

*НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
"ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ"
КАФЕДРА "РАДИОЭЛЕКТРОНИКА"*

Ю.И.Подъячий

Электровакуумные приборы

Конспект лекций
по курсу "Основы радиоэлектроники"

- ✓ *Усилительные лампы*
- ✓ *Вакуумные фотоэлементы*
- ✓ *Ионные приборы*
- ✓ *Газоразрядные приборы*

Харьков – 2002 г.

© Ю.И.Подъячий, НТУ "ХПИ",
КАФ. "РАДИОЭЛЕКТРОНИКА"

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ	5
ДВУХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ	6
ХАРАКТЕРИСТИКИ	6
ПАРАМЕТРЫ	7
ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ	8
ДЕЙСТВИЕ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СЕТКИ	8
СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ТРИОДА	9
ВНУТРЕННЕ УРАВНЕНИЕ ТРИОДА	10
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИОДОВ	10
ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ	11
ПЯТИЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ	12
ЛУЧЕВОЙ ТЕТРОД	13
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАМПАХ	14
КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛАМПЫ	14
СОБСТВЕННЫЕ ШУМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП	14
МАРКИРОВКА УСИЛИТЕЛЬНЫХ ЛАМП	15
ВАКУУМНЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ	16
ФОТОЭЛЕМЕНТЫ С ВНЕШНИМ ФОТОЭФФЕКТОМ	16
ЭЛЕКТРОННЫЕ ФОТОУМНОЖИТЕЛИ	17
ИОННЫЕ ПРИБОРЫ	17
ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИОННЫХ ПРИБОРАХ	17
<i>Возбуждение и ионизация частиц газа</i>	18
<i>Виды и формы электрического разряда в газах</i>	18
ИОННЫЕ ПРИБОРЫ С НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫМ ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ	20
<i>Газотроны</i>	20
<i>Тиратроны с накаливаемым катодом</i>	21
РТУТНЫЕ ВЕНТИЛИ	22
ПРИБОРЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА	23
СТАБИЛИТРОН ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА	23
СИГНАЛЬНЫЕ И ЦИФРОВЫЕ ЛАМПЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА	24
БЕЗНАКАЛЬНЫЕ ТИРАТРОНЫ	25
ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИНДИКАТОРЫ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ	26

ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП

Электрические приборы, действие которых основывается на протекании электрического тока, создаваемого перемещением электронов в вакууме, называются *электровакuumными приборами (ЭВП)*.

Самую большую группу ЭВП составляют электронные лампы, широко используемые в электронике.

Наиболее простой является двухэлектродная лампа, состоящая из баллона с введенными в него двумя электродами. Чтобы через лампу мог проходить ток, в вакуум должны вводиться свободные заряженные частицы. Эта достигается благодаря испусканию электронов – *электронной эмиссии* с поверхности металлического электрода, называемого *катодом* лампы. Для создания эмиссии катод нагревают, пропуская через него электрический ток от вспомогательного источника. Другим электродом лампы является *анод*. При подаче на него положительного по отношению к катоду потенциала в результате возникающего в лампе электрического поля к аноду направляются электроны, движущиеся в этом поле.

В баллоне электронной лампы поддерживается высокий вакуум (давление не превышает $10^{-6} - 10^{-7}$ мм.рт.ст.). Поэтому длина свободного пробега электрона, т. е. среднее расстояние, пробегаемое им от одного столкновения с молекулами газа до другого, в $10^3 - 10^4$ раз больше расстояния между электродами лампы.

При отрицательном потенциале анода относительно катода электрическое поле в лампе направляет электроны, вылетевшие из катода, обратно к катоду, и ток через лампу не протекает. Поэтому при включении в анодную цепь лампы источника переменного напряжения ток через нее будет протекать только в течение полупериода, которому соответствует положительный потенциал анода (односторонняя проводимость лампы).

Время, необходимое для пробега электроном расстояния между электродами лампы для случая плоского анода и катода, электрическое поле между которыми равномерно, определяется по формуле:

$$t_{np} = \frac{l}{300 \sqrt{u_a}},$$

где l – расстояние между катодом и анодом, u_a – напряжение на аноде. Например, при $u_a = 150$ В и $l = 4$ мм $t_{np} = 10^{-9}$ с. Обычно в электронных лампах время пролета электронов составляет от 10^{-10} до 10^{-8} с.

Таким образом, электронные лампы можно использовать на частотах порядка десятков МГц. При учете влияния поля, созданного в междуэлектродном пространстве электронами, эмитированными катодом, время пролета возрастает примерно в полтора раза.

ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Как известно, молекулы металлических проводников образуют кристаллическую решетку, в узлах которой расположены ионы, а между узлами непрерывно движутся отделившиеся от атомов валентные электроны, создающие электропроводность металла.

Электроны, свободно перемещающиеся внутри металла, хотя и имеют при низких температурах значительные энергии, но не могут (за редкими исключениями) выйти за пределы металла без подведения извне дополнительной энергии. Выходу электронов за пределы металла препятствуют:

- двойной электрический слой на его поверхности
- силы притяжения, обусловленные положительными зарядами внутри металла.

Двойной электрический слой появляется из-за того, что некоторое количество электронов выходит за пределы металла и создает вблизи поверхности последнего электронную атмосферу, плотность которой возрастает по мере приближения к границе металла. Эти электроны и положительные заряды внутри металла создают электрическое поле, препятствующее выходу электронов из металла.

Дополнительная энергия, которая должна быть подведена к электрону извне для того, чтобы он мог покинуть пределы металла называется работой выхода:

$$A_{\text{вых}} = e\varphi_0 = W_a - W_i,$$

где φ_0 – потенциальный барьер границы металл–вакуум, W_a – энергия электрона в вакууме, W_i – энергия электрона в металле.

В зависимости от способа сообщения электронам добавочной энергии различают следующие виды электронной эмиссии:

- *термоэлектронная* или *тепловая*: дополнительная энергия сообщается электронам в результате нагрева катода
- *вторичная*: электроны излучаются с поверхности металла вследствие ее бомбардировки внешними электронами или ионами
- *фотоэлектронная*: поверхность металла облучается светом, и проникающие в металл кванты лучистой энергии повышают энергию электронов
- *автоэлектронная*: сильное электрическое поле у поверхности катода снижает потенциальный барьер и создает условия для выхода электронов за пределы металла.

ДВУХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ

Характеристики

Лампы, содержащие только два электрода — катод и анод, называются *диодами*.

При отсутствии эмиссии с катода и приложенном анодном напряжении между электродами существует только положительное поле анода. Потенциал этого поля для плоских электродов возрастает пропорционально расстоянию до катода (прямая 1 на *рис. 1*).

В результате нагрева катода эмитируемые им электроны заполняют междуэлектродное пространство, создавая распределенный в объеме, отрицательный заряд. Наложение поля пространственного заряда, тормозящего электроны, на поле анода даёт результирующее поле между электродами лампы, распределение потенциалов в котором при неизменном u_a определяется распределением плотности объемного заряда. Так как анодный ток в любом сечении промежутка анод – катод сохраняет одну и ту же величину, а скорости электронов по мере удаления от катода возрастают, то концентрация электронов с приближением к аноду убывает, как это схематично показано на *рис. 1*.

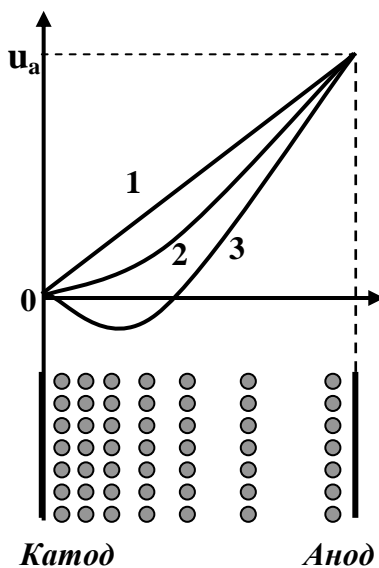


Рис. 1

Влияние поля пространственного заряда тем сильнее, чем больше электронов между катодом и анодом, т. е. чем больше ток эмиссии. Кривая 2 показывает результирующее поле при малом напряжении накала, когда наибольшая концентрация электронов вблизи катода еще невелика и на всем протяжении промежутка анод – катод результирующее поле положительно. Кривая 3 относится к результирующему полю при столь большой эмиссии, при которой это поле вблизи катода становится отрицательным.

Очевидно, что для значений токов эмиссии i_e , при которых кривая результирующего поля на всем своем протяжении лежит выше оси x , все электроны, эмитируемые катодом, уходят к аноду, т. е. $i_a = i_e$. Такой режим называют *режимом насыщения*.

Большим токам эмиссии соответствует отрицательное результирующее поле в области катода, которое возвращает наиболее медленные электроны к катоду. В этом случае только часть эмитированных электронов достигает анода, т. е. $i_a < i_e$. Соответствующий этому режим принято называть *режимом пространственного заряда*.

Зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном напряжении накала называют *анодной характеристикой диода* (рис. 2).

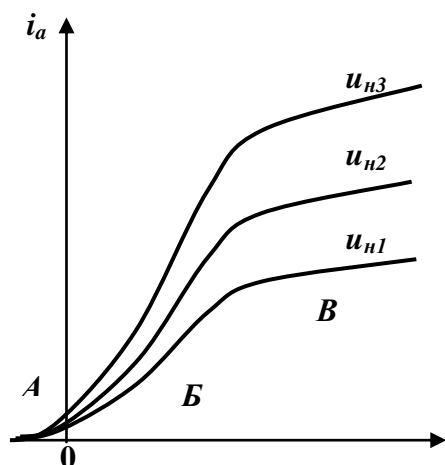


Рис. 2

Наличие тока на участке А объясняется тем, что вылетающие из катода электроны имеют начальную скорость больше нуля. Некоторое количество электронов обладает такими начальными скоростями, при которых эти электроны могут преодолеть тормозящее действие поля, созданного небольшим отрицательным потенциалом анода, и достигнуть последнего. Этот ток будет отсутствовать, если приложить к аноду достаточно большой по абсолютной величине отрицательный потенциал относительно катода, который называют запирающим. Последний имеет значение 1–2 В.

На участке В анодный ток ограничивается отрицательным пространственным зарядом и зависит от величины анодного напряжения, расстояния между электродами лампы и формы электродов. Зависимость между силой тока и напряжением на этом участке имеет вид

$$i_a = A u_a^{3/2},$$

где A — коэффициент, определяемый конструкцией лампы. Это выражение называют *законом "степени трех вторых"*.

Пологий участок В соответствует *режиму насыщения*, при котором все вышедшие из катода электроны достигают анода ($i_a = i_e$). Ход кривых на этом участке зависит от материала катода. У оксидных катодов с увеличением анодного напряжения эмиссия электронов увеличивается, и поэтому увеличивается анодный ток. У чисто вольфрамового катода анодный ток практически остается неизменным. Этот ток, равный полному току эмиссии при заданном U_n , называют током насыщения (I_s).

Для практических расчетов часто нижнюю часть характеристики представляют квадратичной зависимостью $i_a = k u_a^2$, а восходящую часть характеристики считают линейной.

Для расчетов, не требующих особой точности, иногда всю характеристику до участка насыщения представляют в виде наклонной прямой, выходящей из начала координат, а участок насыщения — в виде горизонтальной прямой. Такая характеристика часто называется идеализированной.

Параметры

Одним из важнейших параметров диода является его *внутреннее* (или *дифференциальное*) *сопротивление*

$$R_i = \frac{du_a}{di_a} \cong \frac{\Delta u_a}{\Delta i_a}.$$

Величина, обратная R_i , характеризует приращение анодного тока при изменении анодного напряжения и носит название *крутизны* (измеряется в mA/B):

$$R_i = \frac{di_a}{du_a} \cong \frac{\Delta i_a}{\Delta u_a}.$$

Внутреннее сопротивление по постоянному току R определяется как отношение полных величин напряжения и тока на участке B вольт-амперной характеристики.

Большое практическое значение имеют и другие параметры диода:

- наибольшее допустимое значение силы анодного тока $I_{a, макс}$, которое ограничивается эмиссионной способностью катода при его рабочей температуре
- допустимое среднее значение силы анодного тока I_a , которое соответствует максимальной мощности, рассеиваемой анодом $P_{a, max}$
- наибольшее допустимое обратное напряжение $U_{обр, макс}$; при большом обратном напряжении между электродами может наступить пробой, обусловленный разрядом в остаточном газе лампы
- номинальное напряжение U_n и номинальный ток I_n накала лампы.

Диоды применяются для выпрямления переменного тока. Выпрямительные диоды принято называть *кенотронами*. Кенотронные выпрямители с лампами широко используются для питания устройств электроники.

Двухэлектродные лампы также используются для детектирования – преобразования токов высокой частоты в токи низких частот (для выделения низкочастотных сигналов).

ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ

Действие управляющей сетки

Для управления величиной анодного тока между анодом и катодом помещают еще один электрод, называемый *управляющей сеткой*. Конструктивно в большинстве случаев сетка выполняется в виде проволочной спирали. Лампа, содержащая три электрода, называется *трехэлектродной лампой* или *триодом*.

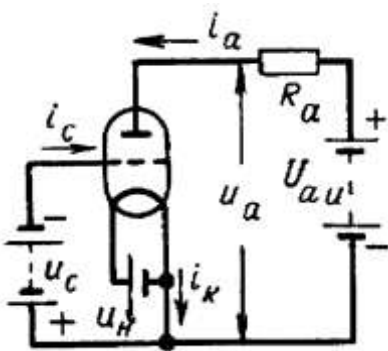


Рис. 3

При подаче на управляющую сетку отрицательного потенциала по отношению к катоду (*рис. 3*) между сеткой и катодом появляется поле, тормозящее электроны. Это поле, накладываясь на ускоряющее поле анода, ослабляет последнее. Электроны, успевшие приобрести во время движения от катода до сетки большую кинетическую энергию, пролетают через отверстия сетки и попадают на анод. Часть более медленных электронов возвращается к катоду под действием тормозящего поля сетки, вследствие чего сетка уменьшает анодный ток. При достаточно большом отрицательном потенциале сетки величина анодного тока может быть доведена до нуля.

Если к сетке подвести положительный потенциал относительно катода, то поле сетки на участке катод–сетка будет усиливать анодное поле и увеличивать анодный ток. При этом на нее падает часть электронов, которая создает сеточный ток. Положительное направление этого тока внутри лампы – от сетки к катоду, а вне лампы – от катода к источнику сеточного напряжения и сетке. Сеточный ток может протекать и при небольших отрицательных потенциалах сетки относительно катода. Он создается падающими на сетку электронами, обладающими достаточной для этого энергией.

Соотношение для токов в лампе можно записать в виде

$$i_k = i_a + i_c.$$

Если хорошо изолированную сетку зарядить положительно и отключить от источника сеточного напряжения, то с течением времени положительные заряды будут нейтрализованы падающими на сетку электронами. Затем электроны, обладающие значительными скоростями, попадая на сетку, будут увеличивать ее отрицательный заряд. Анодный ток при этом будет уменьшаться до тех пор, пока лампа почти полностью не заперется.

Статические характеристики и параметры триода

Основные вольт-амперные характеристики триодов определяются так:

а) *анодно-сеточная характеристика* – это зависимость анодного тока от напряжения на сетке при постоянном анодном напряжении

$$i_a = F(u_c) \text{ при } u_a = \text{const.}$$

б) *анодная характеристика* – это зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном напряжении на сетке

$$i_a = F(u_a) \text{ при } u_c = \text{const.}$$

Указанные характеристики, каждую из которых получают изменением лишь одного из напряжений при сохранении второго напряжения неизменным, называют *статическими*. Их примеры показаны на *рис. 4*.

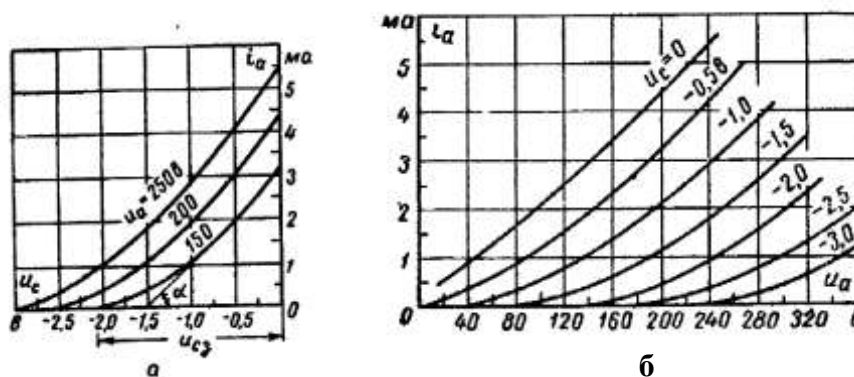


Рис. 4

Каждая анодно-сеточная характеристика (*рис. 4а*) начинается в точке оси абсцисс, которой отвечает сеточное напряжение u_{c3} , называемое *напряжением запирающей лампы*: при нем $i_a = 0$. Чем больше анодное напряжение, тем больше абсолютное значение u_{c3} .

Заданный анодный ток можно получить при возросшем отрицательном сеточном напряжении, если увеличить анодное напряжение. Это вытекает также из рассмотрения анодных характеристик (*рис. 4б*), которые с ростом отрицательного сеточного напряжения смещаются вправо от оси ординат, т. е. в область больших анодных напряжений.

Основные статические параметры триода:

1. Статический коэффициент усиления

$$\mu = - \frac{\partial u_a}{\partial u_c} \text{ при } i_a = \text{const.} \quad (1)$$

При одновременном изменении анодного и сеточного напряжений величина анодного тока может оставаться постоянной, если приращения этих напряжений имеют противополо-

ложные знаки; поэтому величина μ будет всегда положительной.

2. Статическая крутизна

$$S = \frac{\partial i_a}{\partial u_c} \quad \text{при } u_a = \text{const}. \quad (2)$$

Эта величина характеризует зависимость анодного тока от сеточного напряжения при неизменном анодном напряжении.

3. Внутреннее сопротивление триода

$$R_i = \frac{\partial u_a}{\partial i_a} \quad \text{при } u_c = \text{const}. \quad (3)$$

Из формы статических характеристик видно, что рассмотренные параметры не являются постоянными для всех точек характеристик. Они могут оставаться неизменными лишь в пределах прямолинейных участков характеристик.

К параметрам триода также относятся напряжение и ток накала (u_n, i_n) и максимальная мощность рассеяния $P_{a, \text{макс}}$.

Внутреннее уравнение триода

Полный дифференциал анодного тока можно записать в виде

$$di_a = \frac{\partial i_a}{\partial u_a} du_a + \frac{\partial i_a}{\partial u_c} du_c$$

С учетом выражений (2) и (3) получаем

$$di_a = \frac{1}{R_i} du_a + S du_c.$$

При $i_a = \text{const}$

$$-\frac{du_c}{du_a} SR_i = 1.$$

Учитывая (1), получаем уравнение, связывающее три параметра лампы

$$\frac{1}{\mu} SR_i = 1.$$

Это уравнение называется *внутренним уравнением триода*.

Использование триодов

Динамический коэффициент усиления триодного каскада определяется выражением

$$\mu_d = -\frac{du_a}{du_c} = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a},$$

где μ – статический коэффициент усиления триода, R_i – внутреннее сопротивление, R_a – сопротивление анодной нагрузки.

Таким образом, триоды, предназначенные для усиления напряжения должны обладать большими значениями статического коэффициента усиления μ , а их внутреннее сопротивление R_i должно быть значительно меньше сопротивления нагрузки R_a . При усилении колебаний низких частот величина R_a может составлять *сотни кОм*. Для усиления напряжения выпускаются триоды с густыми сетками ($\mu = 25-100$) и внутренним сопротивлением

50–100 кОм., имеющие крутизну 1–2 мА/В. У некоторых ламп значение S доходит до 4–5 мА/В.

Триоды, предназначенные для усиления мощности, должны работать с относительно большими амплитудами переменной составляющей анодного тока и иметь длинный прямолинейный участок анодно-сеточной характеристики в области отрицательных сеточных напряжений, необходимый для усиления без искажений.

Для получения такого участка анодно-сеточной характеристики в области отрицательных сеточных напряжений лампа должна иметь редкую сетку, т. е. малый статический коэффициент усиления μ .

Для усиления мощности используются триоды, имеющие крутизну до 6 мА/В, $\mu=4–10$ и $P_{a, \max}$ в несколько десятков Вт.

ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ

При работе триода с высокочастотными сигналами существенное значение приобретают междуэлектродные емкости лампы. В триоде существуют следующие междуэлектродные емкости: а) между сеткой и катодом $C_{ск}$; б) между анодом и катодом $C_{ак}$ и в) между анодом и сеткой $C_{ас}$. Каждая из междуэлектродных емкостей создает проводимость для переменного тока, величина которой возрастает с увеличением его частоты.

На работу схем, в которых применяется триод, наиболее существенное влияние оказывает емкость анод-сетка $C_{ас}$. Это видно из эквивалентной схемы включения лампы (рис. 5а), соответствующей схеме простейшего усилительного каскада. Очевидно, что через емкость $C_{ас}$ создается непосредственная емкостная связь между анодной и сеточной цепями лампы. Во многих случаях эта связь вредна, так как она приводит к воздействию анодной цепи на сеточную, что вносит искажения в усиление сигналов, а иногда полностью прекращает работу усилителя.

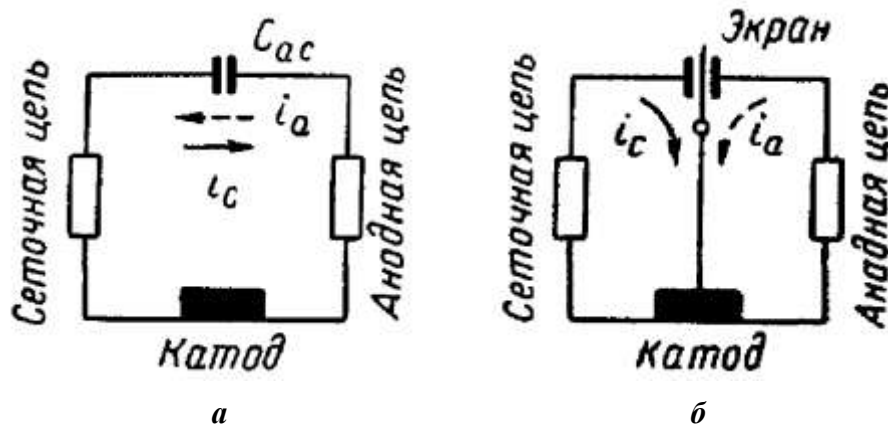


Рис. 5

Установив между анодом и управляющей сеткой триода электростатический экран, соединенный с катодом лампы (рис. 5б), можно разобщить анодную и сеточную цепи. Токи этих цепей будут в основном замыкаться через экран, не проникая из одной цепи в другую.

Для того чтобы доступ электронов к аноду не прекращался, экран должен быть выполнен в виде сетки. Эта дополнительная сетка C_2 носит название *экранирующей*. Лампы, обладающие четырьмя электродами, называются *тетрадами*. К экранирующей сетке подается постоянное положительное напряжение, величина которого в зависимости от конструкции и назначения лампы составляет 30–90% анодного напряжения. Поле экранирующей сетки ускоряет движение к аноду электронов, прошедших от катода через ячейки управляющей сетки. В цепи сетки C_2 протекает постоянный ток.

Наличие двух сеток между анодом и катодом приводит к тому, что изменение анодного напряжения в тетроде меньше влияет на результирующее электрическое поле на участке управляющая сетка – катод, чем в триоде. Это значит, что коэффициент усиления и внутреннее сопротивление лампы с введением в нее экранирующей сетки сильно возрастают при почти неизменной крутизне.

Таким образом, преимуществами тетрода по сравнению с триодом являются малая величина емкости анод-сетка и больший коэффициент усиления.

Анодные характеристики тетрода (рис. 6) имеют участки с отрицательным сопротивлением, на которых увеличению анодного напряжения соответствует уменьшение анодного тока. Этот эффект объясняется влиянием вторичной эмиссии.

Анод и экранирующая сетка, имеющие положительный потенциал по отношению к катоду, под действием электронной бомбардировки начинают сами эмитировать электроны (вторичные). Последние от эмитирующего электрода могут уходить к соседнему, если он обладает более высоким потенциалом. При малых анодных напряжениях характеристики имеют крутой подъем (участок АВ), которому у ламп, рассчитанных на работу с анодным напряжением 250 в, соответствует $u_a < 15-20$ В. При

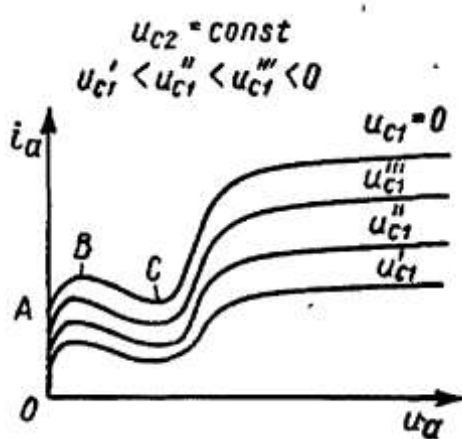


Рис. 6

дальнейшем росте анодного напряжения до величины, равной u_{c2} , вторичные электроны, покидающие анод, притягиваются экранирующей сеткой. В результате анодный ток уменьшается (участок ВС). Когда анодное напряжение начинает превышать u_{c2} на 5–10 В, все вторичные электроны, эмитируемые анодом, возвращаются к нему, анодный ток возрастает и характеристики соответствуют увеличению анодного тока при росте анодного напряжения. Уменьшение тока, вызываемое вторичной эмиссией, называется *динатронным эффектом*.

Благодаря этой особенности тетроды могут применяться лишь в тех случаях, когда анодное напряжение при работе постоянно превышает напряжение на экранирующей сетке. Поэтому **тетроды редко используются в качестве приемно-усилительных ламп. Они, главным образом, применяются в ламповых генераторах.**

Поэтому **тетроды редко используются в качестве приемно-усилительных ламп. Они, главным образом, применяются в ламповых генераторах.**

ПЯТИЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ

Для устранения динатронного эффекта между анодом и экранирующей сеткой лампы устанавливают дополнительный электрод, препятствующий уходу вторичных электронов от анода к экранирующей сетке. Этот электрод называют *защитной сеткой*. Лампа, имеющая пять электродов, называется *пентодом*. **Пентод является основным типом усилительной и генераторной лампы.** Для того, чтобы вторичные электроны не могли пройти между витками защитной сетки, она должна иметь потенциал более низкий, чем у анода и экранирующей сетки. Часто защитную сетку соединяют внутри лампы непосредственно с катодом.

При более высоком, чем у анода, потенциале экранирующей сетки вторичные электроны, направляющиеся к ней от анода, будут тормозиться защитной сеткой. Точно так же будут тормозиться вторичные электроны, направляющиеся к аноду от экранирующей сетки, когда потенциал анода выше потенциала этой сетки. Таким образом, вторичные электроны, покидающие эмитирующий электрод с небольшими скоростями, не могут достигнуть другого электрода, обладающего более высоким потенциалом. Первичные же электроны, вышедшие из катода, при подходе к защитной сетке имеют большие скорости и поэтому преодолевают тормозящее поле сетки.

У пентодов всех типов управляющая сетка выполняется с отверстиями таких размеров, которые обеспечивают достаточно эффективное управление анодным током при работе лампы с отрицательным потенциалом этой сетки, т. е. без сеточных токов. Экранирующая сетка делается более густой, а защитная – более редкой, чем управляющая. Это соответствует рассмотренному назначению сеток: экранирующая сетка, как и в тетроде, должна умень-

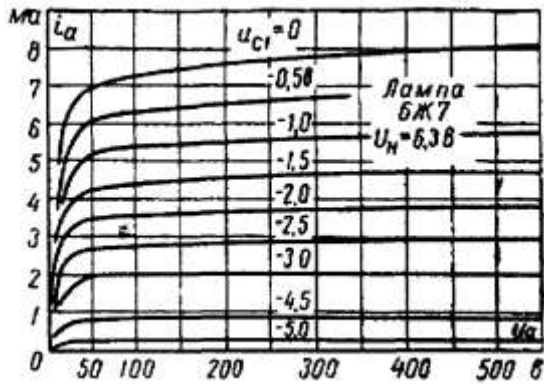


Рис. 7

шать емкость C_{ac} , а защитная – обеспечивать небольшое понижение потенциала, достаточное для того, чтобы воспрепятствовать движению вторичных электронов от эмитирующих поверхностей, но не создающее значительного противодействия пролету первичных электронов к аноду.

В высокочастотных пентодах междуэлектродная емкость между анодом и управляющей сеткой составляет порядка 0,003–0,006 пФ. Их коэффициент усиления достигает 1200–2000 и более; внутреннее сопротивление – 0,8–2,5 Мом.

На экранирующую сетку этих пентодов

подают напряжение u_{c2} , составляющее 40–50% номинального анодного напряжения.

На рис. 7 изображены статические анодные характеристики высокочастотного пентода. Его рабочий режим обычно соответствует участку характеристики, при котором внутреннее сопротивление лампы очень велико (горизонтальные участки кривых).

Низкочастотные пентоды экранируются значительно слабее высокочастотных. Экранирующая сетка делается здесь более редкой, экранирующие манжеты отсутствуют. Их коэффициент усиления составляет 150–600, а внутреннее сопротивление 50–100 кОм (значительно меньше, чем у пентодов высокой частоты).

К экранирующей сетке пентодов низкой частоты подводится напряжение, составляющее 75–100% величины анодного напряжения.

Если изменять напряжение на защитной сетке, то при неизменных напряжениях на других электродах лампы будет существенно изменяться анодный ток. Иногда эту сетку используют в качестве дополнительного управляющего электрода.

ЛУЧЕВОЙ ТЕТРОД

В лучевом тетроде (рис. 8) на анод 1 падают электроны, собранные в узкие мощные пучки – лучи. Концентрированный электронный поток в пространстве между экранирующей сеткой 2 и анодом создает объемный отрицательный заряд большой плотности. Поэтому в указанном пространстве на некотором расстоянии от анода создается минимум потенциала. Вторичные электроны, вылетевшие из анода, отталкиваются областью низкого потенциала и возвращаются на анод, не достигая экранирующей сетки. Первичные же электроны, успевшие приобрести к моменту прохода через отверстия экранирующей сетки большие скорости, достигают анода.

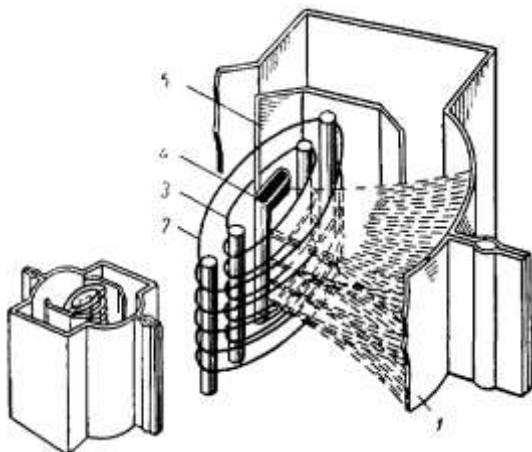


Рис. 8

Для концентрации электронного потока в форме пучков управляющая сетка 3 и экранирующая сетка 2 выполняются с одинаковым шагом намотки и расположением витков, этих сеток в створе относительно друг друга. Поля сеток при этом фокусируют электронные потоки в вер-

тикальной плоскости, разбивая их на пучки в отверстиях сетки. Эти пучки расходятся далее веерообразно по мере приближения к аноду. Кроме того, в лампе устанавливаются две экранирующие пластины 5, соединенные с катодом. Эти пластины, имеющие потенциал катода, закрывают путь электронам от торцовых поверхностей катода 4 и тем самым концентрируют потоки в горизонтальной плоскости.

В анодных характеристиках лучевого тетрода нет участков с отрицательным сопротивлением. В остальном они подобны характеристикам обычных тетродов.

Лучевые тетроды обладают большими значениями крутизны и значительными величинами максимальной мощности. Токи экранирующей сетки невелики и составляют 5–7% анодного тока. Эти лампы находят применение в схемах усиления мощности на частотах до 100 кГц. На более высоких частотах лучевой тетрод применяется реже из-за относительно больших величин емкости между анодом и управляющей сеткой.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАМПАХ

Комбинированные лампы

В современных электронных устройствах часто применяются лампы, содержащие в одном баллоне несколько однотипных или разнотипных систем электродов. Такие лампы называются комбинированными (рис. 9). Простейшими комбинированными лампами являются двойной диод и двойной триод. Первый может иметь два анода и общий катод (рис. 9а) или в каждой системе самостоятельный катод (рис. 9б).

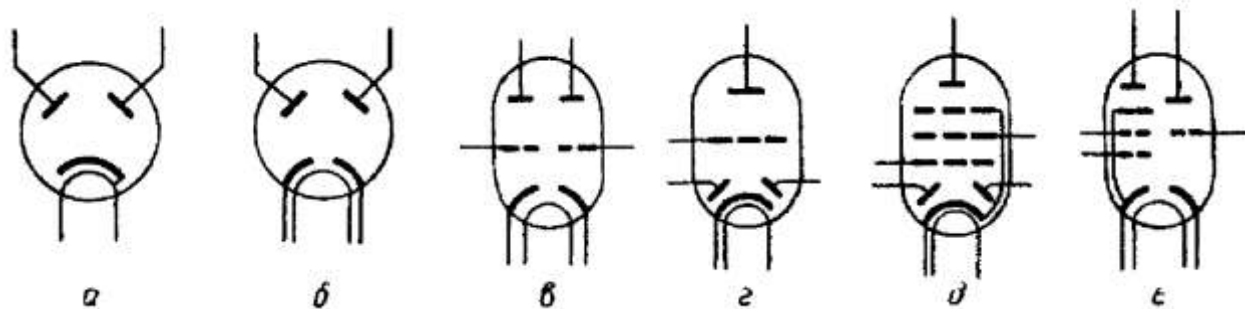


Рис. 9

Обе системы электродов двойного триода также могут иметь общий или отдельные катоды (рис. 9в). К более сложным комбинированным лампам относятся, например, двойной диод-триод (рис. 9г), двойной диод-пентод (рис. 9д), триод-пентод (рис. 9е).

Использование комбинированных ламп позволяет упростить монтаж и уменьшить размеры электронных устройств.

Собственные шумы электронных ламп

Самопроизвольные изменения тока в электрических цепях, носящие нерегулярный (флуктуационный) характер, принято называть шумами.

Свободные электроны, содержащиеся в электрическом проводнике и находящиеся в неупорядоченном тепловом движении, перемещаются так, что в каждый момент времени в одном направлении движется большее число электронов, чем в другом. Это создает переменную разность потенциалов на концах разомкнутого проводника, называемую напряжением тепловых шумов.

Переменное напряжение тепловых шумов имеет непериодический характер. Спектральный анализ показывает, что составляющие этого напряжения распределены по всему спектру частот, начинающемуся от самых низких и простирающемуся до самых высоких (белый шум).

Энергия тепловых шумов характеризуется действующим значением шумового напряжения в диапазоне частот Δf :

$$U_{ш} = \sqrt{4kTR\Delta f},$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,374 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, T – температура в К, R — активное сопротивление.

Это напряжение при замыкании активного сопротивления R накоротко создает ток

$$I_{ш} = \frac{U_{ш}}{R} = \sqrt{\frac{4kTR\Delta f}{R}}.$$

При работе электронных ламп в них возникают флуктуационные токи шумов, существующие независимо от изменения приложенных к электродам напряжений. Современные ламповые усилители позволяют получать очень большие усиления малых переменных напряжений и токов. Однако максимальное усиление ограничивается собственными шумами, вносимыми электронными лампами и другими элементами схемы усилителя.

Для того чтобы на выходе усилителя можно было выделить полезный сигнал из собственных шумов, амплитуда напряжения сигнала должна быть здесь в определенное число раз больше напряжения собственных шумов (если не использовать специальных методов обработки).

Причины появления флуктуационных токов в лампах следующие:

- *Дробовой эффект.* Он заключается в неравномерности эмиссии, т. е. в том, что катод эмитирует в разные промежутки времени неодинаковое количество электронов в единицу времени.
- *Эффект мерцаний катода, или фликер-эффект.* Его действие проявляется в изменении эмиссионных свойств отдельных участков катода. Этот эффект может служить причиной значительных колебаний анодного тока с низкой частотой.
- *Ионизации остаточных газов* в колбе.
- *Собственные тепловые движения электронов* в пространственном заряде.

В лампах с сетками флуктуационные токи больше, чем в диодах, так как здесь эти токи возрастают вследствие неравномерности во времени вторичной эмиссии и перераспределения тока между электродами.

Шумы, возникающие в усилительных лампах, удобно оценивать величиной эквивалентного сопротивления шумов $R_{ш}$, выраженной в омах. Под $R_{ш}$ понимается сопротивление, создающее напряжение тепловых шумов, равное напряжению, которое нужно приложить между управляющей сеткой и катодом лампы, чтобы получить на ее выходе шумы с энергией, равной энергии собственных шумов лампы. Величина $R_{ш}$ для триодов равна 0,5–1,5 кОм, для высокочастотных пентодов 2–5 кОм. В специальных «малозумящих» триодах и пентодах $R_{ш}$ снижено до 100 — 300 Ом.

Шумы усилительных ламп выражают также непосредственно в величинах эквивалентного напряжения $U_{шэ}$, которое нужно приложить к управляющей сетке, чтобы на выходе лампы получить шумы с энергией, равной энергии собственных шумов лампы в полосе частот, равной 1000 Гц.

Маркировка усилительных ламп

Маркировка лампы состоит из четырех элементов. **Первый** элемент обозначает величину напряжения накала с округлением до целых единиц. **Второй** элемент – буква – характеризует тип лампы: Д — диоды; Х – двойные диоды; Ц – кенотроны; С – триоды; Н – двой-

ные триоды; Э – тетроды; К – пентоды с удлиненной характеристикой; Ж – пентоды с короткой характеристикой; П – мощные пентоды и лучевые тетроды низкой частоты; Г – триоды с одним или двумя диодами; Б – пентоды с одним или двумя диодами; Ф – триод-пентоды; Е – индикаторы настройки. **Третий** элемент – число – обозначает модель лампы. **Четвертый** элемент – буква – указывает на конструктивное оформление лампы: С – лампа со стеклянным баллоном и пластмассовым цоколем; П – пальчиковая лампа диаметром 19 и 22,5 мм; Б – цельностеклянная сверхминиатюрная лампа диаметром 10 мм, А – такая же лампа диаметром 6 мм, а Р – диаметром до 4 мм, Ж – лампа типа «желудь». Лампы с металлическим баллоном четвертого элемента в условном обозначении не имеют.

ВАКУУМНЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом

Фотоэлементами называются приборы, осуществляющие преобразование световой энергии в электрическую. Действие фотоэлементов основано на явлении *фотоэффекта*, заключающегося в том, что при освещении металлов или полупроводников электронам этих веществ сообщается дополнительная энергия, достаточная для их выхода из вещества или для освобождения от межуатомных связей.

В первом случае возникает фотоэмиссия электронов, что характеризует *внешний фотоэффект*, во втором – повышается проводимость вещества, или в веществе возникает внутренняя э. д. с., что характеризует *внутренний фотоэффект*. Этот эффект используется в полупроводниках.

Вакуумный фотоэлемент с внешним фотоэффектом представляет собой электронный прибор (рис. 10а), имеющий стеклянный баллон 3, в котором размещены *металлический анод 1* и *фотокатод 2*.

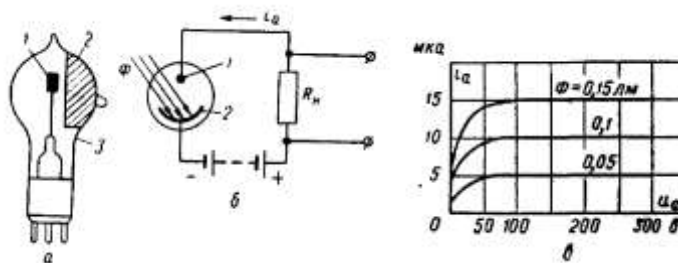


Рис. 10

Под действием лучистой энергии, падающей на катод, последний эмитирует электроны. Фотокатод наносится на подкладку, напылённую на стекло баллона, и светочувствительная поверхность катода обращена внутрь баллона. Применяются катоды двух видов – кислородно-цезиевый и сурьмяно-цезиевый.

Анод фотоэлемента имеет вид кольца или диска из никеля и располагается в центре или в нижней части баллона.

При включении фотоэлемента в цепь внешнего источника напряжения (положительный потенциал подается на анод) в этой цепи проходит ток, величина которого зависит от частоты и интенсивности излучения, действующего на фотокатод. На сопротивлении (рис. 10б), включенном в цепь фотоэлемента, получается пропорциональное току напряжение, которое затем обычно усиливается.

Величина тока эмиссии I_ϕ , определяемого количеством эмитируемых катодом электронов в единицу времени, прямо пропорциональна лучистому потоку Φ , падающему на катод:

$$I_{\phi} = k\Phi,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Максимальная энергия электронов, выходящих из фотокатода, равна

$$E_n = h\nu,$$

т. е. энергии кванта света. Здесь h — постоянная Планка, ν — частота излучения.

При частоте оптического излучения, меньшей некоторой $\nu_{\text{гр}}$, при которой $h\nu$ становится меньше работы выхода электрона из катода, фотоэлектронная эмиссия не осуществляется. Величина $\nu_{\text{гр}}$ называется красной границей фотоэффекта, а соответствующая ей длина волны $\lambda_{\text{гр}}$ — длинноволновым порогом фотоэффекта.

Зависимость фототока от длины волны излучения представляет собой спектральную характеристику фотоэлемента. Кривая спектральной чувствительности обычно имеет максимумы. Например, у прибора с кислородно-цезиевым катодом наибольший фототок может быть получен при $\lambda = 0,80$ мкм и $\lambda = 0,35$ мкм, у прибора с сурьмяно-цезиевым катодом при $\lambda = 0,45$ – $0,5$ мкм.

Вольт-амперные характеристики вакуумного фотоэлемента $i_a = f(u_a)$ при $\Phi = \text{const}$ показаны на *рис. 10в*. При анодных напряжениях, больших u_s — напряжения насыщения (равного 30–70 В в зависимости от величины светового потока), все электроны, эмитированные катодом, достигают анода, и фотоэлемент работает в режиме насыщения.

При работе с малыми световыми потоками существенным является учет тока, протекающего через фотоэлемент в случае полного его затемнения. Этот ток называют темновым. Он складывается из тока термоэлектронной эмиссии катода и тока утечки между электродами. Темновой ток у вакуумных фотоэлементов составляет 0,001–0,1 мкА.

Электронные фотоумножители

В вакуумных фотоэлементах выходные токи имеют величину порядка нескольких микроампер, что обычно вызывает необходимость их усиления. Усиление фототока может быть осуществлено внутри самой фотоэлемента посредством использования явления вторичной электронной эмиссии. Приборы, действующие на этом принципе, называются фотоумножителями (*рис. 11*).

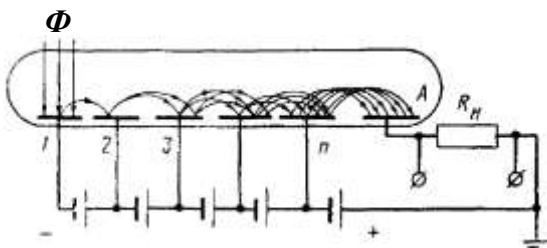


Рис. 11

В фотоумножителях электроны, вышедшие из фотокатода 1, ускоряются электрическим полем, созданным напряжением, приложенным к электродам, и попадают на электрод, активированный цезием — промежуточный эмиттер 2, вызывая в нем вторичную эмиссию. Вторичные электроны бомбардируют следующий промежуточный эмиттер 3, вызывая и здесь вто-

ричную эмиссию, и т. д. Если прибор имеет n вторичных эмиттеров, то ток анода должен превышать ток эмиссии фотокатода в ξ^n раз (ξ — коэффициент вторичной эмиссии). При $\xi = 3$ – 4 и $n = 10$ – 12 осуществляется усиление тока фотокатода в миллион и более раз.

ИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Основные процессы в ионных приборах

Электрические приборы, действие которых основывается на протекании электрического тока, создаваемого движением заряженных частиц в газовой среде, называются *ионными* или *газоразрядными приборами*. В ионных приборах ток, протекающий в газовой среде, создается движением как электронов, так и положительных ионов, образующихся в процессе разряда между электродами прибора.

Ионный ток невелик: он составляет на отдельных участках разрядного промежутка от долей процента до нескольких процентов всего тока. Роль ионов в рабочем процессе состоит в следующем:

- в компенсации ими пространственного отрицательного заряда электронов; поэтому ионные приборы способны пропускать большие токи при малых падениях напряжения между электродами
- ионы оказывают существенное влияние на электронную эмиссию катода, а в некоторых видах приборов полностью определяют ее.

Возбуждение и ионизация частиц газа

В процессах, определяющих действие ионного прибора, наибольшее участие принимают валентные электроны атома. Они могут иметь различные уровни энергии, которым соответствуют определенные потенциальные энергии атома в целом. Низшая энергия валентного электрона соответствует состоянию атома, называемому нормальным. В нормальном состоянии атом может находиться длительное время. Если подвести извне к атому дополнительную энергию, то запас потенциальной энергии атома повысится.

Если энергия будет сравнительно невелика, то атом перейдет в возбужденное состояние; если же энергия будет достаточна, то электрон из валентной зоны перейдет в зону проводимости, т.е. произойдет процесс ионизации атома, превращающий атом в положительный ион.

В возбужденном состоянии атом может находиться около 10^{-8} с, после чего возвращается в нормальное состояние или переходит в другое возбужденное состояние, отвечающее меньшему количеству энергии. При понижении энергетического уровня возбужденного атома освобождающаяся энергия возвращается в виде излучений с длиной волны, зависящей от рода газа, исходного и конечного энергетических уровней. В связи с этим при разряде в газе наблюдается свечение разрядного промежутка.

Ионизация атомов газа в рассматриваемых приборах происходит вследствие:

- взаимодействия заряженных частиц и молекул газа
- действия лучистой энергии (фотоионизация)
- влияния высоких температур (термоионизация).

Основную роль играет первый вид ионизации, осуществляемый при столкновениях электронов с нейтральными атомами (молекулами) газа.

Одновременно с ионизацией при работе ионных приборов происходит и обратный процесс. Положительные ионы и электроны, взаимодействуя друг с другом в объеме разрядного промежутка или при попадании на стенки прибора, восстанавливают нейтральные атомы – происходит рекомбинация.

Виды и формы электрического разряда в газах

При работе ионных приборов используются два вида разряда в газах – *несамостоятельный* и *самостоятельный*. Несамостоятельный разряд возникает и существует лишь при введении заряженных частиц в разрядный промежуток средствами, не зависящими от самого разряда, в частности, вследствие эмиссии электронов катода, накаливаемого независимо от разряда током. Под влиянием напряжения между электродами прибора электроны перемещаются и производят ионизацию газа. Самостоятельный разряд характеризуется тем, что заряженные частицы, являющиеся носителями электричества в промежутке, непрерывно образуются в процессе возникшего разряда, протекающего при наличии напряжения между электродами, без воздействия внешних факторов.

Образующиеся в результате ионизации газа положительные ионы, воздействуя на катод, создают условия для достаточно эффективной электронной эмиссии. Самостоятельный

разряд может возникнуть лишь в результате посторонней ионизации, т. е. в процессе перехода из несамостоятельного.

Формы самостоятельного разряда легко проследить по вольт-амперной характеристике газоразрядного промежутка (рис. 12).

Первый участок АВ относится к начальной стадии, носящей характер несамостоятельного разряда, возникающего под действием внешних ионизаторов – радиоактивных и космических излучений, видимого света. Ток здесь очень мал: 10^{-20} – 10^{-12} А, росту его соответствует резкое увеличение напряжения.

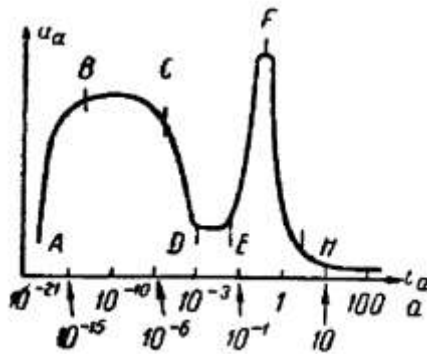
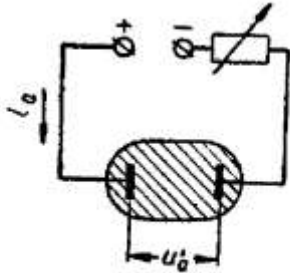


Рис. 12

За точкой В вправо начинаются области самостоятельного разряда, первой стадией которого является темный разряд, характеризующийся токами 10^{-10} – 10^{-7} А и снижением напряжения на промежутке. При этом видимого проявления разряда – свечения еще не наблюдается. Темный разряд неустойчив, если в цепь не включено большое сопротивление, обеспечивающее его стабилизацию.

На участке CD одновременно с резким уменьшением напряжения на промежутке растет ток. Далее наступает устойчивая форма разряда – нормальный тлеющий разряд (участок DE). Напряжение в точке D называют напряжением зажигания тлеющего разряда. Этот разряд протекает при холодном катоде, который эмитирует электроны под действием бомбардировки его ионами, приходящими из разрядного промежутка. Нормальный тлеющий разряд характеризуется большим падением потенциала Δu_k на катодном участке, называемом *нормальным катодным падением напряжения*. Большая величина Δu_k (около сотни вольт) определяется объемным положительным зарядом, создаваемым ионами около катода.

На катодном участке разряда испускаемые катодом электроны получают скорости, достаточные для ионизации газа. Образующиеся же положительные ионы, двигаясь к катоду, приобретают энергию, обеспечивающую эмиссию катодом такого количества электронов, которое необходимо для поддержания самостоятельного разряда. В различных участках разряда, в том числе и на катоде, заметно свечение. При уменьшении внешнего сопротивления, включенного в цепь промежутка, или увеличении напряжения растет ток, и свечение, занимающее при малых токах часть катода, распространяется на все большую его поверхность. Пока весь катод не покроется свечением, плотность тока на катоде остается постоянной. Таким образом, токи нормального тлеющего разряда определяются полезной площадью катода.

Участок EF относится к аномальному тлеющему разряду, наступающему, когда весь катод покрывается свечением. При этом возрастает плотность тока электронной эмиссии катода, что приводит к увеличению катодного падения напряжения и соответственно напряжения разрядного промежутка u_a .

Вправо от точки F находится участок перехода от нормального тлеющего разряда к дуговому. При большой плотности тока тлеющего разряда на катоде последний начинает разогреваться. Катод из тугоплавкого материала получает такую температуру, при которой возникает термоэлектронная эмиссия.

У жидкого ртутного катода при сравнительно низких температурах начинает испаряться ртуть. На очень малых расстояниях от катода возникает ионизация ртутных паров,

причем положительные ионы создают у поверхности ртути электрическое поле, обеспечивающее появление автоэлектронной эмиссии. В обоих случаях возникает самостоятельный дуговой разряд, при котором в отличие от тлеющего разряда катодное падение напряжения имеет небольшую величину – около 10 В. Напряжение на промежутке падает до одного-двух десятков вольт, а токи возрастают, достигая в некоторых приборах тысяч ампер. Для появления дугового разряда необходимо, чтобы напряжение, подведенное к электродам извне, превышало величину напряжения аномального тлеющего разряда в точке F. Последнее в зависимости от типа катода, состава и давления газа может иметь значение от сотен до десятков тысяч вольт. Дуговой разряд может возникнуть при значительно меньших напряжениях в том случае, если в промежутке имеются остаточные заряженные частицы от ранее горевшей дуги.

Ионные приборы с несамостоятельным дуговым разрядом

Газотроны

Газотрон представляет собой ионный прибор, содержащий анод и накаливаемый катод, помещенный в стеклянном или металлическом баллоне, заполненном инертным газом или ртутными парами при давлении, меньшем атмосферного. Катод эмитирует электроны, которые под действием внешнего напряжения, создающего поле в приборе, устремляются к положительному аноду. Приобретая скорости, достаточные для ионизации молекул газа, эти электроны ионизируют газовую среду и образуют ионы и вторичные электроны. Последние вместе с первичными электронами под действием сил поля перемещаются к аноду. Ионы же из газового промежутка направляются к катоду.

Ток обратного направления при нормальных условиях протекать не может ввиду невозможности эмиссии электронов с анода. Этим определяется *вентильное действие* газотрона.

У ртутных газотронов нижняя часть колбы имеет вытянутую горловину, где помещается капля ртути, обеспечивающая заполнение прибора ртутным паром после включения цепи накала.

Ионизированный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных заряженных частиц почти одинаковы, называют *плазмой*. Благодаря взаимной компенсации объемных положительных и отрицательных зарядов в плазме напряженность поля, необходимая для их перемещения к электродам прибора, невелика.

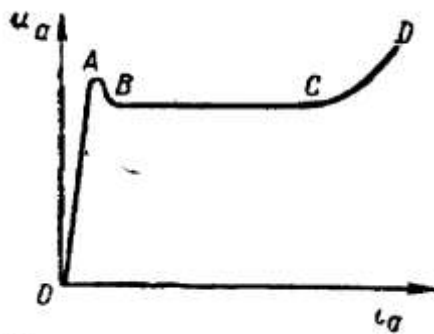


Рис. 13

Величина u_a в газотронах составляет 10–18 В при заполнении ртутными парами и 14–20 В – при газовом заполнении.

Вольт-амперная характеристика газотрона дана на *рис. 13*. Участок OA показывает, что при плавном увеличении напряжения от нуля протекают небольшие токи. Здесь нет существенной ионизации газа, и разряд носит электронный характер. Точка A соответствует возникновению дугового разряда (напряжение зажигания), при котором ток ограничивается сопротивлением внешней цепи. На участке BC напряжение между электродами мало зависит от тока нагрузки.

В точке C рабочий ток достигает величины тока собственной термоэлектронной эмиссии катода. Работа на участке CD недопустима, так как она приводит к разрушению катода.

Газотроны применяются главным образом для выпрямления переменного тока и характеризуются меньшим падением напряжения в анодной цепи и более высоким к.п.д., чем кенотроны.

Кенотрон, пропуская токи от единиц до сотен миллиампер, работает при потерях напряжения в приборе в сотни вольт, причем оно растет с увеличением тока. Газотроны пропускают анодные токи в десятки ампер, имея падение напряжения в приборе, равное лишь полутора-двум десяткам вольт, практически не зависящее от анодного тока.

Тиратроны с накаливаемым катодом

Тиратрон с накаливаемым катодом имеет три электрода: анод 1, катод 2 с подогревателем 3 и управляющую сетку 4 (рис. 14). Существуют тиратроны с несколькими управляющими сетками. Так же, как и газотроны, тиратроны заполняются нейтральными газами – криптоном, ксеноном и их смесями или ртутными парами. Газовое заполнение вследствие меньшей зависимости плотности газа от изменений внешней температуры применяют для приборов, которые должны работать в условиях широкого диапазона изменений температур окружающего воздуха.

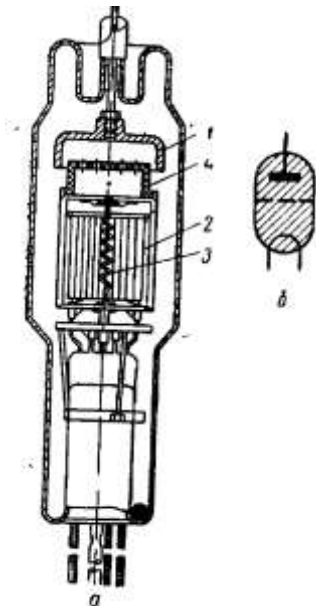


Рис. 14

Действие сетки в тиратроне сводится к управлению моментом зажигания дуги. Это поясняется анодно-сеточной характеристикой тиратрона, снятой при неизменном анодном напряжении (рис. 15).

При достаточно большом отрицательном напряжении на сетке анодный ток равен нулю. Лишь на начальном участке АВ характеристики вместе с ростом сеточного напряжения плавно нарастает ток, но величина его ничтожно мала относительно рабочих токов прибора.

При возрастании сеточного напряжения до величины $u_{сз}$ ток скачком повышается до своего наибольшего значения (участок ВС), которое зависит от внешнего сопротивления, включенного в анодную цепь прибора (при достаточной эмиссии катода). Напряжение $u_{сз}$ в точке В соответствует возникновению дугового разряда. После этого величина тока остается постоянной при каких угодно изменениях потенциала сетки (линия DF).

После зажигания дуги в тиратроне сетка теряет свои управляющие свойства. Плавное изменение анодного тока тиратрона путем изменения сеточного напряжения невозможно.

Для ограничения сеточных токов в цепь сетки обычно включают активные сопротивления большой величины: от нескольких кОм до 1 МОм.

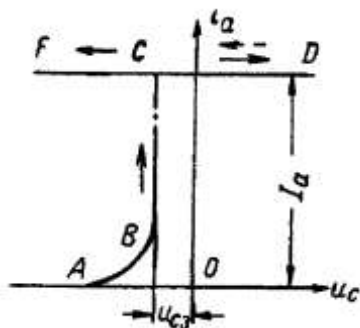


Рис. 15

Восстановление управляющих свойств сетки происходит через некоторое время после гашения дуги. Интервал от момента прекращения дугового разряда до момента, когда в анодную цепь может быть подано рабочее напряжение без возобновления дуги, называют *временем восстановления запирающих свойств сетки* t_e . Величина t_e зависит от газа и его давления, анодного тока, конструктивных размеров тиратрона. Например, у тиратронов с ртутными парами $t_e = 0.1-1$ мс. У приборов, заполненных водородом, время восстановления запирающих свойств сетки примерно в 10 раз меньше.

Вольт-амперная характеристика тиратрона имеет такую же форму, как у газотрона, но отличается тем, что величина анодного напряжения, при котором возникает дуговой разряд, меняется в зависимости от сеточного напряжения. Общее падение напряжения для тиратронов с заполнением инертным газом не превышает 20–22 В, а для ртутных – 16–20 В.

Кроме максимального обратного напряжения $U_{обр.макс}$, которое прибор выдерживает без появления в нем обратного зажигания, тиратрон характеризуется также наибольшим прямым напряжением $U_{пр.макс}$. Оно представляет собой напряжение между электродами, при котором сетка в состоянии надежно запирает тиратрон, если к ней подведено отрицательное напряжение определенной величины U_c .

Обычно U_c составляет 60–80 В. Для большинства типов отечественных тиратронов $U_{обр.макс} = U_{пр.макс}$

Маломощные тиратроны с накаливаемым катодом для средних значений анодных токов 0,1–1 А и $U_{обр.макс} = 0,3—1,3$ кВ широко применяются в различных электронных устройствах релейного действия, в электронных генераторах пилообразного напряжения осциллографов и т. д. Мощные тиратроны, рассчитанные на средние анодные токи 5–85 А и $U_{обр.макс} = 1,3–1,5$ кВ, используются в релейных схемах, а также в выпрямительных устройствах с регулированием напряжения сетками.

РТУТНЫЕ ВЕНТИЛИ

Ртутными вентилями называют ионные приборы, имеющие ртутный катод и работающие с электрической дугой самостоятельного разряда, горячей в парах ртути.

Ртутный вентиль (рис. 16) представляет собой сосуд 1, содержащий один катод 2, заполненный жидкой ртутью, один (у одноанодного вентиля) или несколько (у многоанодного вентиля) рабочих анодов 3 и вспомогательные электроды 4, предназначенные для зажигания и поддержания дуги. Аноды делаются из стали или графита, а сосуд – из стали или стекла. Эти материалы не вступают в соединение с ртутью. Катод располагается в углублении нижней части сосуда, анод устанавливается над катодом. При работе вентиля он заполнен ртутным паром, образующимся вследствие испарения ртути с открытой поверхности катода.

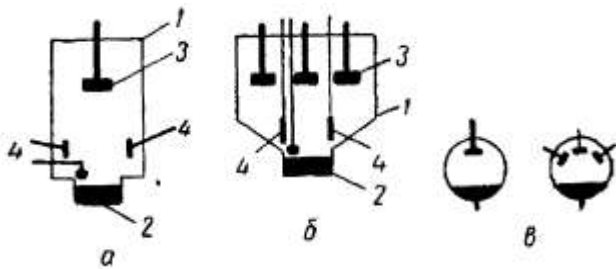


Рис. 16

Искусственно вызванная в момент пуска дуга пропускает ток от положительного анода к катоду. Дуга возникает на аноде, когда нарастающее напряжение между ним и катодом достигает величины напряжения зажигания. После возникновения дуги напряжение между электродами вентиля снижается до величины напряжения горения. Когда напряжение между анодом и катодом становится меньше напряжения горения дуги, она гаснет. При питании цепи вентиля от источника переменного напряжения дуга гаснет перед каждым переходом напряжения в отрицательную область и вновь зажигается, когда напряжение на аноде становится положительным и равным напряжению зажигания. Этим определяется вентильное действие прибора.

Для возникновения дуги при напряжениях, не очень сильно превышающих напряжение ее горения, необходимо обеспечить к моменту ее повторного зажигания сформированный источник эмиссии электронов на катоде. Для этого в вентиле создается вспомогательная дуга, горящая постоянно или возникающая в каждый период переменного напряжения перед зажиганием главной дуги.

Применение ртути для катода дает большие преимущества. Катод не изнашивается, так как ртуть, испаряясь, конденсируется на охлаждаемых стенках сосуда и стекает обратно к катоду. При достаточном вакууме в сосуде и отсутствии посторонних газов ртуть не окисляется. Ртутный катод позволяет получить очень большие плотности тока эмиссии, достигающие до 10^6 А/см². Ртутные вентили могут снабжаться управляющими сетками, действие которых аналогично рассмотренному действию сетки в тиратроне.

Вольт-амперную характеристику ртутного вентиля (рис. 17) строят как кривую, выражающую зависимость среднего значения напряжения горения дуги U_a от среднего значения тока $I_{a,ср}$ за время горения дуги.

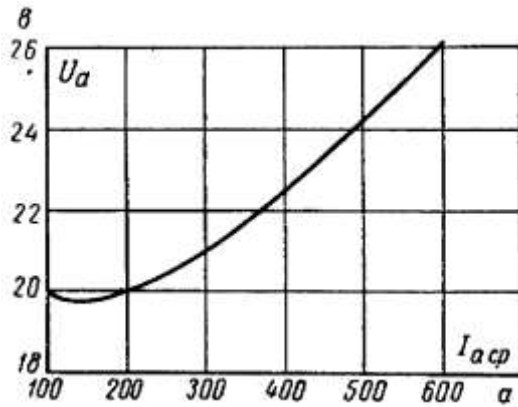


Рис. 17

Падение напряжения в дуге U_a при малых токах нагрузки из-за малой ионизации относительно велико. С повышением нагрузки U_a , сначала уменьшается ввиду уменьшения напряженности поля в столбе дуги, а затем начинает снова возрастать. Этот рост обусловлен увеличением падения в участках сужения дуги, увеличением потерь на стенках от рекомбинации, а в некоторых случаях — недостаточностью давления пара, ограничивающей развитие более интенсивной ионизации. Величина U_a колеблется от 18 до 30 В в зависимости от тока нагрузки, давления ртутного пара, конструктивного выполнения вентиля. У одноанодных вентилях она меньше, чем у многоанодных.

Величина обратного тока, протекающего через вентиль, когда анод отрицателен по отношению к катоду, измеряется миллиамперами (максимальная величина 100–200 мА, среднее значение 10–20 мА) и не имеет в нормальных условиях существенного значения. Однако при ненормальных условиях на аноде могут быть созданы центры интенсивной электронной эмиссии, в результате чего может возникнуть дуга обратного зажигания, в результате чего прибор потеряет вентильные свойства.

По способу создания начальной эмиссии с катода, необходимой для зажигания основной дуги, различают два вида ртутных вентилях — экситроны и игнитроны.

Экситронами называются вентили с постоянно горящей вспомогательной дугой, которая непрерывно поддерживается при помощи вспомогательных анодов, называемых анодами возбуждения, и питаемых независимо от цепи рабочего тока.

Игнитронами называются вентили, в которых вспомогательная дуга, необходимая для создания начальной эмиссии не имеет непрерывного характера, а зажигается кратковременно в каждый положительный полупериод переменного напряжения накануне возникновения главной дуги.

ПРИБОРЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Стабилитрон тлеющего разряда

Стабилитроном называется прибор, предназначенный для поддержания постоянства величины выходного напряжения постоянного тока при изменениях величины нагрузочного тока.

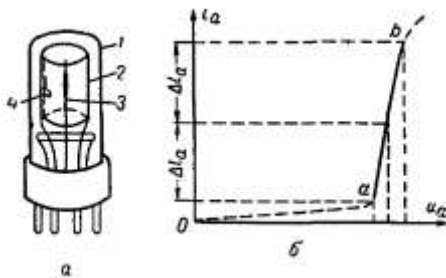


Рис. 18

Двухэлектродный стабилитрон тлеющего разряда (рис. 18, а) состоит из стеклянного баллона 1, содержащего цилиндрический никелевый активированный либо чисто молибденовый катод 2 и анод 3, выполненный в виде проволоки, находящейся внутри катода. Баллон заполняется неоном с примесью аргона при давлении 20–30 мм.рт.ст.

Между электродами зажигается и горит нормальный тлеющий разряд. Вольт-амперная характеристика такого стабилитрона имеет участок, на котором падение напряжения в приборе остается приблизительно не зависящим от тока (рис. 18, б). Это падение напряжения определяет величину стабильного напряжения.

Для создания тлеющего разряда к стабилитрону должно быть подведено напряжение, не меньшее чем напряжение зажигания темного разряда (см. точку В на *рис. 12*). Для уменьшения величины напряжения зажигания катод стабилитрона снабжают выступающим стержнем 4, уменьшающим расстояние от катода до анода.

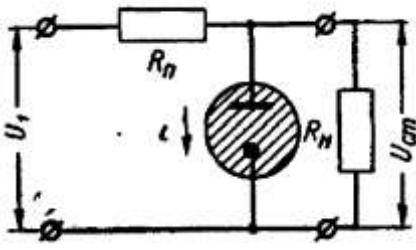


Рис. 19

Стабилитрон подключается параллельно нагрузочному сопротивлению R_n , на зажимах которого должно быть стабильное напряжение U_{cm} (*рис. 19*). Источник изменяющегося напряжения U_1 присоединен к стабилитрону через поглощающее сопротивление R_n . Рост напряжения U_1 приводит к увеличению тока, протекающего через стабилитрон, и напряжения на поглощающем сопротивлении, но напряжение между электродами U_{cm} остается почти неизменным.

Прибор обеспечивает стабилизацию напряжения при колебаниях напряжения U_1 , не выходящих за пределы, при которых существует нормальный тлеющий разряд, т. е. только при использовании участка *ab* вольт-амперной характеристики.

Чем больше величина поглощающего сопротивления, тем при больших колебаниях питающего напряжения может быть обеспечена нормальная работа стабилитрона.

Существуют многоэлектродные стабилитроны с несколькими включенными последовательно разрядными промежутками, помещенными в один баллон. Такой прибор может выполнять функции стабилизатора и делителя напряжения. Electroды его выполняются в виде коаксиальных цилиндров и имеют активированные поверхности. Каждый электрод снабжен самостоятельным, выводом.

Наибольшее допустимое значение тока, приводящее к переходу разряда в аномальный, для разных электродов многоэлектродного стабилитрона имеет разные значения, так как площади электродов здесь неодинаковы. В приборе, заполненном неоном и имеющем пять электродов, содержатся четыре разрядных промежутка. При общем напряжении 280 в этот прибор обеспечивает стабилизированное напряжение около 70 в между каждой парой смежных электродов.

Стабилитроны тлеющего разряда широко применяются в блоках питания устройств промышленной электроники.

Сигнальные и цифровые лампы тлеющего разряда

Сигнальная лампа тлеющего разряда содержит два металлических электрода, помещенных в стеклянный баллон, заполненный нейтральным газом (обычно неоном с примесью 0,5% аргона) при давлении 20–30 мм.рт.ст. При наличии напряжения между электродами лампа светится за счет лучистой энергии, испускаемой из катодной части тлеющего разряда.

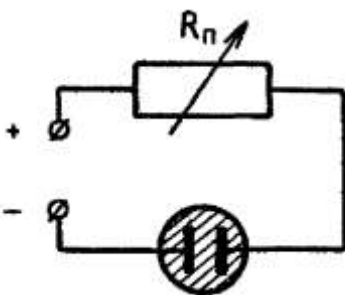


Рис. 20

Лампа используется в основном в качестве светового индикатора наличия напряжения в электрической цепи.

У ламп, предназначенных для работы при переменном напряжении, оба электрода выполняются одинаковыми. Лампы, питаемые постоянным напряжением, снабжаются активированным катодом и чисто металлическим анодом, имеющим форму кольца, не заслоняющего катодное свечение.

Лампа включается последовательно с поглощающим сопротивлением (*рис. 20*), ограничивающим ток до величины, при которой существует тлеющий разряд без перехода в дуговой.

Цифровая индикаторная лампа тлеющего разряда содержит десять катодов, каждый из которых сделан из нихромовой проволоки, изогнутой по профилю цифры (от 0 до 9). Катоды расположены один за другим по оси лампы и имеют независимые выводы. Два анода лампы выполнены из тонкой сетки, почти не заслоняющей световое излучение с катодов. Один анод расположен впереди всех проволочных цифр непосредственно под смотровым стеклом лампы, а другой – посередине между катодами. В зависимости от того, какой из катодов вводится в цепь питающего напряжения, появляется светящееся изображение той или иной цифры, создаваемое свечением, равномерно распределенным по длине проволоки катода.

Безнакальные тиратроны

Безнакальным тиратроном называется прибор тлеющего разряда, имеющий кроме анода и катода специальный пусковой электрод, при помощи которого осуществляется управление зажиганием разряда.

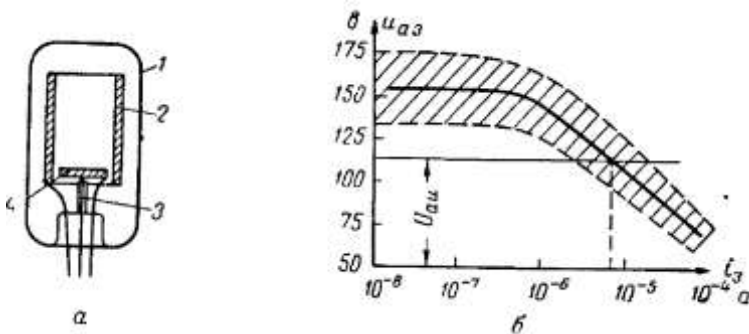


Рис. 21

Стеклоанный герметически закрытый баллон 1 прибора (рис. 21,а) заполняется неоном с примесью аргона при давлении 20–30 мм.рт.ст. Катод 2 выполняется в виде цилиндра из металла, активированного цезием. Анод 3 представляет собой молибденовый стержень, помещенный в стеклянную трубку с выступающим из стекла свободным концом. Пусковой электрод-сетка 4 из никеля

имеет форму диска с центральным отверстием и расположен между анодом и катодом.

При подведении к сетке положительного напряжения по отношению к катоду вначале возникает разряд между сеткой и катодом, который затем переходит на анод, если последний имеет положительный потенциал достаточной величины. Начальный разряд между сеткой и катодом, называемый подготовительным, создает в промежутке сетка–катод концентрацию электронов и ионов, облегчающих возникновение разряда в цепи анод–катод.

На рис. 2.21,б жирной линией показана характеристика зажигания тиратрона, дающая зависимость анодного напряжения u_{a3} , при котором происходит переброс разряда от сетки на анод, от тока подготовительного разряда i_3 .

Заштрихованная область соответствует разбросу значений u_{a3} , что объясняется непостоянством условий формирования подготовительного разряда.

Тиратрон оказывается запертым до тех пор, пока ток подготовительного разряда не достигнет значения i_3 , соответствующего точке пересечения характеристики зажигания с прямой, имеющей ординату, равную напряжению питания анодной цепи тиратрона U_{au} .

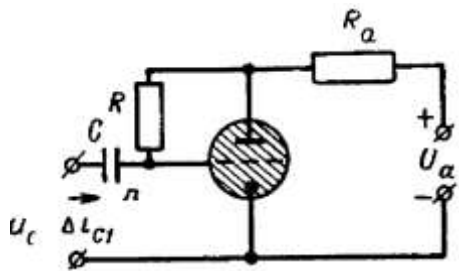


Рис. 22

Схема включения тиратрона (рис. 22), кроме нагрузочного сопротивления анодной цепи R_a содержит сопротивление R порядка десятков МОм. Через это сопротивление и сеточную цепь непрерывно протекает ток порядка десятых долей мкА, соответствующий первой стадии темного разряда. Наличие этого тока уменьшает разброс значения u_{a3} и сокращает время формирования разряда.

Для отпирания тиратрона в сеточную цепь вводится короткий импульс тока Δi_{C1} через разделительный кон-

денсатор С, отделяющий входную цепь от источника постоянного напряжения, питающего тиратрон.

Падение напряжения между анодом и катодом в безнакальных тиратронах, поскольку здесь происходит тлеющий разряд, значительно больше, чем в тиратронах с накаливаемым катодом, а анодные токи – меньше. Безнакальные тиратроны не требуют затрат энергии на накал и при включении в схему немедленно готовы к работе.

Безнакальные тиратроны и другие безнакальные ионные приборы, которые часто объединяются под общим названием «лампы с холодным катодом», получили большое распространение в электронно-вакуумной аппаратуре. В устройствах, в которых можно построить схему на лампах с холодным катодом, выполняющую те же действия, которые осуществляются с помощью электронных ламп или полупроводниковых триодов, удастся уменьшить габаритные размеры аппаратуры, снизить ее стоимость, упростить и удешевить эксплуатацию.

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИНДИКАТОРЫ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Для измерения интенсивности радиоактивных излучений широко применяются газоразрядные приборы – *ионизационные камеры* и *газоразрядные счетчики*.

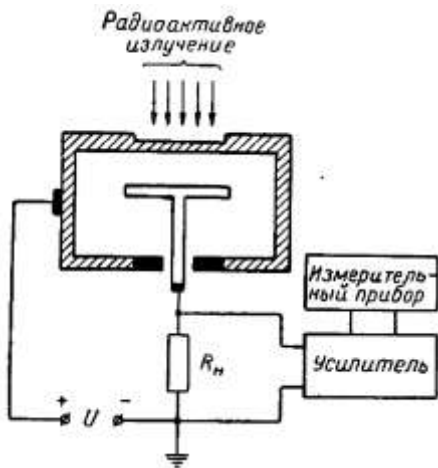
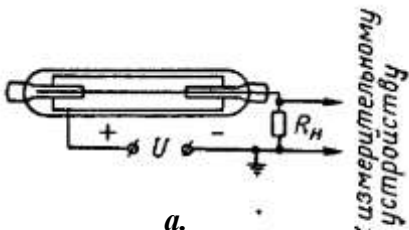


Рис. 23

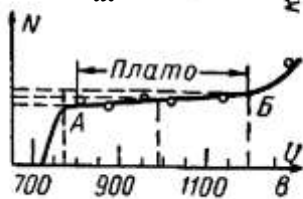
Ионизационная камера (рис. 23) содержит два изолированных друг от друга электрода, находящихся в герметическом сосуде, заполненном воздухом или другим газом. Обычно одним электродом является сосуд камеры, а другим – стержень, изолированный от сосуда.

К электродам камеры через сопротивление R_n подводится постоянное напряжение. При появлении радиоактивных частиц в камере заполняющий ее газ ионизируется и величина тока, протекающего в цепи электродов, возрастает. Даже при относительно больших поверхностях электродов и очень большой интенсивности ионизирующих излучений токи в сопротивлении R_n не превышают 0,1–0,01 мкА. Поэтому между измерительным прибором и камерой необходимо включать усилитель с большим коэффициентом усиления.

К ионизационной камере подводится напряжение такой величины, при которой протекает несамостоятельный разряд, а энергия электронов в разрядном промежутке недостаточна для увеличения числа носителей заряда. На электроды камеры под действием поля приходят лишь носители, созданные радиоактивными частицами.



а.



б.

Рис. 24

Благодаря строгой пропорциональности между интенсивностью излучений и током, а также высокой стабильности параметров ионизационные камеры применяют в качестве дозиметров ионизационного излучения.

Газоразрядный счетчик или **счетчик Гейгера-Мюллера** (рис. 24,а), представляет собой стеклянный баллон, заполненный инертным газом и содержащий два электрода. Анод прибора, регистрирующего γ -кванты, выполняется в виде тонкой металлической нити из вольфрама, натянутой по оси баллона. Катодом служит тонкостенный медный или стальной цилиндр, окружающий нить анода, либо металлический слой, осажденный на

внутреннюю поверхность колбы. К электродам подводится постоянное напряжение порядка сотен вольт. Под действием ионизирующего излучения в газоразрядном счетчике возникает самостоятельный разряд. Каждая радиоактивная, частица, попадающая в счетчик, создает пару свободных носителей зарядов – электрон и положительный ион. Но в результате развития разряда в самостоятельный под действием поля анод–катод импульс тока на электродах имеет значительную величину.

Импульс тока создает на сопротивлении R_n импульс напряжения, достигающий десятков вольт. Поэтому газоразрядные счетчики не требуют большого усиления выходного напряжения.

После прохождения каждой радиоактивной частицы через газ должно осуществляться гашение разряда, что необходимо для возможности оценки интенсивности излучения по числу возникших единичных разрядов. Счетчики Гейгера-Мюллера, в которых самостоятельный разряд автоматически прекращается (примерно через 10^{-4} сек после возникновения) носят название самогасящихся. Гашение разряда осуществляется воздействием специальных примесей, вводимых в баллон счетчика одновременно с заполняющим газом. Баллон обычно заполняется неонам или аргоном при давлении около 100 мм.рт.ст. Гасящей примесью служат пары метилового спирта или пары галогенов – *брома или хлора*. Разряд гаснет благодаря поглощению фотонов молекулами примесей, а также восстановлению этими молекулами нейтральных атомов из ионов основного газа.

Конструкции счетчиков для регистрации α - и β -излучений отличаются от приведенной на *рис. 24, а*. Если в γ -счетчиках γ -кванты преобразуются в быстрые электроны, осуществляющие дальнейшую ионизацию газа в толще катода и стекле колбы, то в β -счетчиках быстрыми электронами являются сами β -частицы.

Бета-счетчики, предназначенные для регистрации частиц с большой энергией, не имеют стеклянной колбы. Здесь роль стенок играет металлический катод. Частицы проникают в межэлектродное пространство через стенки катода. У β -счетчиков, предназначенных для регистрации частиц с меньшей энергией, ввод частиц в междуэлектродное пространство осуществляется не сбоку через тело катода, а с торца счетчика, где устраивается окно, закрытое слюдяной пленкой.

Важной характеристикой газоразрядного счетчика является кривая, выражающая зависимость числа выходных импульсов в единицу времени (скорости счета N) от напряжения между его электродами U при неизменной интенсивности ионизирующего излучения (*рис. 24, б*), называемая *счетной характеристикой*.

Пологий участок АВ кривой, так называемое плато, является рабочим участком. Здесь скорость счета практически не зависит от приложенного напряжения. К счетчику подводят напряжение, соответствующее середине плато.