии. Если вторичные электроны выбиваются из анода и электрическим полем отводятся на экранирующую сетку, то анодный ток уменьшается, а ток экранирующей сетки увеличивается. Такое явление носит название динаatronного эффекта по аноду. При выбивании электронов из экранирующей

сетки и отводе их на анод ток экранирующей сетки уменьшается, а анодный ток увеличивается. В этом случае имеет место динаatronный эффект по экранирующей сетке.

Если  $U_a = 0$ , то  $I_a = 0$ , а  $I_{c2} = I_k$  значительный, так как действующее напряжение в тетраде  $U_d \approx U_{c1} + D_1 U_{c2} + D_1 D_2 U_a$  определяется приложенным к экранирующей сетке напряжением  $U_{c2}$  и в силу этого является положительным, что обуславливает большой катодный ток  $I_k$ .

где  $D_1$  — проницаемость первой сетки, характеризующая влияние напряжения экранирующей сетки на область катода;  $D_2$  — проницаемость экранирующей сетки, оценивающая влияние напряжения ~~сетки~~ сетки на область управляющей сетки; С увеличением  $U_a$  анодный ток растет, а ток экранирующей сетки падает. Происходит «переключение» электронов с экранирующей сетки на анод, соответствующее режиму возврата электронов.

При  $U_a = U_{a1}$  (порядка 10–20 В) энергия электронов, падающих на анод, оказывается достаточной для выбивания вторичных электронов. Вторичные электроны с анода отводятся на экранирующую сетку, так как в данном случае  $U_{c2} > U_{a1}$  и существует ускоряющее поле в направлении от анода к экранирующей сетке. Вслед-

ствие такого перехода вторичных электронов анодный ток уменьшается и соответственно увеличивается ток экранирующей сетки. Этот процесс токораспределения, являющийся следствием динаatronного эффекта по аноду, продолжается до тех пор, пока анодное напряжение не увеличится до  $U_{a2} \approx U_{c2}$ . Тогда в силу равенства этих напряжений ускоряющее поле, направленное к экранирующей сетке, исчезнет и отвод вторичных электронов прекратится. Далее, при  $U_a > U_{c2}$  анодный ток начнет возрастать из-за проявления динаatronного эффекта по сетке, а ток экранирующей сетки будет соответственно уменьшаться.

Динаatronный эффект является основным недостатком тетрода. Он обуславливает большую нелинейность характеристик. Наличие на характеристике участка с отрицательным сопротивлением от  $U_{a1}$  до  $U_{a2}$  на рис. 1.55а может при определенных условиях привести к паразитной генерации цепи с тетродом. Поэтому тетроды не получили широкого распространения и используются, главным образом, как мощные лампы.

*перешагивает*  
*напряжение*

# Пентоды

70-17

## УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Помимо управляющей и экранирующей сеток, у пентода имеется защитная сетка, устраняющая динаatronный эффект. Пентод является весьма распространенной лампой, обладающей хорошими усилительными и частотными свойствами.

Схема питания пентода показана на рис. 1.58. Управляющая сетка питается от источника  $E_c$ , а экранирующая — от источника пи-

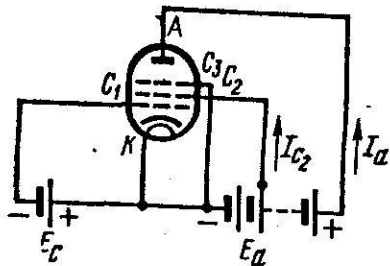


Рис. 1.58. Схема включения пентода по постоянному току

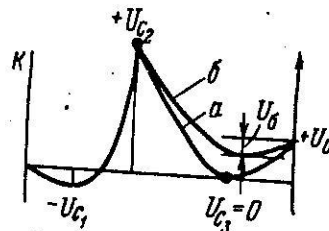
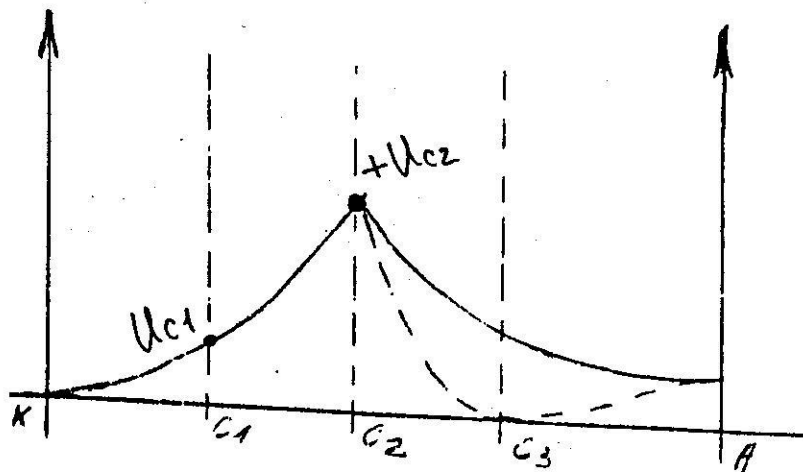


Рис. 1.59. Потенциальная диаграмма пентода

тания анода. В зависимости от назначения лампы и ее конструкции напряжение экранирующей сетки лежит в пределах  $U_{c2} = (0,5 \div 1,0) U_a$ . Ток экранирующей сетки при этом составляет  $I_{c2} = (0,2 \div 0,3) I_a$ . Защитная сетка соединена с катодом и, следовательно, имеет относительно него нулевой потенциал. В ряде ламп она не имеет отдельного вывода и соединена с катодом внутри лампы.

Защитная сетка вводится в пространство между <sup>Экранирующей</sup> ускоряющей сеткой и анодом, ее потенциал обычно равен потенциалу катода. За счет этого в пространстве сетка 2 — анод создается тормозящее эл. поле относительно небольшой величины. Это тормозящее поле практически не влияет на траекторию движения электронов, движущихся от катода к аноду, т.к. его скорость определяется потенциалом <sup>Экранирующей</sup> ускоряющей сетки. Для вторичных электронов, выбившихся из анода, она создает препятствие при их движении от анода к ускоряющей сетке. Поэтому вторичные электроны возвращаются на анод => динаatronный эффект отсутствует.

Распределение потенциала в пространстве анод — катод выглядит так:



В общем случае сумма токов всех электродов равна току катода  $i_k = i_{c1} + i_{c2} + i_{c3} + i_a$ . Чаще всего токи первой и третьей сеток равны нулю и катодный ток распределяется между анодом и экранирующей сеткой. Потенциальная диаграмма пентода для двух сечений лампы (рис. 1.59) показывает роль защитной сетки в устранении динаatronного эффекта. Если рассмотреть сечение лампы, проходящее через виток защитной сетки, то распределение потенциала между экранирующей сеткой и анодом будет определяться кривой *a*. Путь электронов будет лежать между витками защитной сетки. Кривая *b* показывает распределение потенциала для сечения, проходящего через середину междувиткового расстояния. Наличие в этом сечении потенциала, отличного от нуля, обусловлено влиянием поля  $U_{c2}$  и  $U_a$ . Как видно из рисунка, здесь образуется потенциальный барьер для вторичных электронов величиной  $U_b$ . В различных

Действующий потенциал для пентода:

$$U_g = U_{c1} + D_1 U_{c2} + D_1 D_2 U_{c3} + D_1 D_2 D_3 U_a \quad (*)$$

$$U_g \approx U_{c1} + D_1 U_{c2} \quad C_3 - \text{защитная сетка}$$

$$I_k = g U_g^{3/2} \quad \text{улучшения динаatronного эффекта}$$

В общем случае сумма токов всех электродов равна току катода  $i_k = i_{c1} + i_{c2} + i_{c3} + i_a$ . Чаще всего токи первой и третьей сеток равны нулю и катодный ток распределяется между анодом и экранирующей сеткой.

$$U_d \approx U_{c1} + D_1 U_{c2} + D_1 D_2 U_{c3} + D_1 D_2 D_3 U_a \quad (1.44)$$

где  $D_1$  — проницаемость первой сетки, характеризующая влияние напряжения экранирующей сетки на область катода;  $D_2$  — проницаемость экранирующей сетки, оценивающая влияние напряжения защитной сетки на область управляющей сетки;  $D_3$  — проницаемость защитной сетки, показывающая влияние анодного напряжения на область экранирующей сетки.

Каждая из этих величин существенно меньше единицы. В выражении (1.44) значение  $U_a$  помножено на общую проницаемость  $D = D_1 D_2 D_3$ , которая является величиной третьего порядка малости, и, следовательно, увеличение  $U_a$  почти не влияет на действующее напряжение и на катодный ток  $I_k = g U^{3/2}$ . Здесь  $g$  — конструктивный коэффициент пентода. Поскольку катодный ток изменяется мало, то соответственно мало меняются токи  $I_{c2}$  и  $I_a$ . Чем меньше проницаемость сеток, тем меньше изменение анодного тока. У высокочастотных пентодов с целью получения малой проходной емкости экранирующую сетку выполняют с малыми расстояниями между витками, т. е. с малой проницаемостью. Поэтому у таких пентодов участок *AB* почти параллелен оси абсцисс.

**Режимы токораспределения.** При отрицательных напряжениях управляющей сетки и нулевом напряжении защитной сетки, что соответствует типичному рабочему режиму лампы, катодный ток распределя-

ется между экранирующей сеткой и анодом и, следовательно, представляет собой сумму токов экранирующей сетки и анода:

$$I_k = I_a + I_{c2}$$

Зависимость этих токов от напряжения анода при постоянном напряжении экранирующей сетки показана на рис. 10.10. Как и в триоде, здесь можно указать два характерных режима токораспределения: режим прямого перехвата электронов экранирующей сеткой и режим возврата электронов к экранирующей сетке. Но граница между режимами проходит при относительно меньшем напряжении анода [ $U_a < (0,1 \div 0,5)U_{c2}$ ].

При больших анодных напряжениях [ $U_a > (0,1 \div 0,5)U_{c2}$ ] ток экранирующей сетки образуется электронами, которые перехватываются ее витками, и мало зависит от анодного напряжения, так как поле анода сквозь экранирующую сетку проникает слабо и на траектории электронов, движущихся от катода к экранирующей сетке, почти не влияет.

В соответствии с общей закономерностью токораспределения отношение токов анода и экранирующей сетки  $I_a/I_{c2}$  зависит от отношения напряжений электродов, прежде всего от  $U_a/U_{c2}$ , и не зависит от абсолютных величин этих напряжений.

Токи в режиме прямого перехвата связаны следующей эмпирической зависимостью:

$$\beta = \frac{I_a}{I_{c2}} = a + b \frac{U_a}{U_{c2}} \tag{10.6}$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$  для данного типа лампы мало зависят от режима. Например, для пентода 6Ж1П  $a=1$ ,  $b=0,15$ ; для пентода 6Ж5П  $a=0,5$ ,  $b=0,21$ .

При малых анодных напряжениях [ $U_a < (0,1 \div 0,5)U_{c2}$ ] неоднородное поле витков экранирующей сетки существенно искривляет траектории движения электронов, в результате чего они возвращаются на экранирующую сетку. Чем меньше анодное напряжение, тем большая часть электронов возвращается на экранирующую сетку, тем сильнее возрастает ее ток и падает ток анода (рис. 10.10).

В режиме возврата наблюдается более сильная зависимость анодного тока от напряжения анода, чем в режиме прямого перехвата, так как анодное поле, воздействующее на электроны возврата, не ослабляется на этом участке экранирующей сеткой.

В режиме возврата плотность объемного заряда на участке экранирующая сетка — анод резко возрастает, возврат электронов к экранирующей сетке увеличивается. Из-за появления виртуального катода ток пентода с повышением напряжения управляющей сетки, достигнув некоторого максимального значения, начинает уменьшаться.

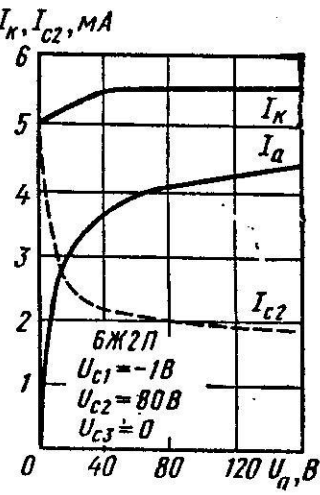


Рис. 10.10