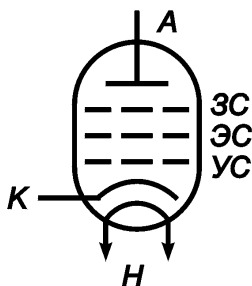


**М.И. Горлов    Т.В. Свистова**

# **ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ И ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ**

Учебное пособие



Воронеж 2004

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Воронежский государственный  
технический университет

М.И. Горлов    Т.В. Свистова

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ  
И ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

Утверждено Редакционно-издательским советом  
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2004

УДК 621.382

Горлов М.И., Свистова Т.В. Электровакуумные и газоразрядные приборы: Учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2004. 113 с.

В учебном пособии рассматриваются устройство, физические процессы, характеристики, параметры, системы обозначений и простейшие схемы применения электронно-управляемых ламп, электронно-лучевых трубок, газоразрядных и фотоэлектронных приборов.

Учебное пособие соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника», специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника», дисциплине «Вакуумная и плазменная электроника».

Учебное пособие подготовлено в электронном виде в текстовом редакторе Word for Windows и содержится в файле ЭП.ехе.

Табл. 3 . Ил. 32 . Библиогр.: 7 назв.

Научный редактор д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза  
Рецензенты: кафедра физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета (зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. Е.Н. Бормонтов);  
канд. физ.-мат. наук, доц. Е.В. Бордаков

© Горлов М.И., Свистова Т.В., 2004  
© Оформление. Воронежский  
государственный технический  
университет, 2004

## ВВЕДЕНИЕ

*Электроника* – это наука, изучающая явления взаимодействия электронов и других заряженных частиц с электрическими, магнитными и электромагнитными полями, что является физической основой работы электронных приборов и устройств (вакуумных, газоразрядных, полупроводниковых и др.), используемых для передачи, обработки и хранения информации.

*Электронными* называются приборы, в которых электрическая проводимость осуществляется главным образом посредством электронов или ионов, движущихся в вакууме, газе или полупроводнике. Электронные приборы используются для различных преобразований электрических величин и находят широкое применение в радиотехнике. Электронные приборы классифицируются по рабочему пространству, виду преобразования энергии, функциональному назначению, мощности, диапазону частот, числу электродов и другим признакам. По рабочему пространству электронные приборы подразделяются на электровакуумные и полупроводниковые.

История создания электронных приборов базируется на открытиях и исследованиях физических явлений, связанных с взаимодействием свободных электронов с электромагнитными полями и веществом. Поэтому первые работы М.В. Ломоносова, Г.В. Рихмана (Россия) и Б. Франклина (США) в конце XVIII века по исследованию электричества могут быть отнесены к началу возникновения электроники. Открытие электрической дуги академиком В.В. Петровым в 1802 г. является началом технического использования электричества.

Работы как отечественных, так и зарубежных ученых в течение XIX века создали фундамент электроники. Среди наиболее важных достижений можно отметить труды А. Ампера и М. Фарадея, установивших законы электричества и электромагнитной индукции, создание теории электромаг-

нетизма М. Максвеллом и теории электронов Х.А. Лоренцем, экспериментальное обнаружение электромагнитных волн Г. Герцем.

Первым электровакуумным прибором явилась осветительная лампа, изобретенная в 1872 г. выдающимся русским ученым А.Н. Лодыгиным. В 1883 г. американский ученый Т. Эдисон усовершенствовал лампу Лодыгина, введя в баллон пластинку, которая при подаче напряжения различной полярности притягивала или отталкивала от себя электроны, вылетающие из нити накала. Тем самым была создана первая двух-электродная лампа – диод.

Важными работами для создания электронных приборов являются открытие фотоэлектронной эмиссии русским ученым А.Г. Столетовым (1888 г.) и термоэлектронной эмиссии Т.А. Эдиссоном. Большую роль на развитие электроники оказали работы А.С. Попова, создавшего кристаллический детектор, К.Ф. Брауна, который изобрел первую электронно-лучевую трубку (1897 г.), Д. Томсона, О.У. Ричардсона, А. Эйнштейна и др., выполненные в конце XIX и начале XX веков. В начале XX века были изобретены электровакуумные диоды и триоды, газотроны. В 1907 г. русский ученый Б.Л. Розинг предложил использовать электронно-лучевую трубку для приема изображений, что может считаться началом телевидения. Много сделали для развития отечественной электроники русские ученые и инженеры В.И. Коваленков, А.Д. Папалески, М.А. Бонч-Бруевич, О.В. Лосев.

В советский период значительный вклад внесли А.А. Чернышев, который выдвинул идею создания видикона, Л. А. Кубецкий – изобретатель фотоэлектронного умножителя, А.П. Константинов и С.И. Котов – авторы приемной телевизионной трубки-иконоскопа и др. Существенное влияние на развитие полупроводниковых приборов оказали работы школы академика А.Д. Иоффе в 30-х – 40-х годах XX века. Важнейшими из них являются: теория выпрямления тока в кон-

такте металл – полупроводник, предложенная Б.И. Давыдовым; квантовая теория полупроводников и теория генерации пар носителей заряда электрон – дырка; разработка полупроводниковых термоэлектрических батарей. Трудями Я.И. Френкеля, Л.Д. Ландау, Б.И. Давыдова и др. создана теория фото-ЭДС в полупроводниках.

Революционные открытия были сделаны в послевоенный период в 40 – 60-х годах. В 1948 г. американские ученые Д. Бардин, у. Бреттейн и У. Шокли предложили биполярный транзистор. В 50-е годы были изобретены: полевой транзистор с *p-n*-переходом, солнечные батареи, оптроны, туннельные диоды, тиристоры и др. В 1960 г. Д. Кинг и М. Аттала создали МОП-транзистор, а в 1966 г. С. Мид разработал полевой транзистор с барьером Шоттки.

Итак, историю развития техники электронных приборов можно условно разделить на три периода.

Первый период относится к XIX столетию и может быть охарактеризован как время установления основных физических закономерностей работы электронных приборов и открытия явлений, стимулирующих их развитие и применение.

Второй период охватывает время с начала XX столетия до 1948 г., когда был изобретен транзистор. Этот период можно назвать периодом ламповой электроники. Именно в это время, в 1904 г., английский ученый Д. Флеминг изготовил первый вакуумный детекторный диод; в 1906 – 1907 гг. американский инженер Ли де Форест сконструировал трехэлектродную электронную лампу.

В России пионером внедрения электронных ламп был В.И. Коваленков, ученик А.С. Попова. В 1910 г. он создал первые отечественные диоды и триоды, а в 1911 г. предложил первую в мире конструкцию четырехэлектродной лампы – тетрод с катодной сеткой. В 1915 г. под руководством М.А. Бонч-Бруевича были разработаны (а с 1916 г. начали серийно выпускаться) высоковакуумные триоды. К середине

30-х годов ламповая электроника в основном сформировалась. К этому времени были созданы типы ламп, применяющиеся и в наши дни: тетрод (1924 г.), пентод (1930 г.), тиратрон (1929 г.), лучевой тетрод и серия многосеточных частотно-преобразовательных ламп (1935 г.).

Третий период начинается в 1948 г. и характеризуется бурным развитием полупроводниковой электроники. В 40-е – 60-е годы XX века были изобретены основные типы полупроводниковых приборов.

В шестидесятые годы были разработаны полупроводниковые интегральные схемы (ИС), представляющие собой функционально законченные узлы радиоаппаратуры: логические элементы, усилители, генераторы и др. В интегральной микросхеме все или часть элементов нераздельно связаны и электрически соединены между собой так, что устройство рассматривается как единое целое. Это позволяет резко уменьшить размеры функциональных узлов и повысить надежность монтажа.

Восьмидесятые и девяностые годы характеризуются бурным развитием микроэлектроники, увеличением функциональной сложности и плотности упаковки элементов в одном полупроводниковом кристалле, то есть разработкой и производством больших и сверхбольших интегральных схем (БИС и СБИС).

Дальнейшее развитие твердотельной микроэлектроники позволит создавать электронно-вычислительные машины (ЭВМ) пятого поколения, быстродействие которых будет характеризоваться не менее 10 млрд операций в секунду.

Следует отметить, что прогресс в развитии твердотельной полупроводниковой электроники позволил в большинстве случаев заменить электровакуумные приборы. Однако в ряде случаев электровакуумные приборы (например, электронно-лучевые приборы для осциллографов и телевизоров, неоновые и газоразрядные лампы и усилители) еще не могут быть заме-

нены полупроводниковыми приборами и ИС из-за меньшего температурного рабочего предела, меньшей стабильности, меньшего входного сопротивления и т. п.

Некоторые особенности электронных ламп до настоящего времени используются в усилителях аудиоаппаратуры. Например, японская фирма Sun Audio, начиная с 1989 года, серийно выпускает непрофессиональные интегрированные одноктактные ламповые усилители, используя электронные лампы – двойные триоды и пентоды.

Данное учебное пособие написано авторами на основе курса лекций по дисциплине «Вакуумная и плазменная электроника», читаемого студентам Воронежского государственного технического университета, и полностью соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника», специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника».



# 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭМИССИОННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ. ЭЛЕКТРОННО-УПРАВЛЯЕМЫЕ ЛАМПЫ

## 1.1. Общие сведения

*Электровакуумными* называются приборы, действие которых основано на использовании электронных или ионных процессов, протекающих в высоком вакууме или в разреженном газе. Они делятся на две основные группы:

а) *электронные электровакуумные приборы*, процессы в которых протекают в высоком вакууме (давление остаточных газов в рабочем режиме обычно не превышает  $10^{-4}$  Па), где движение электронов проходит практически без столкновения с атомами газа. Вакуумные электронные приборы охватывают следующие основные классы: электронные лампы (диоды, триоды, тетроды и др.); электронно-лучевые приборы (осциллографические трубки, кинескопы и др.); фотоэлектронные приборы (вакуумные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители и др.); вакуумные индикаторы; рентгеновские трубки и электровакуумные СВЧ приборы (магнетроны, клистроны, лампы бегущей волны и др.).

б) *ионные электровакуумные*, или *газоразрядные*, приборы, в которых электрический разряд протекает в газе, где столкновения электронов с атомами газа играют решающую роль. Давление используемого газа (чаще всего используются инертные газы или водород), как правило, значительно ниже атмосферного. Другими словами, это приборы, действие которых основано на прохождении электрического тока через разреженный газ (явление газового разряда). Иногда приборы наполняют парами металла, например ртути.

Основные виды исследуемого разряда: дуговой, тлеющий, искровой и коронный. Все виды газового разряда сопровождаются свечением.

К ионным приборам относятся неоновые лампы, знаковые индикаторы, искровые разрядники, газотроны, тиратроны и др.

Любой электровакуумный и газоразрядный прибор состоит из системы электродов, предназначенных для управления физическими процессами внутри баллона, отделяющего внешнюю среду от рабочего внутреннего пространства прибора.

В каждом типе электровакуумных и газоразрядных приборов создаются свои специфические системы электродов. Однако ряд электродов имеется во всех типах приборов. К таким электродам относятся: *катоды* – электроды, испускающие (эмитирующие) электроны, и *аноды* – электроды, собирающие электроны. Для управления потоками заряженных частиц во многих приборах используются управляющие электроды, которые выполняются в виде сеток или профилированных пластин, и специальные электромагнитные элементы конструкции (кагушки).

В приборах отображения информации в наглядной (визуальной) форме (электронно-лучевые трубки, индикаторы и др.) широко используются специальные конструкционные элементы, которые называют *экранами*. С помощью экранов энергия электронного потока или электрического поля преобразуется в оптическое излучение (свечение) тела. Конструкции электродов очень разнообразны и определяются назначением приборов и условиями их работы.

Баллоны электровакуумных и газоразрядных приборов изготавливают самой разнообразной формы из стекла, металла, керамики, а также из различных комбинаций этих материалов. Выводы от электродов делаются через цоколь, торцевые и боковые поверхности баллонов.

## 1.2. Электронная эмиссия

Источником электронов в электронных лампах служит металлический электрод – катод, с поверхности которого электроны выходят в окружающую среду. Даже при нормальной температуре и при отсутствии внешнего электрического поля некоторая часть электронов, обладающая наибольшей энергией, выходит за пределы металла, образуя электронный слой (облако) вокруг катода, оставляя на поверхности катода слой положительных ионов, т.е. атомов лишившихся электронов. Между этими двумя слоями образуются некоторая разность потенциалов, называемая *потенциальным барьером*, препятствующая выходу электронов за пределы катода.

Для выхода электронов из катода необходимо сообщить им энергию, равную работе по преодолению потенциального барьера, названной *работой выхода*  $A$ . Работа выхода измеряется в электрон-вольтах (эВ). 1 эВ – энергия, которую приобретает электрон, проходя в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 В. Очень часто в литературе работа выхода  $A$  обозначается как  $e\varphi_0$ . Работа выхода измерена довольно точно для многих веществ. Оказалось, что минимальное значение работы выхода имеют щелочные и щелочноземельные металлы (например, цезий Cs имеет  $e\varphi_0 = 1,81$  эВ, барий Ba  $e\varphi_0 = 2,52$  эВ), а максимальные значения у таких металлов, как вольфрам W – 4,63 эВ, молибден Mo – 4,16 эВ, платина Pt – 5,32 эВ. Все перечисленные материалы используются для изготовления электродов электронных приборов. Отношение работы выхода  $A$  к заряду электрона  $e$  называется потенциалом выхода  $\varphi_0$

$$\varphi_0 = \frac{A}{e} \text{ [В]}. \quad (1.1)$$

Работа выхода электрона складывается в основном из работы по определению силы, действующей на электрон со стороны двойного слоя, и силы зеркального отображения. Двойной электрический слой образуется вылетевшими с поверхности катода электронами и положительными ионами решетки материала катода, эмитирующего (испускающего) электроны. Двойной слой образует тормозящее электрическое поле для электронов, вылетающих с поверхности катода. При удалении от поверхности тела на электрон действует удерживающая кулоновская сила, возникающая между удаляющимся электроном и наведенным в теле катода зеркально расположенным положительным зарядом (сила зеркального отображения). Работа выхода большинства чистых металлов, используемых в качестве катодов, лежит в интервале 1,8 (Cs) – 5 (Re) эВ.

Для уменьшения работы выхода на поверхность металлической основы (керна) наносят вещество с меньшей работой выхода, электроны которого переходят в kern. Вследствие этого на поверхности катода появляются положительные ионы, которые вместе с электронами, ушедшими в kern, формируют внутренний двойной электрический слой. Электрическое поле, создаваемое этим слоем, ускоряет вылетающие электроны, т.е. уменьшает работу выхода электронов. Например, при нанесении одноатомного слоя бария на поверхность вольфрама работа выхода уменьшается с 4,5 (чистый W) до 1,56 эВ (активированный W).

*Электронной эмиссией* называется явление испускания электронов поверхностью катода в результате различного рода внешних воздействий.

В зависимости от способа сообщения электрону дополнительной энергии, необходимой для выхода из катода, различают следующие основные виды электронной эмиссии.

*Термоэлектронная эмиссия* происходит при разогреве поверхности катода, вследствие чего увеличивается количест-

во электронов, способных преодолеть потенциальный барьер. Этот вид эмиссии применяют в электронных лампах с катодом прямого или косвенного нагрева.

Зависимость плотности тока термоэлектронной эмиссии  $j$  от температуры катода определяется как

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{B_0}{T}\right), \quad (1.2)$$

где  $j$  – плотность тока термоэлектронной эмиссии, А/см<sup>2</sup>;  $T$  – температура катода;  $K$ ,  $A$  и  $B_0$  – константы термоэлектронной эмиссии, зависящие от химической природы, структуры и чистоты поверхности металла.

*Автоэлектронная эмиссия* – эмиссия электронов, обусловленная действием электрического поля у поверхности электрода. Электроны металла дополнительной энергии не получают, но за счет изменения формы потенциального барьера они приобретают способность его преодолевать. Если напряженность электрического поля у поверхности невелика ( $E < 10^6$  В/см), то потенциальный барьер снижается, и работа выхода уменьшается на величину, зависящую от  $E$ :

$$e\varphi_E = e\varphi_0 - e(eE)^{\frac{1}{2}}. \quad (1.3)$$

При более сильных полях форма потенциального барьера искажается, и вероятность его преодоления электронами увеличивается. Зависимость плотности тока автоэлектронной эмиссии от напряженности электрического поля  $E$  аналогична зависимости плотности тока термоэлектронной эмиссии от температуры. Наличие на поверхности металла мельчайших неоднородностей приводит к сильному возрастанию местной напряженности электрического поля и к увеличению эмиссии электронов из этих мест.

Автоэлектронная эмиссия используется в электривакуумных приборах с холодным катодом, т. е. катодом без специального подогрева.

*Вторичная электронная эмиссия* происходит при бомбардировке первичными электронами поверхности катода в вакууме. При этом первичные электроны должны обладать энергией, значительно большей работы выхода. Тогда первичный электрон может передать свою энергию не одному, а нескольким электронам, поэтому число вторичных электронов может быть больше числа первичных. Отношение общего числа вторичных электронов, выбитых с поверхности тела,  $n_2$  к числу первичных электронов, падающих на поверхность тела из электронного потока,  $n_1$  называется *коэффициентом вторичной эмиссии*:

$$\sigma = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.4)$$

Величина  $\sigma$  зависит от рода поверхности, энергии и угла падения первичных электронов. Энергия большинства вторичных электронов составляет несколько электрон-вольт при энергии первичных электронов  $E_1$  до 1 кэВ. Величина  $\sigma_{max}$  для чистых металлов сравнительно невелика (порядка единицы), но если поверхность металла покрыть щелочными или щелочноземельными металлами, то  $\sigma_{max}$  увеличивается до нескольких единиц. Если поверхность металла неоднородна, то электрон многократно рассеивается на этих неоднородностях, и величина  $\sigma_{max}$  значительно увеличивается.

С ростом  $E_1$  электроны проникают все глубже в толщу вещества, передавая энергию его электронам, и коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma$  увеличивается, достигая максимального значения  $\sigma_{max}$  при определенном  $E_1$ . Чем больше  $E_1$ , тем глубже могут проникнуть первичные электроны, но если электроны вещества получают дополнительную энергию слишком

глубоко, то на большом пути к поверхности они теряют ее при столкновениях и, дойдя до поверхности, уже не обладают энергией, достаточной для совершения работы выхода,  $\sigma$  уменьшается.

Коэффициент  $\sigma$ , как отмечено выше, зависит также и от угла падения первичных электронов к поверхности твердого тела: чем больше угол падения, тем ближе к поверхности возникают возбужденные электроны, тем больше вероятность их выхода и больше  $\sigma$ . Этот вид эмиссии применяют в фотоэлектронных умножителях.

*Фотоэлектронная эмиссия* (внешний фотоэффект) – электронная эмиссия, обусловленная энергией падающего оптического излучения. Основные законы фотоэффекта:

а) величина фототока пропорциональна интенсивности светового потока, вызывающего фотоэффект, при условии неизменности спектрального состава излучения (закон Столетова):

$$I_{\phi} = k\Phi, \quad (1.5)$$

где  $I_{\phi}$  – величина фототока;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $\Phi$  – интенсивность светового потока;

б) максимальная энергия фотоэлектронов пропорциональна частоте излучения и не зависит от его интенсивности (закон Эйнштейна):

$$\frac{m\nu_{\text{макс}}^2}{2} = h\nu - e\phi_0, \quad (1.6)$$

где  $m\nu_{\text{макс}}^2/2$  – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона;  $h\nu$  – энергия кванта поля электромагнитного излучения (фотона), поглощенная одним из свободных электронов твердого тела;  $\nu$  – частота излучения;  $e\phi_0$  – работа выхода;

в) наличие длинноволновой (красной) границы области спектра излучения – важная особенность внешнего фотоэффекта. Если постепенно уменьшать частоту  $\nu$ , то при некоторой граничной частоте  $\nu_0$  фотоэлектронная эмиссия прекратится. При всех частотах, меньших  $\nu_0$ , фотоэлектронная эмиссия (при  $T = 0$ ) отсутствует. Граничная частота  $\nu_0$  тем больше, чем больше работа выхода вещества  $e\varphi_0$ . Длина волны  $\lambda_0$ , соответствующая частоте  $\nu_0 = c/\lambda_0$ , получила название длинноволновой границы фотоэффекта. Следовательно, лишь излучение с длиной волны  $\lambda < \lambda_0$  может вызвать фотоэмиссию. Если  $e\varphi_0$  выразить в электронвольтах, то  $\lambda_0 = c/\nu_0 = ch/e\varphi_0 = 1,23/\varphi_0$  мкм;

г) безинерционность фотоэффекта: установлено, что фототок появляется и исчезает вместе с освещением, запаздывая не более чем на  $\tau \approx 3 \cdot 10^{-9}$  с.

Фотоэлектрические свойства эмиттеров характеризуются величиной отношения фототока к падающему световому потоку  $k = I_\Phi/\Phi$ . Коэффициент  $k$  называют чувствительностью фотокатода. Если падающий лучистый поток  $\Phi$  монохроматичен, то  $k_\lambda$  называют спектральной чувствительностью. Если падает поток белого света, то  $k_\Sigma$  – интегральная чувствительность фотокатода.

Чувствительность фотокатода может быть оценена отношением числа фотоэлектронов к числу падающих фотонов:

$$\eta = \frac{\frac{I_\Phi}{\Phi}}{\frac{e}{h\nu}} = \frac{h\nu}{e} k. \quad (1.7)$$

Величина  $\eta$  называется квантовым выходом электронов. Значения  $k$  и  $\eta$  зависят от  $\lambda$  ( $\hbar = h/2\pi$ ).

Зависимости  $k = f(\lambda)$  и  $\eta = f(\lambda)$  называют спектральными характеристиками.



Следует отметить, что  $k_\lambda$  и  $k_\Sigma$  зависят от длительности и интенсивности освещения. Со временем  $k_\lambda$  и  $k_\Sigma$  постепенно уменьшаются, так как фотоэмиттеры проявляют «усталость» или утомление.

Все электроны, вылетающие из катода, удаляются от него внешним электрическим полем и образуют электрический *ток эмиссии*.

При увеличении напряженности ускоряющего поля вблизи катода, а также с повышением температуры катода, с увеличением светового потока увеличивается число вылетевших из катода, т.е. эмитированных, электронов. При отсутствии внешнего ускоряющего поля эмитированные электроны не удаляются от катода, а скапливаются вокруг него, образуя объемный отрицательный заряд (электронное облако), который препятствует дальнейшему выходу электронов из катода.

### **1.3. Конструкция и электроды электровакуумных ламп**

Общими конструктивными элементами всех электронных ламп являются: баллон (колба), электроды и цоколь.

*Баллон* является газозащитной оболочкой лампы и позволяет размещать систему электродов в высоком вакууме. (порядка десятка микропаскалей).

Баллоны электровакуумных приборов разнообразны по размерам, форме и материалу. Наиболее распространены баллоны цилиндрической формы; но используются также баллоны более сложной конфигурации. Габаритные размеры баллонов лежат в пределах от нескольких миллиметров (сверхминиатюрные лампы) до десятков сантиметров (мощные генераторные лампы, электронно-лучевые приборы). Различают стеклянные баллоны, изготавливаемые из специального стекла, которое хорошо обезгаживается и герметически сваривается с металлом; металлические баллоны; металлостеклянные,

а также баллоны, изготавливаемые из специальной высокочастотной керамики в сочетании с металлическими деталями.

В рабочем пространстве любого прибора протекают следующие основные процессы: образование свободных носителей электрического заряда – электронов в процессе эмиссии с поверхности твердого тела или образование электронов и ионов в результате электрического разряда в газе; создание направленного потока этих частиц; управление как плотностью потока, так и направлением движения частиц. Все эти процессы осуществляются с помощью *электродов*, которые присоединяются к внешним источникам напряжения.

*Электрдами лампы* являются катод, анод и сетки. Электроды жестко крепятся в баллоне.

Источником электронов в электронных лампах служит металлический электрод – *катод*, с поверхности которого электроны выходят в окружающую среду.

В большинстве электрвакуумных приборов применяют термоэлектронные катоды (термокатоды), использующие термоэмиссию. Наиболее распространенными термокатодами являются однородные металлические, активированные металлические, полупроводниковые и металлополупроводниковые.

Катоды для создания термоэлектронной эмиссии по способу нагрева делятся на катоды прямого накала (с непосредственным нагревом) и косвенного накала (подогревный катод).

*Катоды прямого накала* имеют различную форму: нити, решетки, V- или W-образную, спиральную или ленточную. К выводам катода подключается источник напряжения накала. Материалом для катода служит вольфрам или молибден, покрытый слоем другого металла с малой величиной работы выхода электронов (например, цезия, тория, бария и т. п.). Эти катоды просты по конструкции, имеют малую массу и требуют малого времени разогрева до рабочего состояния. Недостатком этих катодов является то, что при питании их переменным током  $I_H$  в выходном сигнале появляется фон удвоен-

ной частоты тока эмиссии (рис 1.1). Это объясняется тем, что разогрев и остывание катода происходят дважды за период, поэтому ток эмиссии  $I_{\text{Э}}$  изменяется от минимального до максимального также дважды. Кроме того, этому способствует неэквипотенциальность, т. е. изменение потенциала по длине нити вследствие падения напряжения от проходящего по ней тока. К недостаткам катодов прямого накала относятся также малая площадь эмитирующей поверхности и недостаточная жесткость конструкции.

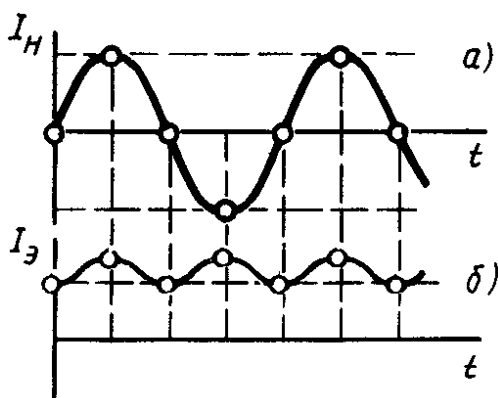


Рис. 1.1. Ток накала (а) и эмиссии (б) катодов прямого накала

*Катоды косвенного накала* выполняют обычно из никеля в виде трубки или цилиндра с дном. Подогреватель помещается внутри катода. Эмитирующая поверхность и подогреватель отдалены друг от друга и могут быть электрически не связаны между собой. Для увеличения эмиссионной способности рабочие поверхности катодов активируют смесью оксидов щелочноземельных металлов или металлом с малой величиной работы выхода электронов (барий, торий, цезий и т.п.). Эти катоды имеют большую эмитирующую поверхность и массу, что позволяет получить значительный эмиссионный ток. Рабочая температура подогреваемых катодов значительно

ниже температуры катодов прямого накала, но время разогрева у них больше. Все это делает подогреваемые катоды экономичными, долговечными. В отличие от катодов прямого накала эмиссия с их поверхности при питании подогревателя переменным током практически постоянна. Недостатком катодов косвенного накала является их инерционность.

Прямокальные катоды из чистых металлов используются относительно редко, например, в электрометрических и мощных электронных лампах с высоким анодным напряжением, так как они наиболее стойки к разрушению под действием бомбардировки ионов, возникающих за счет ионизации остаточных газов в рабочем пространстве.

Активированные металлические катоды имеют достаточно много конструктивных модификаций. В любом из них поверхность W или Mo активируется металлами с малой работой выхода: барием, торием, стронцием и др. Для увеличения активированной поверхности и, следовательно, эмиссионной способности поверхностные слои или весь катод изготавливают: из пористого вольфрама; путем прессования или спекания порошков оксида металла (никель, вольфрам и др.) и карбонатов щелочноземельных металлов; путем нанесения гексаборида лантана или гексаборида бария на молибденовую или танталовую подложку. Активированные металлические катоды применяются в самых разнообразных электронных приборах.

В полупроводниковых и металлополупроводниковых термокатадах в качестве эмитирующего слоя используются полупроводники. Наибольшее распространение в электронных и газоразрядных приборах получил оксидный катод, который представляет собой никелевый или вольфрамовый керн с нанесенным полупроводниковым слоем из смеси оксидов бария, стронция и кальция. Хорошими характеристиками обладают оксидно-бариевые и оксидно-ториевые катоды, отли-

чающиеся высокой стойкостью к ионной бомбардировке и отравлению газами, восстановлением эмиссии после отравления.

Для оценки свойств термокатодов используются следующие параметры: плотность эмиссионного тока  $J_e$ , рабочая температура катода  $T_{\text{раб}}$ , долговечность или срок службы катода, эффективность катода  $H$ .

Для увеличения долговечности электронной лампы катодный ток обычно задается значительно меньшим полного эмиссионного тока катода. Максимально допустимый катодный ток, приходящийся на единицу поверхности катода, эмитирующего электроны, называется *максимальной плотностью катодного тока*, значение которой в современных электронных лампах составляет  $0,1 - 1 \text{ А/см}^2$ .

*Эффективность катода  $H$*  выражается током эмиссии в миллиамперах на 1 Вт мощности, затраченной на разогрев катода:

$$H = \frac{I_{K \text{ max}}}{U_H I_H}, \quad (1.8)$$

где  $I_{K \text{ max}}$  – максимальный ток эмиссии катода;  $U_H$ ,  $I_H$  – напряжение и ток накала катода.

Чем выше эффективность катода, тем больший ток эмиссии можно получить от него при меньшей затрате мощности в цепи накала. Эффективность катода составляет от 2 до 100 мА/Вт.

Рабочая температура также определяет экономичность катода. Чем ниже рабочая температура катода, тем меньше мощность требуется для его разогрева (табл. 1.1). Обычно рабочая температура составляет от 1000 до 2600 °С.

*Срок службы катода*, или *долговечность*, определяется промежутком времени его работы, в течение которого ток эмиссии снижается не более чем на 20 % за счет испарения или окисления активного слоя катода.

Таблица 1.1

## Основные характеристики катодов термоэлектронной эмиссии

Материал катода	Температура катода, °С	Работа выхода, эВ	Плотность тока эмиссии, А/см <sup>2</sup>	Эффективность катода, мА/Вт
Вольфрам	2300	4,53	0,2 – 0,7	2 – 10
Молибден	2000	4,43		
Барий	727	0,99	0,15 – 0,15	60 – 100
Цезий	28	1,81		

Фотокатоды чаще всего выполняют в виде тонкого светочувствительного слоя металла с окисленной поверхностью, на которую осаждена тонкая пленка цезия. Наибольшее распространение получили кислородно-цезиевые и сурьмяно-цезиевые. Обычно сурьмяно-цезиевый катод наносится на тонкую никелевую пленку – подложку.

*Анод* является сборщиком (т.е. коллектором) электронов, испускаемых катодом. Электроны отдают аноду кинетическую энергию, полученную ими в ускоряющем поле лампы, и нагревают его. Чтобы максимальная температура анода не превышала установленной температуры для данной лампы, его охлаждают. Существует естественное охлаждение анода и принудительное охлаждение потоком воздуха, воды или пара. Естественное охлаждение происходит путем лучеиспускания через вакуум (анод находится внутри баллона) или путем теплопроводности через массивный вывод (анод находится внутри стеклянного или металлокерамического баллона, на его вывод надет радиатор).

Предельно допустимая температура анода выбирается в зависимости от его материала, типа катода, способа охлажде-

ния, газовыделения из анода и материала баллона лампы. Чтобы температура анода не превышала допустимую, необходимо, чтобы мощность рассеяния на аноде  $P_a$  ( $P_a = U_a \cdot I_a$ , где  $U_a$  и  $I_a$  – напряжение и анодный ток) была меньше допустимой для данной лампы.

Материалом анодов в лампах с небольшими нагрузками служит никель или алюминированное железо, а в лампах с большой нагрузкой при естественном охлаждении – молибден, тантал, титан. Конструктивно анодам электронных ламп придают цилиндрическую, эллиптическую или коробчатую форму.

На анод лампы подается положительное (относительно катода) напряжение  $U_a$ . Под действием этого напряжения электроны попадают на анод со скоростью  $V_a$ , обладая кинетической энергией  $0,5mV_a^2$ , где  $m$  – масса электрона. Кинетическую энергию электронов, поступающих на анод за одну секунду, называют *мощностью, рассеиваемой анодом*, и обозначают  $P_a$ . Если пренебречь начальной скоростью электронов, то на основании закона сохранения энергии можно записать:  $0,5mV_a^2 = eU$ , где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона.

Если умножить обе части этого уравнения на  $n$  – количество электронов, попадающих на анод за одну секунду, и учесть, что анодный ток  $I_a = ne$ , то  $P_a = I_a U_a$ .

Выделение мощности на аноде сопровождается его нагревом до определенной температуры. Независимо от типа лампы, аноды характеризуются следующими параметрами: *допустимой температурой анода*  $T_{a,дон}$  – наибольшей температурой анода, при которой лампа еще работает нормально (она ограничивается температурой, при которой начинается выделение газа из анода, ухудшающее вакуум, и перегревом катода вследствие теплового излучения анода). Для ламп с оксидным катодом  $T_{a,дон} = 650$  К; *допустимой рассеиваемой анодом мощностью*  $P_{a,дон}$  – мощностью, выделяемой на аноде при допустимой температуре анода.

При естественном охлаждении мощность, рассеиваемая нагретым до температуры  $T$  анодом, определяется законом Стефана – Больцмана:

$$P_a = S_a \gamma \sigma T^4, \quad (1.9)$$

где  $P_a$  – мощность, рассеиваемая анодом;  $S_a$  – площадь поверхности анода;  $\gamma$  – коэффициент излучения (для абсолютно черного тела  $\gamma = 1$ , для других  $\gamma < 1$ );  $\sigma$  – коэффициент Стефана – Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Из соотношения (1.9) можно определить предельную температуру, при которой анод может работать, сохраняя свои свойства:

$$T_{пред} = \sqrt[4]{\frac{P_{a.макс}}{S_a \gamma \sigma}}. \quad (1.10)$$

Согласно (1.9) мощность, излучаемую анодом, можно увеличить за счет увеличения площади его поверхности  $S_a$ , например, снабжением его ребрами, или за счет увеличения коэффициента  $\gamma$ . В большинстве конструкций ламп оба способа используются одновременно. Для повышения  $\gamma$  аноды покрывают в процессе изготовления слоем угля, порошка циркония, титана или молибденовой черни. И если блестящий никель имеет  $\gamma = 0,08$ , то у матированного никеля  $\gamma = 0,25$ , а у черненого никеля  $\gamma = 0,95$ . Для каждого материала существует своя удельная мощность анода  $P'_a$ , отводимая с  $1 \text{ см}^2$  при предельной температуре, табл. 1.2.

*Сетки* служат для управления потоком электронов, летящих с катода на анод. Число сеток может быть от одной до шести и каждая из них имеет свое назначение и название.

Конструкции сеток и материалы для их изготовления выбирают в зависимости от рассеиваемой на них мощности, вида и формы катода в лампе и от температуры остальных



электродов. В общем случае конструкция сетки состоит из рабочей части (витки проволоки, проволочная ткань или продольные стержни) и траверс (держателей), на которых она закрепляется. Для изготовления сеток используют тугоплавкие металлы и их сплавы (молибден, вольфрам, тантал, титан, ни- хром). Траверсы изготовляют из меди, никеля, молибдена, ук- репляют в слюдяных пластинах и монтируют на ножке лампы.

Таблица 1.2

Удельная мощность анода, отводимая с  $1 \text{ см}^2$   
при предельной температуре

Материал анода	$P'_a$ , Вт/см <sup>2</sup>
Никель блестящий	0,5 – 1,5
Никель черненный	2,3 – 4,2
Молибден	4 – 6
Тантал	7 – 9
Медь, охлаждаемая водой	25 – 30

В маломощных приемно-усилительных лампах наиболее часто применяют спиральные сетки на двух траверсах. В генераторных лампах используются стержневые сетки, образованные прутками, параллельными катоду, или же выполненные из отрезков танталовых лент, приваренных к танталовым кольцам. Сетки генераторных ламп изготавливают также из полотна, сплетенного из молибденовой или вольф- рамовой проволоки, свернутого в цилиндр и скрепленного с траверсами.

Сложной технической задачей является обеспечение достаточной жесткости конструкции сеток. Это относится

особенно к некоторым разновидностям приемно-усилительных ламп, в которых расстояние между катодом и сеткой составляет несколько сотен и даже десятков микрометров. Для таких ламп разработаны рамочные конструкции, в которых тонкую вольфрамовую проволоку диаметром около 8 – 10 мкм навивают на рамки и затем припаивают к ним (обычно золотом).

Лампа без сеток называется *диодом*, с одной сеткой *триодом*, с двумя – *тетродом*, с тремя – *пентодом*, с четырьмя – *гексодом*, с пятью *гептодом*, или *пентагридом*, с шестью – *октодом*. Так как из электродов при нагреве или электронно-ионной бомбардировке выделяются газы, то для поддержания в лампах высокого вакуума применяют геттеропоглотитель газов. В качестве геттера чаще всего используют барий, который, связывая остаточный газ, осаждается в виде оксидов и чистого бария на стенках баллона, окрашивая его в серовато-зеркальный цвет.

Баллон электронной лампы с электродами помещают на *цоколе*, по периферии которого укреплено симметрично восемь металлических штырьков, которые соединены с электродами лампы. В центре цоколя расположен удлиненный пластмассовый штырь – ключ с выступом, обеспечивающим правильную установку лампы. Штырьки нумеруются от выступа ключа по часовой стрелке. Не задействованные с электродами штырьки могут отсутствовать. Схема соединения электродов со штырьками называется цоколевкой лампы и приводится в справочнике.

Миниатюрные, или пальчиковые, лампы не имеют цоколя, поэтому выводы от электродов в них выполняются гибкими проводами. Отсчет выводов в этих лампах ведется от цветной метки, нанесенной на одном из выводов.

Для обозначения ламп применяется четырехзначная система, в которой используются только русские буквы и арабские цифры.

Первый знак – цифра, показывающая (округленно) напряжение накала в вольтах. Наиболее распространены напряжения: 1,2 В для катодов прямого накала и 6,3 В – для подогреваемых.

Второй знак – буква, характеризующая тип лампы. Принятые обозначения представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Система обозначений электронных ламп

Буква	Тип лампы
А	Гептод
Б	Диод–пентод и двойной диод–пентод
В	Пентод с использованием вторичной эмиссии
Г	Диод–триод или двойной диод–триод
Д	Диод
Е	Электронно-световой индикатор настройки
Ж	Пентод и лучевой тетрод с короткой характеристикой
И	Триод – гексод и триод – гептод
К	Пентод и лучевой тетрод с удлиненной характеристикой
Н	Двойной триод
П	Выходная лампа (пентод и лучевой тетрод)
С	Триод
Ф	Триод–пентод
Х	Двойной диод
У	Кенотрон
Э	Тетрод

Третий знак – число, указывающее порядковый номер разработки типа лампы. Лампы одной группы, но с разными цифрами разработки обычно отличаются параметрами.

Четвертый знак – буква, характеризующая конструктивную особенность лампы.

Конструктивно лампы классифицируются по *материалу баллона* – металлические, стеклянные или керамические; по *размерам баллона* – сверхминиатюрные (диаметр баллона 10 мм и менее), миниатюрные – «пальчиковые» (диаметр баллона 19 – 22,5 мм), малогабаритные (диаметр баллона 33 мм) и большого габарита (диаметр баллона более 33 мм); по *количеству штырьков* – наиболее распространены семи-, восьми- и девятиштырьковые.

Если отсутствует четвертый знак – лампа с металлическим баллоном; буква С обозначает лампу со стеклянным баллоном, имеющим сравнительно большие габариты; П – пальчиковые лампы; Б – сверхминиатюрные; Ж – желудь; А – диаметром 6 мм; Р – диаметром до 4 мм; Л – с замком в ключе.

Примеры обозначения:

1Ц1С – кенотрон с напряжением прямого накала 1,2 В, стеклянный баллон, серийный номер 1.

6Ф1П – пальчиковый триод–пентод с подогреваемым катодом, напряжение накала 6,3 В, серийный номер 1.

6С19П – триод с напряжением накала 6,3 В, серийный номер 19, пальчиковый.

## 1.4. Диоды

*Диод* – это двухэлектродная вакуумная лампа, основным свойством которой является односторонняя проводимость тока. Диод – электронная лампа, содержащая лишь два электрода: катод и анод. Термоэлектронный катод служит для испускания электронов; анод является коллектором, т.е. электродом, который собирает электроны. Анод в соответствии с формой катода выполняется либо в виде цилиндра, либо в виде короба. Оба электрода помещаются в стеклянный, метал-

личный или металлокерамический баллон. Схематическое изображение диода приведено на рис. 1.2.

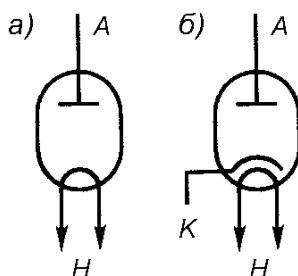


Рис 1.2. Схематическое изображение диода прямого накала (а) и косвенного накала (б): А – анод, К – катод, Н – накал

Принцип действия электровакуумного диода основывается на законе движения электрона в электрическом поле, которое образуется между анодом и катодом. Для создания этого электрического поля в анодную цепь электровакуумного диода включается источник напряжения  $U_a$ .

Потенциал катода диода принимается равным нулю. От этого значения отсчитываются потенциалы в междуэлектродном пространстве и потенциал анода лампы. При нагревании катода током накала его свободные электроны приобретают энергию, достаточную для совершения работы выхода, и покидают катод.

Если напряжение анода положительно, испускаемые катодом электроны движутся к аноду, замыкая электрическую цепь анодного питания, и обуславливают прохождение анодного тока  $I_a$ .

При подключении к аноду электровакуумного диода отрицательного полюса источника  $U_a$  электрическое поле между анодом и катодом оказывает на электроны тормозящее действие и возвращает их на катод. В этом случае в цепи анода ток не проходит.

На анодный ток диода, кроме внешнего электрического поля, зависящего от напряжения анода, существенное влияние оказывает поле пространственного заряда. Оно обусловлено зарядом электронов, находящихся между анодом и катодом, и тормозит электроны, покидающие катод.

График зависимости тока анода от напряжения на аноде  $I_a = f(U_a)$  при постоянной температуре катода называется *вольт-амперной характеристикой диода (ВАХ)* (рис 1.3). При малых значениях  $U_a$  происходит медленный прирост анодного тока (участок ОА на рис. 1.3), так как электронное облако вокруг катода создает поле, противодействующее полю анодного напряжения. С ростом  $U_a$  действие объемного заряда ослабляется, и ток  $I_a$  растет быстрее. На участке ОБ характеристика подчиняется закону «степени трех вторых»:

$$I_a = kU_a^{\frac{3}{2}}, \quad (1.11)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от геометрических размеров и материала катода.

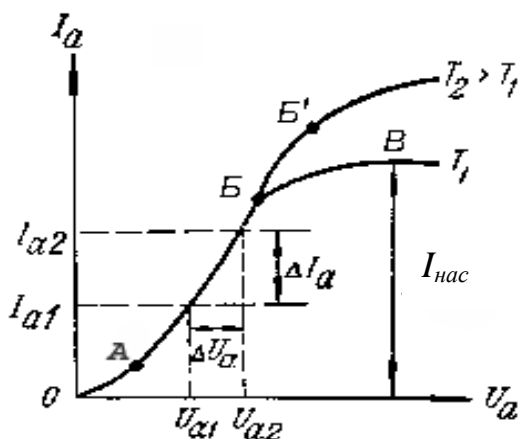


Рис. 1.3. Вольт-амперные характеристики диода

При дальнейшем увеличении  $U_a$  (участок БВ) закон «степени трех вторых» нарушается, ток  $I_a$  растет все медленнее и стремится к определенному значению, называемому *током насыщения*  $I_{нас}$  и равному току эмиссии.  $I_{нас}$  уже не зависит от увеличения значения  $U_a$ , так как все электроны, испускаемые катодом, доходят до анода. Увеличить ток насыщения можно только путем увеличения температуры катода. При  $T_2 > T_1$  получим  $I_{нас T_2} > I_{нас T_1}$ .

Режим, при котором анодный ток меньше тока насыщения, т.е.  $I_a < I_{нас}$ , называется *режимом ограничения*. Диоды обычно работают в режиме ограничения при  $U_a = 10 - 30$  В. Режимом насыщения пользуются редко.

Параметрами диода являются: *внутреннее сопротивление переменному*  $R_i$  (называемое также внутренним дифференциальным сопротивлением) и *постоянному*  $R_o$  току и *внутренняя дифференциальная проводимость* диода  $S$  (называется также его крутизной), которые определяются по формулам:

$$R_i = \lim_{\Delta I_a \rightarrow 0} \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{dU_a}{dI_a}, \text{ Ом}; \quad (1.12)$$

$$R_o = \frac{U_a}{I_a} = \frac{U_a}{kU_a^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{kU_a^{\frac{1}{2}}}, \text{ Ом}; \quad (1.13)$$

$$S = \lim_{\Delta U_a \rightarrow 0} \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} = \frac{dI_a}{dU_a} = \frac{1}{R_i}, \text{ мА/В}, \quad (1.14)$$

откуда  $R_i = 1/S$ . Из (1.14) путем дифференцирования значения тока  $I_a$  (1.11) по  $dU_a$  находим, что  $S = 3/2 \cdot k \cdot U_a^{1/2}$ , следовательно,  $k = 2S/3U_a^{1/2}$ . Подставляя в (1.11) вместо  $k$  его найденное значение, получим

$$I_a = \frac{2}{3} \frac{S}{U_a^{\frac{1}{2}}} \cdot U_a^{\frac{3}{2}} = \frac{2}{3} S U_a. \quad (1.15)$$

На рис. 1.3 показано, как по ВАХ диода можно приближенно найти значения  $R_i$  и  $S$ .

У реальных диодов внутреннее дифференциальное сопротивление лежит в пределах 20 – 1000 Ом. Крутизна и дифференциальное сопротивление диода на различных характеристиках вследствие ее нелинейности неодинаковы.

Междуэлектродные емкости формируются за счет того, что электроды прибора, разделенные вакуумным промежутком, представляют собой пластины эквивалентного конденсатора. Междуэлектродные емкости в маломощных диодах составляют несколько пикофард, а в мощных лампах достигают десятков пикофард.

К этой емкости добавляется еще емкость между выводами и емкость, обусловленная наличием неоднородно распределенных в междуэлектродном пространстве зарядов. Междуэлектродную емкость при отсутствии зарядов в междуэлектродном пространстве (катод не накален) называют холодной, а при их наличии – горячей. Согласно расчетам горячая емкость больше холодной в 4/3 раза.

Параметрами диодов являются также:

*максимально допустимое обратное напряжение* на аноде  $U_{обр\ макс}$  – наибольшее обратное напряжение между анодом и катодом, при котором диод может работать без пробоя. Величина  $U_{обр\ макс}$  достигает значений от единиц до сотен киловольт для различных типов диодов;



*максимально допустимый прямой ток* анода  $I_{a \text{ макс}}$  – наибольший прямой ток, при котором диод сохраняет работоспособность в течение гарантированного срока, составляющий от нескольких десятков микроампер для маломощных высоковольтных диодов до нескольких сотен миллиампер для мощных диодов;

*максимально допустимая мощность*  $P_{a \text{ макс}}$ , рассеиваемая на аноде – наибольшая мощность, которую анод может рассеивать без разрушения из-за перегрева. Для мощных выпрямительных диодов эта мощность достигает нескольких десятков ватт.

Электрическая мощность, рассеиваемая на аноде, определяется по формуле

$$P_a = U_a I_a. \quad (1.16)$$

При выпрямлении переменного тока напряжение и ток анода изменяются за период времени  $T$ , поэтому мощность рассеивания можно определить как

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T u_a(t) i_a(t) dt, \quad (1.17)$$

где  $u_a(t)$  и  $i_a(t)$  – мгновенные значения напряжения и тока диода.

К параметрам лампы относятся также номинальное напряжение и ток накала. Кроме того, зачастую указывается еще наибольшее допустимое обратное напряжение  $U_{обр}$ , которое может быть приложено к лампе в непроводящем направлении, не подвергая ее опасности пробоя.

Диоды применяют для выпрямления переменного тока низкой частоты (такие диоды называются обычно кенотронами) и для преобразования высокочастотных колебаний (высо-

кочастотные диоды для детектирования, модулирования сигналов и преобразования частот).

## 1.5. Триоды

*Триодом* называют электронную лампу, в которой помимо анода и катода имеется третий электрод – сетка, управляющая потоком электронов, т.е. током лампы. Управляющая сетка располагается между анодом и катодом вблизи последнего. Схематическое изображение триода приведено на рис. 1.4.

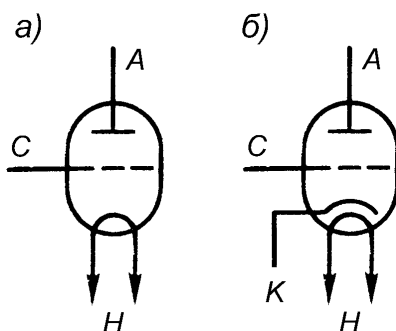


Рис. 1.4. Схематическое изображение триода с катодом прямого накала (а) и с катодом косвенного накала (б): С – сетка

Разность потенциалов между сеткой и катодом называется *сеточным напряжением*. При сеточном напряжении, равном нулю ( $U_c = 0$ ), ток лампы определяется напряжением на аноде. При положительном напряжении на сетке ( $U_c > 0$ ) электрическое поле будет ускорять электроны, эмитированные катодом, что вызовет увеличение анодного тока при том же анодном напряжении. Таким образом, изменяя напряжение на сетке, управляют величиной тока в анодной цепи.

Однако при  $U_c > 0$  часть эмитированных электронов падает на сетку, что приводит к возникновению сеточного тока  $I_c$ , который иногда оказывает отрицательное влияние на режим работы лампы, вызывая искажение формы анодного тока. При нормальной работе триода сеточный ток должен быть ничтожно мал (порядка  $0,001 - 0,1$  нА).

Если на сетке лампы будет отрицательный потенциал ( $U_c < 0$ ), то на ускоряющее поле, созданное анодным напряжением, будет накладываться между сеткой и катодом тормозящее поле, уменьшая при этом анодный ток лампы. При некотором отрицательном напряжении сетки, называемом *запирающим*  $U_z$ , результирующее поле между сеткой и катодом становится тормозящим, анодный ток при этом становится равным нулю, т.е. лампа запирается.

Зависимость анодного тока от напряжения на сетке при постоянном напряжении на аноде, т.е.  $I_a = f(U_c)$  при  $U_a = const$ , называется *статической анодно-сеточной характеристикой*, а зависимость анодного тока от напряжения на аноде при постоянном напряжении на сетке, т.е.  $I_a = f(U_a)$  при  $U_c = const$ , – *статической анодной характеристикой*.

Статическими эти характеристики называются потому, что при их снятии все напряжения, кроме исследуемых, должны поддерживаться постоянными. Из рис. 1.5 видно, что при нулевом потенциале на сетке и заданном анодном напряжении  $U_{a2}$  в анодной цепи потечет ток  $I_{a2}$ . С увеличением отрицательного потенциала на сетке при том же  $U_{a2}$  анодный ток уменьшится. На рис. 1.5 показаны запирающие напряжения  $U_{z1}$ ,  $U_{z2}$ ,  $U_{z3}$ , когда ток анода равен нулю, для различных анодных напряжений. Увеличение или уменьшение анодного напряжения сдвигает характеристику соответственно влево или вправо относительно первоначальной.

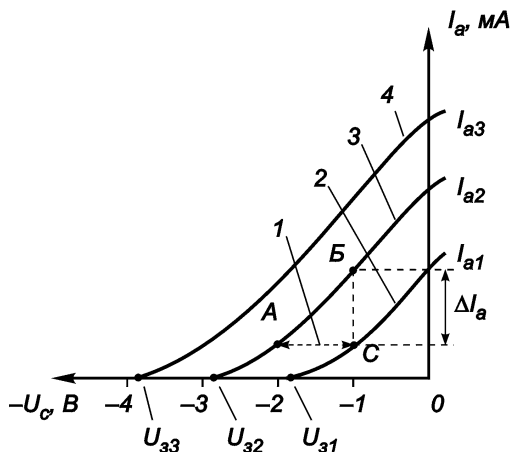


Рис. 1.5. Семейство анодно-сеточных характеристик триода:  
 1 –  $\Delta U_c$ ; 2 –  $U_{a1}$ ; 3 –  $U_{a2}$ ; 4 –  $U_{a3} > U_{a2}$

На рис. 1.6 представлено семейство анодных характеристик, снятых при различных напряжениях на сетке. При  $U_c = 0$  характеристика триода подобна характеристике диода. При увеличении отрицательного напряжения на сетке характеристики сдвигаются вправо. При приложении к сетке положительного напряжения характеристики сдвигаются влево. При этом в сеточной цепи появляются сеточные токи  $I_c$ , возникающие за счет перераспределения тока эмиссии между анодом и сеткой.

С помощью статических характеристик выбирается режим работы триода и определяются его параметры, характеризующие зависимость анодного и сеточного токов от анодного и сеточного напряжений. К ним относятся: крутизна характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления.

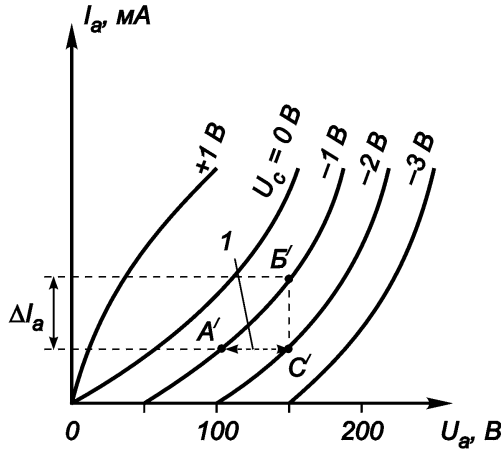


Рис. 1.6. Семейство анодных характеристик  
триода: 1 –  $\Delta U_a$

Так как в статическом режиме анодный ток является функцией двух напряжений: на аноде  $U_a$  и на сетке  $U_c$ , т.е.  $I_a = f(U_a, U_c)$ , то изменение анодного тока можно выразить полным дифференциалом:

$$dI_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} dU_c + \frac{\partial I_a}{\partial U_a} dU_a. \quad (1.18)$$

Частная производная  $\partial I_a / \partial U_c$  при постоянном напряжении на аноде ( $U_a = \text{const}$ ) называется *крутизной характеристики* и обозначается буквой  $S$ :

$$S = \left. \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right|_{U_a = \text{const}}. \quad (1.19)$$

Величина  $S$  зависит от расположения электродов и их размеров и колеблется от единиц до десятков миллиампер на вольт.

Частная производная  $\partial I_a / \partial U_a$  при постоянном напряжении на сетке ( $U_c = const$ ) называется *внутренней проводимостью триода* и характеризует влияние изменения напряжения на аноде на ток анода. Величина, обратная проводимости, называется *внутренним сопротивлением триода* переменному току (дифференциальное сопротивление триода):

$$R_i = \left. \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right|_{U_c = const} . \quad (1.20)$$

Величина  $R_i$  зависит от размеров электродов и колеблется от сотен ом до десятков килоом. Сопротивление триода постоянному току  $R_0 = U_a / I_a$  может заметно отличаться от  $R_i$ .

Поскольку в статическом режиме  $dI_a = 0$ , то уравнение (1.18) можно записать как

$$\frac{dU_a}{dU_c} = - \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \cdot \frac{\partial U_a}{\partial I_a} = -SR_i . \quad (1.21)$$

Отношение  $dU_a / dU_c$  называется *коэффициентом усиления триода*, обозначается буквой  $\mu$  и равно

$$\mu = \left. \frac{dU_a}{dU_c} \right|_{I_a = const} = SR_i . \quad (1.22)$$

Так как сетка находится ближе к катоду, то действие сеточного напряжения на электронный поток оказывается сильнее, чем действие анодного напряжения, и значение  $\mu$  будет

больше единицы. В зависимости от расположения электродов величина  $\mu$  колеблется от 4 до 100.

Величина, обратная  $\mu$ , называется *проницаемостью*:

$$D = \frac{1}{\mu}. \quad (1.23)$$

Соотношение (1.22) связывает все три параметра триода и получило название *уравнения параметров лампы*.

$$SR_i = \mu, \quad (1.24)$$

а с учетом формулы (1.23)

$$DSR_i = 1. \quad (1.25)$$

Эти уравнения позволяют по двум известным параметрам определить третий, неизвестный.

Параметры триода можно определить по статическим характеристикам с помощью так называемого *характеристического треугольника* (АВС на рис. 1.5 и А'Б'С' на рис. 1.6), построенного на средней части характеристики. По рис 1.5 определяется значение  $S = \Delta I_a / \Delta U_c$ , а по рис 1.6 – значение  $R_i = \Delta U_c / \Delta I_a$ .

Со всеми введенными обозначениями параметров лампы уравнение (1.18) можно записать как

$$dI_a = S dU_c + \frac{1}{R_i} dU_a \quad (1.26)$$

или

$$dI_a = \frac{1}{R_i} (\mu dU_c + dU_a). \quad (1.27)$$

Уравнение (1.27) называется *основным уравнением триода* и показывает влияние приращения анодного и сеточного напряжения на приращение анодного тока. Это уравнение используется при анализе работы любых ламповых схем.

В триоде находится три металлических электрода, между которыми существуют емкости: сетка – катод, анод – катод и анод – сетка. Эти емкости зависят от размеров и формы электродов, расстояния между ними и других показателей. Обычно эти емкости малы и составляют от 2 пФ для мало-мощных триодов и до 200 пФ для мощных.

*Емкость сетка – катод*  $C_{ск}$  – входная емкость, является дополнительной нагрузкой источника входного сигнала.

*Емкость анод – сетка*  $C_{ас}$  – проходная емкость, приводит к падению напряжения на внутреннем сопротивлении источника входного напряжения и уменьшает напряжение на входе триода.

Отрицательное влияние проходной емкости  $C_{ас}$  заключается в том, что выходное напряжение воздействует на вход лампы посредством ответвления тока из анодной цепи в цепь сетки. Поэтому любое изменение анодного напряжения через емкость  $C_{ас}$ , воздействуя на цепь сетки, может исказить усилимые сигналы и вызвать самовозбуждение усилителя.

*Емкость анод – катод*  $C_{ак}$  – выходная емкость триода, которая, шунтируя нагрузку усилительного каскада, снижает усиление.

Конструкция и значение параметров современных триодов чрезвычайно разнообразны и определяются главным образом их назначением. Триоды используются в различной радиоэлектронной аппаратуре на частотах до 10 ГГц в основном для генерирования электрических колебаний, усиления напряжения и мощности, а также для детектирования.



Недостатком триода является малый коэффициент усиления. Для его повышения можно увеличить частоту намотки управляющей сетки, но при этом уменьшится запирающее напряжение, и анодно-сеточная характеристика смещается вправо, где работа усилительной лампы становится затруднительной из-за возрастания сеточного тока. Кроме того, в триоде относительно велика проходная емкость  $C_{ac}$ , ухудшающая работу усилителя.

## 1.6. Тетроды

Из многосеточных электровакуумных ламп наибольшее распространение получили тетроды и пентоды. Недостатки триода устраняются в тетроде применением второй (экранной) сетки. Четырехэлектродные лампы (тетроды), имеющие кроме анода и катода две сетки, бывают трех типов: тетроды с экранирующей сеткой, тетроды с катодной сеткой и лучевые тетроды. В тетродах одна из сеток является управляющей и имеет отрицательное напряжение. Другая сетка располагается либо между управляющей сеткой и катодом и называется катодной сеткой, либо между управляющей сеткой и анодом и называется экранирующей (экранной) сеткой. Схематическое изображение тетродов приведено на рис. 1.7.

В тетродах с катодной сеткой на эту сетку подается небольшое положительное напряжение. Но так как эта сетка расположена близко к катоду, ее проницаемость  $D$  будет велика, и даже при малом напряжении на аноде ток анода будет значительным. Благодаря катодной сетке возрастает также крутизна характеристики. Вольт-амперные характеристики тетрода с катодной сеткой подобны характеристикам триода, но со значительно пониженным значением анодного напряжения.

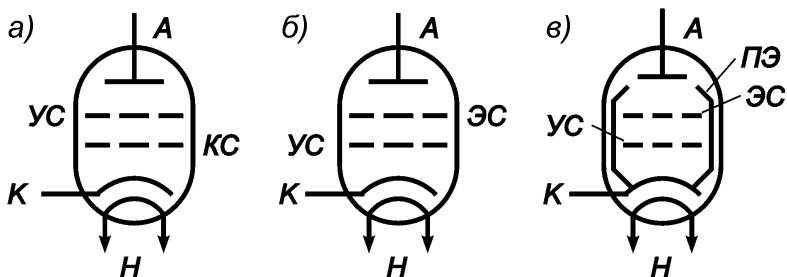


Рис. 1.7. Схематическое изображение тетродов с катодной сеткой (а), с экранной сеткой (б) и лучевого (в):  
 УС – управляющая сетка; КС – катодная сетка;  
 ЭС – экранная сетка; ПЭ – противодинаatronный электрод

В тетродах с экранной сеткой управляющая сетка выполняется редкой с тем, чтобы запирающее напряжение было большим и анодно-сеточные характеристики располагались в левой части; вторая сетка делается густой и сильно экранирует катод и управляющую сетку от анодного поля. Поэтому влияние анодного напряжения на напряженность электрического поля вблизи катода оказывается слабым, так как основное его поле создается экранной сеткой, на которую подается положительное напряжение ( $+U_{c2}$ ) несколько меньше анодного, т.е. порядка 0,5 – 0,8 анодного напряжения. Ослабление поля между анодом и управляющей сеткой уменьшает проходную емкость  $C_{ac}$  во много раз (ее величина становится равной 0,02 – 0,3 пФ вместо 3 – 4 пФ для триода), а ослабление анодного поля вблизи катода уменьшает влияние анодного напряжения на анодный ток, т.е. увеличивает коэффициент усиления, учитывая, что влияние потенциала управляющей сетки на анодный ток остается прежним. Таким образом, при одинаковой для триода и тетрода величине крутизны характеристик коэффициент усиления и внутреннее сопротивление тетрода будут значительно больше, чем у триода.

Зависимость анодного тока  $I_a$  от напряжений на управляющей и экранной сетках может быть представлена несколькими семействами характеристик. На рис. 1.8 показано два семейства статических сеточных характеристик, снятых при двух значениях напряжения на сетке, при этом  $U_{э2} > U_{э1}$ . Характеристики располагаются густым расходящимся пучком, что объясняется малым влиянием анодного напряжения на изменение анодного тока из-за действия экранирующей сетки.

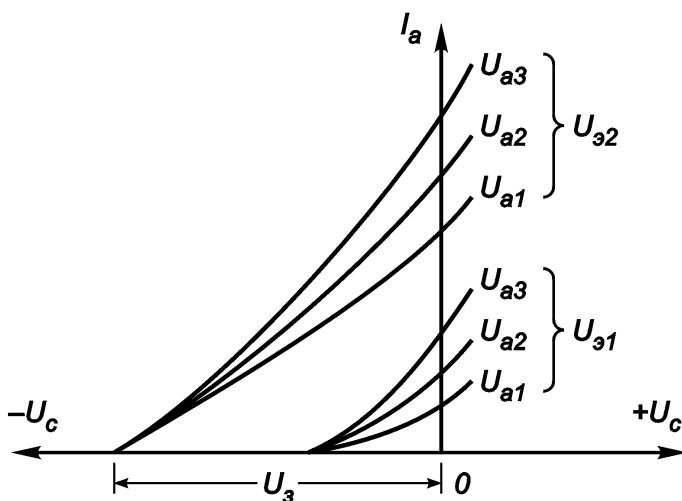


Рис. 1.8. Сеточные характеристики тетрода:

$$U_{a3} > U_{a2} > U_{a1}; U_{э2} > U_{э1}$$

Анодный ток тетрода с катодной сеткой можно определить по формуле

$$I_k = k(U_{kc} + D_{yc}U_{yc} + D_aU_a)^3, \quad (1.28)$$

где  $U_{kc}$  — напряжение на катодной сетке,  $U_{yc}$  — напряжение на

управляющей сетке,  $U_a$  – напряжение на аноде,  $D_{yc}$  – проницаемость управляющей сетки,  $D_a$  – проницаемость анода.

Типовые анодные характеристики тетрода с экранирующей сеткой (рис. 1.9) имеют характерные провалы кривых при малых значениях  $I_a$  и объясняются явлением *динатронного эффекта*, заключающегося в следующем. При малых напряжениях на аноде (до 10 – 20 В) и определенном напряжении на экранной сетке  $U_s = U_a/2$ , анодный ток резко возрастает, за счет чего экранный ток снижается. При повышении напряжения на аноде (более 10 – 20 В) появляются электроны вторичной эмиссии от анода, которые притягиваются экранной сеткой, при этом анодный ток падает, экранный – растет. При приближении величины напряжения анода к значению напряжения на экране анод начинает притягивать и вторичные электроны, поэтому вновь начинаются рост анодного тока и падение экранного тока. Характеристика анодного тока переходит в пологую кривую при соответствующем рабочем режиме, когда  $U_a = 2U_s$ . При динатронном эффекте внутреннее сопротивление тетрода становится на этом участке отрицательным. Как только тетрод начинает работать в режиме, соответствующем падающему участку анодной характеристики, усилительный катод на тетроде превращается в генератор.

Крутизна характеристики  $S$  тетродов лежит в пределах от 1 до 30 мА/В, внутреннее сопротивление  $R_i$  достигает сотен килоом, а коэффициент усиления  $\mu$  – несколько сотен. Тетроды используют для усиления и генерирования электрических колебаний на частотах до нескольких десятков мегагерц при полезной мощности до 10 кВт. Из-за динатронного эффекта приемо-усилительные тетроды не получили широкого распространения и были заменены лучевыми тетрами и пентодами. Генераторные тетроды применяются в различной радиоэлектронной аппаратуре, так как они работают обычно при напряжениях на аноде, значительно больших, чем на экрани-

рующей сетке, поэтому в таких тетрадах динаatronный эффект проявляется незначительно.

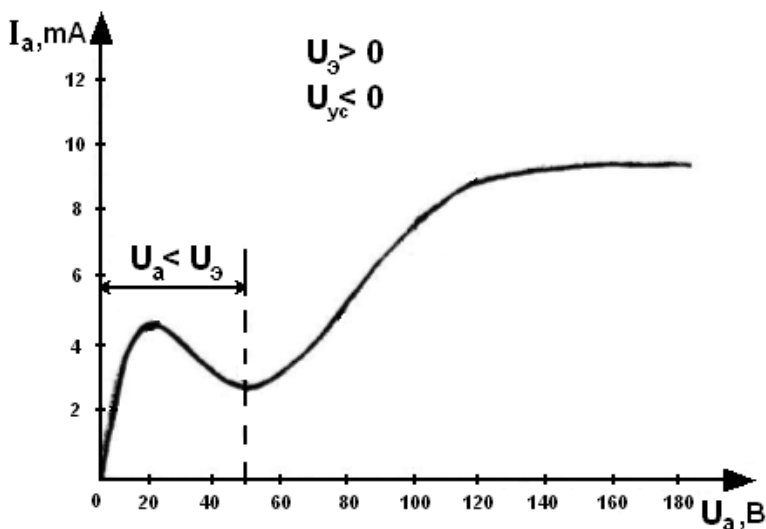


Рис. 1.9. Статическая анодная характеристика тетрода с экранирующей сеткой

*Лучевые тетроды.* Динаatronный эффект у тетродов можно устранить, если создать отрицательный пространственный заряд между анодом и экранной сеткой, который препятствовал бы перелету вторичных электронов с анода на экранную сетку. В лучевом тетроде это обеспечивается конструктивно. Во-первых, расстояние между анодом и экранной сеткой берется в несколько раз большим, чем расстояние между экранной сеткой и катодом, этим обеспечивается наличие большого отрицательного пространственного заряда. Во-вторых, введение дополнительных электродов, соединенных с катодом и расположенных выше экранной сетки, способствует уменьшению количества вторичных электронов, попадающих на экранную сетку. В-третьих, управляющая и экранная сетки

выполняются с одинаковым шагом витков и располагаются в лампе так, что витки экранирующей сетки находятся как бы в «тени» витков управляющей сетки. Это позволяет уменьшить ток экранирующей сетки в несколько раз по сравнению с обычными тетрами. Благодаря этому электроны попадают на анод несколькими расслоенными лучами.

Анодные характеристики лучевого тетра (рис. 1.10) показывают, что с увеличением анодного напряжения анодный ток растет без провалов. Каждая характеристика имеет два участка: крутой – в области малых значений анодного напряжения и пологий – при рабочих напряжениях. Достоинством лучевых тетров является малая величина экранного тока, составляющая 5 – 10 % от анодного вместо 30 % для экранированных тетров, но недостатком – большая величина межэлектродной емкости  $C_{ac}$  (порядка 0,3 – 2 пФ). Поэтому лучевые тетры применяются в основном для усиления мощности низкой частоты.

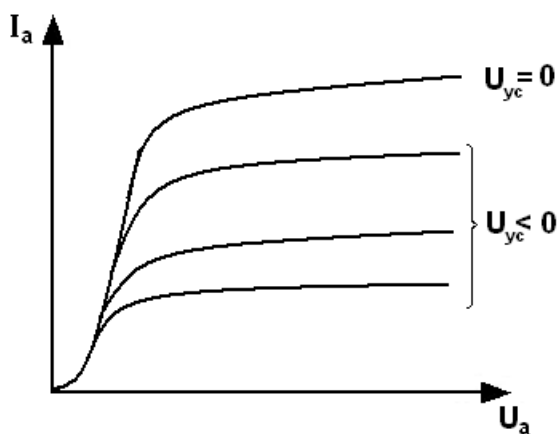


Рис. 1.10. Статическая анодная характеристика лучевого тетра

## 1.7. Пентоды

В пятиэлектродных лампах (пентодах) для устранения отрицательного эффекта вторичной эмиссии между анодом и экранирующей сеткой помещают еще третью сетку, называемую *защитной* или *антидинатронной*. В пентоде защитная сетка, соединенная с катодом (преимущественно внутри лампы) или имеющая потенциал, близкий к катодному, создает вблизи анода электрическое поле, отражающее эмитируемые анодом вторичные электроны, исключая тем самым вредное влияние динатронного эффекта.

Условное графическое изображение пентода приведено на рис. 1.11. Первая сетка (УС) является управляющей и служит для управления токами в лампе. Вторая сетка (ЭС) выполняет роль электростатического экрана и уменьшает проходную емкость между анодом и управляющей сеткой; как и в тетроде, ее называют экранирующей. Третья сетка (ЗС) – защитная, служит для подавления динатронного эффекта.

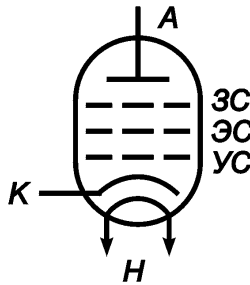


Рис. 1.11. Схематическое изображение пентода

Ток катода пентода равен сумме тока анода и тока, обусловленного защитной сеткой, и определяется в соответствии с законом «степени трех вторых» уравнением, аналогичным уравнению (1.28):

$$I_{\kappa} = I_a + I_{\text{э}} = k(U_{\kappa\text{с}} + D_{\text{yc}}U_{\text{yc}} + D_{\text{зс}}U_{\text{зс}} + D_aU_a)^{\frac{3}{2}}, \quad (1.29)$$

где  $U_{\text{зс}}$  – напряжение на защитной сетке;  $D_{\text{зс}}$  – проницаемость защитной сетки.

Если  $U_{\text{зс}} = 0$  и выполняется условие  $D_{\text{зс}} \gg D_a$ , то уравнение (1.29) приводится к виду

$$I_{\kappa} \approx I_a \approx k(U_{\kappa\text{с}} + D_{\text{yc}}U_{\text{yc}})^{\frac{3}{2}}, \quad (1.30)$$

то есть напряжение анода не влияет на ток катода, который в этом случае зависит от напряжения на катодной сетке  $U_{\kappa\text{с}}$  и от напряжения на управляющей сетке  $U_{\text{yc}}$ .

На основной поток электронов, летящих с катода на анод, защитная сетка существенного влияния не оказывает, так как энергия первичных электронов больше энергии вторичных. Поэтому высокие усилительные свойства электронных ламп в пентодах сохраняются, и коэффициент усиления  $\mu$  может быть более 1000, а внутреннее сопротивление  $R_i$  значительно больше, чем у тетрода, и может превышать 1МОм.

## 1.8. Комбинированные и многосеточные электронные лампы

Для уменьшения габаритов электронных устройств и упрощения монтажа схем применяют комбинированные и многосеточные лампы.

Комбинированные электронные лампы – это лампы, у которых в одном баллоне находится несколько электронных систем, например, двойной диод – триод, двойной триод и т.п. Схематическое изображение комбинированных электронных ламп приведено на рис. 1.12.



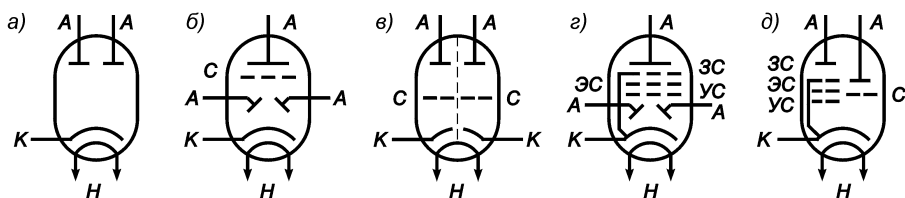


Рис 1.12. Схематическое изображение комбинированных электронных ламп:

- а) двойной диод; б) двойной диод – триод; в) двойной триод;  
г) двойной диод – пентод; д) триод – пентод

*Многосеточными* (или многоэлектродными) называются электронные лампы, имеющие анод, катод и более трех сеток. У таких ламп несколько электродов могут выполнять одинаковые функции, например, анодный ток лампы может управляться двумя напряжениями, каждое из которых подается на свою сетку. Для уменьшения влияния между двумя управляющими сетками располагают дополнительную экранирующую сетку. Электронные лампы с шестью электродами (четырьмя сетками) называют *гексодами*; семью электродами (пятью сетками) – *гептодами*, с восьмью электродами (шестью сетками) – *октодами* (рис. 1.13)

Роль добавочных сеток определяется спецификой работы лампы. Например, двум сеткам отводится роль управляющих, двум – роль экрана, одной из сеток – роль дополнительного анода.

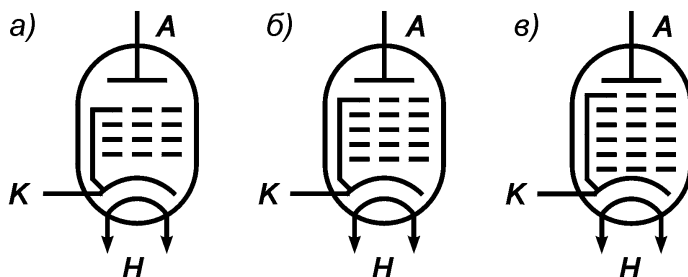


Рис 1.13. Схематическое изображение многосетчатых ламп:  
а) гексод; б) гептод; в) октод

### Контрольные вопросы

1. Какие приборы называются электровакуумными, электронными, ионными?
2. Дайте понятие работы и потенциала выхода.
3. Что такое электронная эмиссия? Какие виды эмиссии Вы знаете?
4. Расскажите о конструкции и электродах электровакуумных ламп.
5. Какие катоды применяются в электронных лампах?
6. Какую функцию анод выполняет в электронной лампе?
7. Для чего применяются сетки в электронных лампах?
8. Расскажите о диоде и его вольтамперной характеристике.
9. Какие параметры диодов Вы знаете?
10. Какие параметры диодов относятся к максимально допустимым?
11. Какую электронную лампу называют триодом?
12. Нарисуйте семейство анодно-сеточных и анодных характеристик триода.
13. Какими электрическими параметрами характеризуется триод?
14. Напишите основное уравнение триода. Что это уравнение показывает?

15. Охарактеризуйте емкостные параметры триода.
16. Какие бывают типы триодов?
17. Охарактеризуйте сеточные характеристики тетрода.
18. Расскажите о динаatronном эффекте тетродов.
19. Как устраняется динаatronный эффект в лучевых тетродах?
20. Расскажите о пентодах и их конструкции.
21. Какие комбинированные электронные лампы Вы знаете?
22. Какие электронные лампы называются многосеточными?

## 2. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРИБОРЫ

### 2.1. Общие сведения

*Электронно-лучевыми приборами* (ЭЛП) называют такие электронные электровакуумные приборы, в которых используется поток электронов, сконцентрированный в форме луча или пучка лучей. Электронно-лучевой прибор, имеющий форму трубки, вытянутой в направлении луча, обычно называют *электронно-лучевой трубкой* (ЭЛТ).

Управление пространственным положением электронного луча осуществляется с помощью электрических и магнитных полей, а управление плотностью тока – с помощью электрических полей.

Основными элементами ЭЛТ являются: колба, электронный прожектор, отклоняющая система, приемник электронов.

Колбу чаще всего делают из стекла. Часть ее внутренней поверхности покрывают слоем графита, называемого аквадагом. На аквадаг подают положительное напряжение, что предотвращает накопление электронов на внутренней поверхности колбы.

Электронный прожектор служит для создания сфокусированного электронного луча с требуемой плотностью тока. Он состоит из источника электронов и электронно-оптической системы.

Источником электронов является катод, изготовленный в виде цилиндра, внутри которого располагается подогреватель, а на торцевую поверхность наносится оксидное покрытие. Катод размещается внутри цилиндра, дно которого выполнено в виде диска с отверстием, через которое пролетают электроны, излучаемые катодом. Этот цилиндр называют *управляющим электродом* или *модулятором*. На модулятор относительно катода подают отрицательное напряжение, ре-

гулировка которого приводит к изменению количества электронов, проходящих через отверстие, и, следовательно, к изменению плотности электронного потока. Часть электронно-оптической системы, служащую для управления диаметром луча, называют *фокусирующей системой*. Отклоняющая система ЭЛТ предназначена для управления положением сфокусированного луча. В основу принципа действия фокусировки и отклонения электронного луча положено взаимодействие электрона с электрическим или магнитным полем.

Приемником электронов служит люминесцентный экран, преобразующий энергию электронного луча в световое излучение, или диэлектрическая пластина, на которой под действием электронного потока образуется потенциальный рельеф.

Многообразные электронно-лучевые приборы принято классифицировать по характеру преобразования входного сигнала в выходной. По этому принципу можно выделить следующие основные группы приборов.

Приемные электронно-лучевые трубки – электронно-лучевые приборы, преобразующие электрические сигналы в оптическое изображение. Это осциллографические трубки, кинескопы, индикаторные радиолокационные трубки, а также трубки, предназначенные для решения более узких задач (фототелеграфия и пр.).

Приборы, преобразующие электрические сигналы в сигналы другой частоты. К ним относятся запоминающие трубки (потенциалоскопы) – электронно-лучевые приборы, обладающие свойством хранить и считывать в течение определенного времени введенную информацию, а также электронно-лучевые коммутаторы, предназначенные для переключения электрических цепей с очень высокой скоростью при помощи электронного луча.

Приборы, предназначенные для преобразования одного изображения в другое, с «переносом» в другую область спек-

тра. Приборы, позволяющие преобразовать, например, изображение, полученное в невидимых инфракрасных, ультрафиолетовых или рентгеновских лучах, в видимое изображение, называются электронно-оптическими преобразователями.

Передающие электронно-лучевые трубки – электронно-лучевые приборы, преобразующие оптическое изображение в электрические сигналы.

В последние годы в связи с значительным повышением быстродействия ЭВМ, появлением высокоскоростных систем автоматического контроля и увеличением пропускной способности телеметрических комплексов появились устройства знаковой индикации и регистрации, в которых алфавитно-цифровые или графические данные формируются на экранах электронно-лучевых трубок.

Электронно-лучевые приборы в зависимости от способа фокусировки и отклонения луча бывают трех типов: электростатические, магнитные и комбинированные. В *электростатических* ЭЛП используют электростатические системы фокусировки и отклонения луча, *магнитные* имеют магнитные системы фокусировки и отклонения луча, а в *комбинированных* обычно применяются электростатическая фокусировка и магнитное отклонение луча.

## **2.2. Электронно-лучевые приборы с электростатическим отклонением луча**

Устройство ЭЛП с электростатическим отклонением луча показано на рис.2.1.

Стеклянный баллон ЭЛП имеет форму колбы, в которой создан глубокий вакуум. Электронная пушка (электронный прожектор) состоит из катода 1 косвенного подогрева с нитью накала 2, управляющего электрода (модулятора) 3, двух цилиндрических анодов (4 – фокусирующий и 5 – ускоряющий), фокусирующих электронный луч на экране 8.

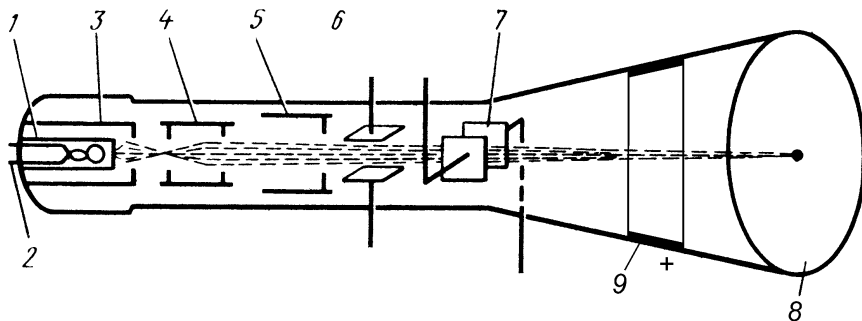


Рис.2.1. Схема устройства электронно-лучевого прибора с электростатическим отклонением луча

Катод 1 представляет собой никелевый цилиндр, внутри которого расположен вольфрамовый подогреватель 2. На торцевой части катода с наружной стороны нанесен оксидный слой, что обеспечивает эмиссию электронов в одну сторону. Управляющий электрод 3, окружающий катод, имеет в основании небольшое отверстие (1 – 3 мм) и находится под небольшим отрицательным потенциалом относительно катода.

Под действием электронного поля между катодом и управляющим электродом на электрон действует сила  $F$ , которую можно разложить на две составляющие: тормозящую  $F'$  и прижимающую электрон к оси  $F''$ . В результате электроны большей частью проходят в отверстие управляющего электрода 3 и далее попадают узким расходящимся пучком в зону

действия анодов 4, 5. Меняя потенциал управляющего электрода, регулируют количество электронов, вылетающих из его отверстия, т.е. регулируют яркость изображения на экране 8.

Вылетев из отверстия управляющего электрода, электроны снова отклоняются от оси луча. Для последующей фокусировки луча служат аноды 4 и 5. На оба анода подается высокое положительное напряжение (200 – 500 В на первый анод, 1000 – 2000 В на второй), причем на второй в 5 раз больше, чем на первый. Узкое отверстие в середине первого анода 4 вырезает центральную часть электронного пучка, а наличие поля между анодами ускоряет и сжимает этот пучок к оси луча в направлении экрана.

Экран ЭЛП покрыт тонким слоем вещества специального состава (*люминофора*), который светится под действием электронной бомбардировки. Когда сфокусированный луч попадает в какую-либо точку экрана, эта точка начинает светиться. В качестве люминофоров для экранов ЭЛП используют оксиды цинка, бериллиевого цинка, смеси сульфата цинка с сульфатом кадмия и др. Они определяют зачастую цвет свечения. Например, виллемит ( $Zn_2SiO_4$ ) дает зеленое свечение, сульфид цинка ( $ZnS$ ) – светло синее, окись цинка ( $ZnO$ ) – фиолетовое. Эти материалы обладают также свойством послесвечения, т.е. продолжают светиться некоторое время после прекращения ударов электронов.

Электроны, попадающие на экран, вызывают его свечение за счет отдачи энергии в виде светящегося потока диаметром меньше одного миллиметра и, кроме того, выбивают из экрана вторичные электроны, число которых может быть больше числа первичных. Для отвода вторичных электронов конусообразная часть баллона покрывается слоем аквадага 9 (аквадаг – коллоидный раствор графита в жидком стекле). Обычно слой аквадага соединяется со вторым анодом и имеет тот же потенциал.



Испускаемый электронной пушкой пучок электронов после анодов проходит сначала между *вертикально отклоняющими* (ВО) пластинами 6, а затем между *горизонтально отклоняющими* (ГО) пластинами 7. Подача, например, положительного напряжения на верхнюю пластину ВО вызывает отклонение электронов вверх на  $d$  мм. Перемена знака напряжения вызывает изменение направления отклонения.

Отношение смещения  $d$  к вызывающему его напряжению  $U$  называется *чувствительностью* электронно-лучевого прибора

$$S = \frac{d}{U} \text{ (мм/В)}. \quad (2.1)$$

Подобное же действие оказывает и напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах с той лишь разницей, что чувствительность в горизонтальном направлении несколько меньше из-за более близкого расположения пластин к экрану. Таким образом, изменяя напряжение на вертикальных и горизонтальных отклоняющих пластинах и его полярность, можно менять угол и направление смещения электронного луча как по вертикали, так и по горизонтали, следовательно, и точка свечения экрана будет перемещаться как по вертикали, так и по горизонтали.

Кроме описанного ЭЛП с одним лучом, в измерительной практике применяются приборы с двумя и более лучами, в которых в одном баллоне с общим экраном совмещено несколько систем однолучевого прибора.

Примером ЭЛП, использующего электронное отклонение луча, является осциллографический ЭЛП (или просто осциллограф), предназначенный для наблюдения, записи, измерения и контроля периодически изменяющихся во времени электрических параметров (напряжения, тока и др.). Для получения кривой исследуемого напряжения  $U$  оно подводится к

вертикально отклоняющим пластинам. К горизонтально отклоняющим пластинам подводится напряжение развертки  $U_p$ , имеющее пилообразную форму, от специального генератора, смонтированного внутри осциллографа. Под действием пилообразного напряжения электронный луч перемещается горизонтально по экрану слева направо за установленное время и затем за значительно меньшее время быстро возвращается в исходное положение, после чего вновь движется слева направо и т.д. Если на вертикально отклоняющих пластинах напряжения нет, то луч по экрану перемещается в виде горизонтальной линии. При подаче на вертикально отклоняющие пластины исследуемого напряжения  $U$  электронный луч под влиянием электрического поля этих пластин будет отклоняться в вертикальном направлении на расстояние, пропорциональное мгновенному значению исследуемого напряжения.

Таким образом, при одновременной подаче на отклоняющие пластины напряжения развертки и исследуемого напряжения электронный луч вычертит на экране кривую изменения значений исследуемой функции, устойчивости которой способствует световая инерция экрана.

### **2.3. Электронно-лучевые приборы с магнитным отклонением луча. Кинескопы**

Электронно-лучевой прибор для преобразования телевизионного сигнала в видимое изображение называется *кинескопом*. Кинескопы применяются для наблюдения черно-белых и цветных изображений непосредственно на экране прибора или при проецировании изображения на внешний экран.

Различают кинескопы монохромные и цветные. Монохромный (обычно черно-белый) состоит из вакуумноплотной оболочки с горловиной и стеклянным днищем, на внутреннюю поверхность которого нанесен люминесцентный экран. В

горловину вмонтирован электронный прожектор, формирующий электронный пучок (рис. 2.2).

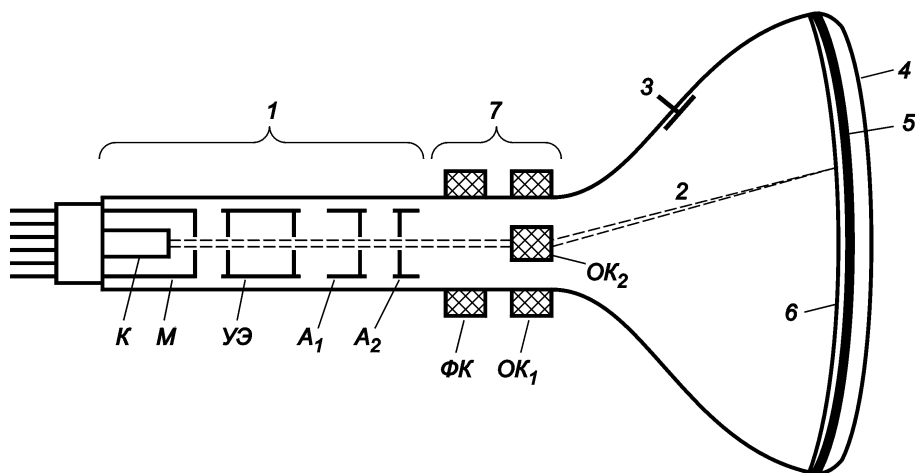


Рис.2.2. Схема кинескопа для черно-белого телевидения: 1 – электронный прожектор; 2 – электронный пучок; 3 – анодный вывод; 4 – днище стеклооболочки; 5 – люминесцентный экран; 6 – алюминиевое покрытие; 7 – отклоняющие системы; К – катод; М – модулятор (управляющий электрод); УЭ – ускоряющий электрод; А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub> – аноды; ФК – фокусирующая катушка; ОК<sub>1</sub>, ОК<sub>2</sub> – отклоняющие катушки

Электронный прожектор в кинескопе того же устройства и назначения, что и в приборах с электростатическим отклонением луча. Второй анод А<sub>2</sub> для ускорения электронов вдоль оси может быть выполнен в виде слоя аквадага (графита) на части внутренней поверхности горловины и конической части

колбы. Луч фокусируется магнитным полем, возбуждаемым постоянным током специальной фокусирующей катушки ФК. Под действием неоднородного магнитного поля внутри этой катушки электроны при своем движении отклоняются к центральной оси и фокусируются на экране.

Магнитные фокусирующие системы по сравнению с электростатическими потребляют значительно большую мощность, но обеспечивают намного более острую фокусировку луча.

Отклонение электронного пучка в горизонтальном и вертикальном направлениях достигается поперечными магнитными полями отклоняющих катушек ОК<sub>1</sub> и ОК<sub>2</sub>.

Магнитные отклоняющие системы по сравнению с электростатическими позволяют получить более равномерное отклонение луча в пределах большего угла. Недостатком магнитных отклоняющих систем является инерционность, поэтому их в основном используют на частотах звукового диапазона. Электростатические отклоняющие системы практически безинерционны.

Таким образом, в местах падения сфокусированного (повторим, с помощью электростатической системы) электронного пучка на экране появляется свечение, яркость которого пропорциональна интенсивности пучка, причем цвет свечения зависит от состава люминофора, используемого при формировании экрана. Интенсивность пучка электронов изменяется в соответствии с подаваемыми на управляющий электрод проектора видеосигналами. С помощью магнитной отклоняющей системы, описанной выше, модулированный пучок развертывается в прямоугольный растр, синхронизированный с растром передающего телевизионного пробора, высвечивая на люминесцентном экране строку за строкой и воспроизводя, таким образом, кадр за кадром передаваемое изображение. Благодаря инерционности зрения мы видим на экране слитное изображение. Внутреннее проводящее покрытие вместе с

внешним проводящим покрытием конуса образуют конденсатор фильтра высоковольтного выпрямителя. Для повышения яркости изображения и предотвращения образования так называемого ионного пятна, возникновение которого связано с разрушением люминофора в центральной части экрана потоком отрицательных ионов, как правило, на поверхность люминофора напыляется пленка алюминия толщиной 0,05 – 3 мкм, прозрачная для электронов.

Для воспроизведения изображения движущихся объектов обычно выбирают люминофоры с временем послесвечения от 0,01 до 0,1 с.

Выпускаемые для бытовой аппаратуры кинескопы имеют полностью стеклянную оболочку с прямоугольным экраном, размеры которого по диагонали составляют от 6 до 67 см. Угол отклонения электронного пучка между крайними положениями равен  $55 - 70^\circ$  у кинескопов с диагональю экрана до 16 см и  $90 - 110^\circ$  у кинескопов с диагональю свыше 23 см. Яркость светлых участков изображения достигает  $150 - 200 \text{ кд/м}^2$  при анодном напряжении 12 – 20 кВ и токе пучка в несколько сотен микроампер. Применяемые обычно в кинескопах оксидные катоды с косвенным подогревом обеспечивают работоспособность приборов в течение нескольких тысяч часов при вакууме  $10^{-4} - 10^{-5}$  Па, поддерживаемом в процессе работы напыленным геттером.

В настоящее время наибольшее распространение получил трехлучевой цветной кинескоп с теневой маской и мозаичным экраном. Действие цветного кинескопа основано на свойстве человеческого глаза воспринимать цвета как результат смешения в определенных количественных соотношениях трех основных цветов: красного, зеленого и синего. Цвет определяется относительными интенсивностями этих составляющих. На экран цветного кинескопа (рис. 2.3 а) диагональю 59 см наносится около  $1,5 \cdot 10^6$  точек люминофоров трех ос-

новых цветов: красного ( $ZnSe \cdot Cu$ ), зеленого ( $ZnS \cdot ZnSe \cdot Ag$ ) и синего ( $ZnS \cdot Ag$ ).

Точки сгруппированы в триады (рис. 2.3 б), каждая из точек имеет диаметр порядка 380 мкм и должна занимать на экране расчетное место с точностью  $\pm 5$  мкм. Вблизи мозаичного экрана 1 размещают маску 2 из нержавеющей стали толщиной 150 мкм с отверстиями диаметром  $240 \pm 5$  мкм. Число отверстий равно числу триад, т.е. около  $0,5 \cdot 10^6$  по всей площади маски. Отверстия изготавливают методом фотолитографии.

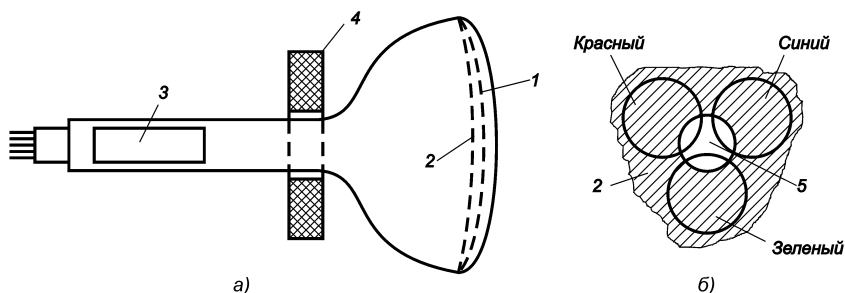


Рис. 2.3. Схема устройства цветного масочного кинескопа: 1 – мозаичный экран; 2 – маска; 3 – прожектор с электростатической фокусировкой; 4 – отклоняющая магнитная система; 5 – отверстие в маске

В горловине трубки размещают три электронных прожектора с электростатической фокусировкой 3. Электронные лучи, сформированные прожекторами и несущие информацию о соотношении красной, зеленой и синей компонент в переда-

ваемом изображении, отклоняются общей магнитной системой так, что оси пучков ряда пересекаются на маске в одной точке. При этом каждый из электронных лучей попадает сквозь отверстия маски только на «свою» одноцветную группу люминофоров. Каждый люминофор возбуждается электронным лучом своего электронного прожектора. Интенсивность свечения и результирующий цвет изменяются тремя модуляторами. Для того, чтобы при любом отклонении лучей они возбуждали зерна только «своих» люминофоров, перед экраном располагается теньевая маска 2 с отверстиями. Триады люминофоров располагают напротив соответствующих отверстий и потому в любой точке экрана можно получить необходимый цвет, варьируя токи электронных лучей. Дискретность светящихся элементов глазом не воспринимается, и светящееся изображение кажется сплошным. На коническую часть баллона наносится внутреннее токопроводящее покрытие с выводом наружу (анод кинескопа), снаружи также наносится слой графита, как и у черно-белых кинескопов.

#### **2.4. Индикаторный электронно-лучевой прибор**

*Индикаторный электронно-лучевой прибор* – это приемный прибор, предназначенный для отображения информации в условной форме: в виде светящихся знаков, графиков или полутонного изображения. Применяется на выходе индикаторных устройств в системах автоматизированного проектирования, информационного поиска; в различного исполнения радиолокаторах и т.д. По назначению, принципу действия и другим признакам индикаторные электронно-лучевые приборы делятся на запоминающие и без запоминания, индивидуального и коллективного пользования, самосветящиеся и светопланарные, монохромные и цветные.

Наиболее многочисленную группу составляют самосветящиеся индикаторные электронно-лучевые приборы без запоминания. В таких приборах электронный пучок, создавае-

мый электронным прожектором с электростатической или магнитной фокусировкой и отклоняемый, как правило, электромагнитной отклоняющей системой, вызывает в местах облучения свечение люминесцентного экрана, яркость которого зависит от тока электронного пучка.

Важным достижением явилось создание цветных индикаторных электронно-лучевых приборов, позволивших увеличить информационную емкость индикаторов благодаря возможности цветного кодирования отображаемых данных и повысить скорость и надежность их распознавания и восприятия. Управление цветом свечения в таких индикаторах осуществляется, например, изменением энергии электронов (ускоряющего напряжения). В этом случае экран образуется с помощью двух люминофоров с различным цветом свечения (обычно красным и зеленым) и барьерным слоем, разделяющим друг от друга слои обоих люминофоров. При относительно малой энергии электронов (порядка 6 – 7 кэВ) светится только открытый (например, красный) люминофор с так называемой сублинейной зависимостью яркости от напряжения (кривая 1 на рис. 2.4).

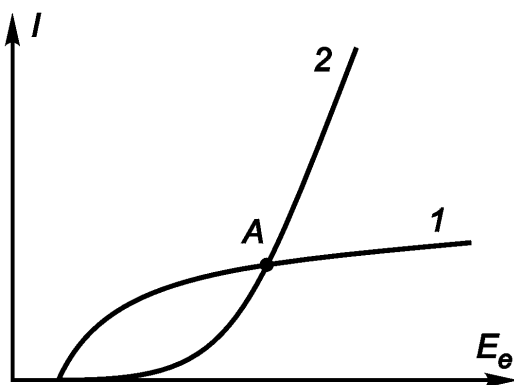


Рис. 2.4. Зависимость яркости свечения люминесцентного экрана  $I$  от энергии электронов  $E_e$ :



- 1 – сублинейная характеристика свечения;
- 2 – сверхлинейная характеристика свечения

При большей энергии (порядка 12 – 18 кэВ) свечение красного люминофора достигает насыщения (точка А на рис. 2.4.), электроны проникают через барьер и возбуждают зеленый люминофор с другой по виду характеристикой (кривая 2 на рис. 2.4). Для промежуточных значений энергии (при сравнительных яркостях компонентов) цвет свечения оказывается оранжевым или желтым.

В случае отображения редко повторяющейся или однократно появляющейся информации используются запоминающие электронно-лучевые приборы с видимым изображением, способные длительное время воспроизводить однократно записанную информацию.

Основные параметры индикаторного электронно-лучевого прибора: разрешающая способность или минимальная ширина воспроизводимой линии (обычно 0,2 – 0,4 мм) и яркость свечения экрана (лежит в диапазоне от нескольких десятков до нескольких тысяч кандел на квадратный метр).

## **2.5. Запоминающие трубки**

Запоминающими трубками или потенциалоскопами называются электронно-лучевые приборы, предназначенные для накопления или «запоминания» определенной информации ее последующего воспроизведения, однократного или многократного.

Информация вводится в виде последовательных электрических импульсов или проектированием на фоточувствительную мишень оптического изображения.

Считываемая информация выводится в виде последовательных электрических импульсов, иногда – в виде оптического изображения. Существует много разновидностей запоминающих трубок, среди них наиболее распространены по-

тенциалоскопы с барьерной сеткой и графekoны – приборы, преобразующие электрические сигналы в электрические.

*Потенциалоскопы с барьерной сеткой* (рис. 2.5) состоит из электронного прожектора 1, мишени из диэлектрика с сигнальной пластиной на обратной стороне 2, барьерной сетки, расположенной перед поверхностью диэлектрика, 3 и коллектора вторичных электронов 4. Фокусирующая 5 и отклоняющая 6 системы могут быть магнитные и электростатические. Для полного использования мишени применяется спиральная развертка 7.

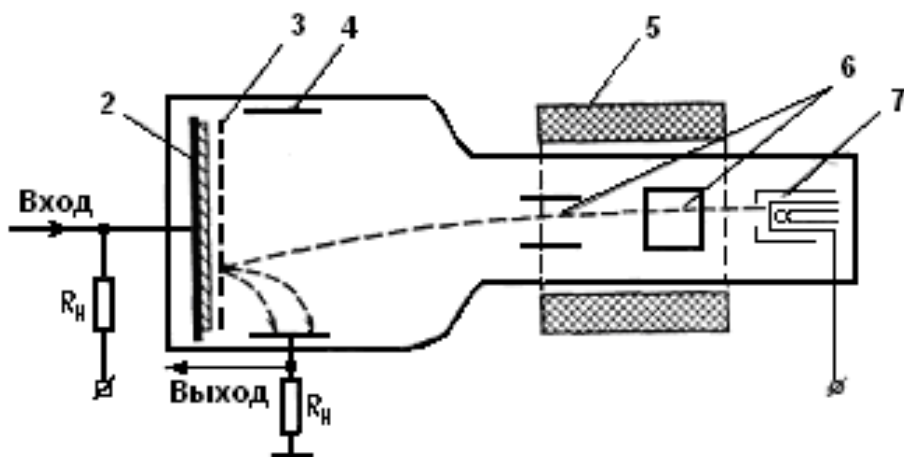


Рис.2.5. Потенциалоскоп с барьерной сеткой

Входные сигналы подводятся к сигнальной пластине, выходные снимаются с нагрузочного резистора  $R_n$ , включенного в цепь коллектора. Потенциалы барьерной сетки и сиг-

нальной пластины одинаковы и равны нулю. Барьерная сетка вблизи поверхности мишени препятствует перераспределению вторичных электронов по поверхности мишени и обеспечивает высокое качество потенциального рельефа.

При отсутствии входных сигналов и развертывании мишени лучом прожектора элементарные конденсаторы – зерна мишени заряжаются до равновесного потенциала, в цепи коллектора протекает постоянный ток, выходной сигнал равен нулю.

Если к сигнальной пластине подвести входной сигнал положительной полярности, то ток вторичных электронов уменьшится и на  $R_n$  появится выходной сигнал той же полярности. Таким образом, когда к сигнальной пластине прикладывается входной сигнал, луч наносит на поверхность мишени потенциальный рельеф, являющийся линейным воспроизведением изменений этот сигнала.

При необходимости (считывании информации) поверхность мишени подвергается развертке лучом, рельеф при этом снимается. В цепи коллектора появляются соответствующие сигналы.

Время хранения информации – от долей секунд до нескольких часов и даже суток, число считываний – от единиц до сотен тысяч.

*Графekon* – запоминающая трубка с двумя электронными прожекторами и диэлектрической мишенью (рис. 2.6). Эта трубка, включенная в соответствующий участок тракта изображения, преобразует медленную радиально-круговую радиолокационную развертку (первичную) в любой вид телевизионной развертки (вторичную), а также обеспечивает сохранение изображения в течение длительного времени.

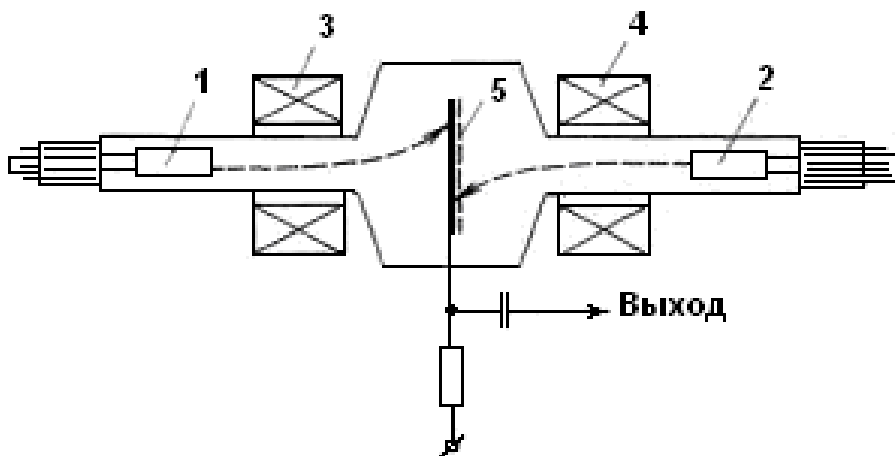


Рис.2.6. Запоминающая трубка с двумя электронными прожекторами и диэлектрической мишенью (графекон)

Графекон имеет два электронных прожектора: записывающий 1 и считывающий 2. Их электронные лучи независимо управляются соответствующими отклоняюще-фокусирующими системами 3 и 4. В средней части трубки имеется мишень 5, обладающая свойством «запоминания» изображения, нанесенного на нее записывающим лучом. Это изображение может длительное время сохраняться на мишени. В течение всего этого периода сигнал может непрерывно считываться. Таким образом, если на записывающей стороне графекона наносится радиолокационное изображение в медленной радиально-круговой развертке, то на читающей стороне может быть получено постоянное телевизионное изображение в быстрой развертке.

Отечественная промышленность выпускает различные типы графеконов с односторонней и двусторонней мишенью.

## 2.6. Передающие телевизионные трубки

В 1930 г. появились передающие трубки с накоплением заряда (иконоскопы), положившие начало современному телевидению. Иконоскопы позволили резко увеличить чувствительность и осуществить передачу с высоким качеством. Несколько позже разработаны иконоскопы с переносом изображения – супериконоскопы, обладающие еще более высокой чувствительностью. Передающие телевизионные трубки иного принципа – ортиконы появились спустя примерно десять лет. Ортикон – потенциалоскоп, в котором используется перезарядное считывание.

В современном телевидении применяют два вида передающих трубок – суперортиконы, используемые в студийных и натуральных передачах с низкой освещенностью, и видиконы, применяемые в переносных и малогабаритных телекамерах, в том числе и для цветного телевидения. Суперортиконы сложны и дороги, требуют специальных систем обслуживания питания, фокусировки и другое, но имеют высокую чувствительность и хорошую передачу градаций яркости. Видиконы намного проще в эксплуатации, имеют малые габариты и особенно хороши при достаточной освещенности снимаемого объекта.

*Суперортикон* – электронно-лучевая трубка, в которой использованы накопление заряда, усиление изображения за счет переноса с фотокатода на мишень и вторично-электронное усиление выходного сигнала. Он имеет двухстороннюю мишень, с одной стороны которой производится запись – накопление заряда, а с другой – считывание (рис. 2.7).

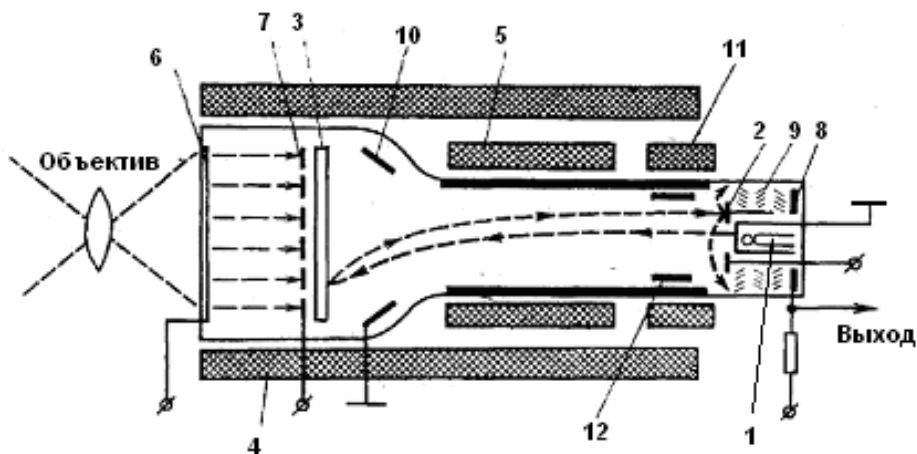
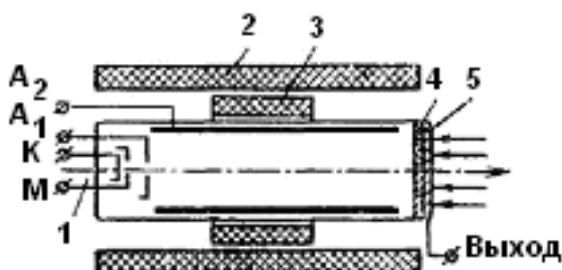


Рис.2.7. Схема устройства суперортикона

Электронный прожектор суперортикона 1 собирается по триодной схеме, его анодная диафрагма 2 имеет отверстие диаметром 30 – 50 мкм, которое отображается на мишени 3 узким лучом с током 1 – 2 мкА. Электронный луч формируется при помощи длинной магнитной линзы 4. Для отклонения луча используются две пары длинных катушек 5. На внутренней стороне торца прибора нанесен полупрозрачный фотокатод 6, на который проецируется передаваемое изображение. Мишень – стеклянная пластинка толщиной в несколько микрон, перед которой со стороны катода располагают мелкоструктурную барьерную сетку 7. Выходным электродом прибора 8 является коллектор вторично-электронного умножителя 9. Кроме того, имеются корректирующие элементы: тормозящее кольцо 10, корректирующая катушка 11 и вспомогательный анод 12.

*Видикон* является передающей трубкой с полупроводниковой фотопроводящей мишенью, накоплением заряда и пере-

зарядным считыванием. Конструкция видикона весьма проста (рис. 2.8).



**РИС. 2.8. КОНСТРУКЦИЯ ВИДИКОНА**

Электронная пушка 1 формирует электронный луч диаметром 20 – 30 мкм с током 0,3 – 0,5 мкА, который, как и в суперортиконе, с помощью длинной фокусирующей 2 и отклоняющей 3 катушек осуществляет развертку мишени 4, которая представляет собой тонкий слой фотосопротивления. Между стеклом баллона и фоточувствительным слоем нанесена полупрозрачная сигнальная пластина 5 из тонкого слоя металла, сквозь которую на фотослой проецируется передаваемое изображение. Вывод сигнальной пластины является выходным электродом прибора.

Для вещательного телевидения применяют видиконы с полным снятием потенциального рельефа для уничтожения последействия. Наоборот, в космическом телевидении, на метеорологических спутниках применяют видиконы с длительным хранением потенциального рельефа, с однократным считыванием и стиранием заряда, или с многократным считыванием.

Выбором материала мишени, совместно с применением светофильтров, обеспечивается требуемая спектральная чувствительность во всех участках спектра (цветное телевидение)

и в ближнем инфракрасном диапазоне (военные цели). Разрешение видиконов специального применения может достигать до 4000 строк.

### Контрольные вопросы

1. Какие приборы называются электронно-лучевыми?
2. Расскажите об устройстве ЭЛП с электростатическим отклонением луча.
3. Из каких элементов состоит электронный прожектор?
4. Что называется чувствительностью ЭЛП?
5. Расскажите о принципе работы осциллографического ЭЛП.
6. Расскажите об устройстве кинескопа.
7. Какое преимущество у магнитных отклоняющих систем по сравнению с электростатическими?
8. Расскажите о схеме устройства цветного масочного кинескопа.
9. Расскажите об индикаторном электронно-лучевом приборе.
10. Как происходит управление цветом свечения в цветном индикаторе?
11. Расскажите о потенциалоскопе с барьерной сеткой.
12. Расскажите об устройстве графекона.
13. Поясните устройство суперортикона.
14. Расскажите об устройстве видикона.



### 3. ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

#### 3.1. Элементарные процессы при разряде в газе

*Газоразрядные, или ионные приборы* – это электронные приборы, действие которых основано на явлениях, связанных с прохождением электрического тока через разреженный газ. В качестве наполнителей используются пары ртути, инертные газы, водород, а иногда водород в смеси парами воды. Давление наполнителя лежит в пределах от 0,1 до 10000 Па.

*Электрическим разрядом* называют совокупность процессов, связанных с прохождением электрического тока через газовую среду.

В отличие от электронных (вакуумных) приборов в газоразрядных (ионных) приборах ток создается не только направленным перемещением свободных электронов, но и перемещением заряженных частиц газа (или паров ртути) – ионов.

Движение электронов и ионов в разрядном промежутке между двумя электродами, один из которых – анод, а другой – катод, определяется как действием электрического поля (дрейфовое движение), так и *взаимодействием с частицами газовой среды* (беспорядочное перемещение). Под взаимодействием двух частиц понимается любое вынужденное изменение характеристик их движения или внутреннего состояния.

Все взаимодействия между частицами в газовом разряде делятся на упругие и неупругие. При *упругих взаимодействиях (столкновениях)* суммарная кинетическая энергия взаимодействующих частиц остается постоянной. Для *неупругих взаимодействий* характерно изменение суммарной кинетической энергии, которое обусловлено изменением внутренней энергии частиц. Если суммарная кинетическая энергия взаимодействующих частиц убывает, то внутренняя энергия одной из частиц возрастает (*неупругие столкновения первого рода*) и,

наоборот, если суммарная кинетическая энергия растет, то внутренняя энергия одной из частиц уменьшается (*неупругие столкновения второго рода*).

Упругое взаимодействие или рассеяние приводит к превращению направленного потока частиц в беспорядочное, хаотическое движение. Наиболее существенны три типа упругих взаимодействий: электрон-электронные, атом-атомные, ион-атомные, ион-ионные, электрон-атомные и электрон-ионные.

К неупругим столкновениям *первого рода* относятся следующие процессы:

– возбуждение атомов электронным ударом  $\bar{e} + A = e + A^*$ , где  $\bar{e}$  и  $e$  – соответственно быстрый и медленный электроны;  $A$  и  $A^*$  – соответственно невозбужденный и возбужденный атомы;

– ступенчатое электронное возбуждение  $\bar{e} + A^* = e + A^{**}$ , где  $A^{**}$  – атом, перешедший на более высокий энергетический уровень с уровня, соответствующего  $A^*$ ;

– ионизация  $\bar{e} + A = 2e + A^+$ , где  $A^+$  – положительный ион.

В результате этих неупругих взаимодействий часть кинетической энергии электронов переходит в энергию возбуждения или ионизации. При взаимодействии медленного электрона  $e$  с возбужденным атомом  $A^*$  возможно столкновение *второго рода*  $e + A^* = \bar{e} + A$ . Этот процесс является основным при «разрушении» возбужденных состояний.

В обычных условиях газ содержит небольшое количество свободных электронов и ионов, т.е. носителей заряда, абсолютное же большинство атомов и молекул газа электрически нейтрально, т.е. не заряжено, поэтому в обычных условиях газ является хорошим диэлектриком.

Проводимость газа может быть вызвана его ионизацией сильным электрическим полем, высокой температурой, радиоактивным излучением и т.п. Газ становится проводящим,

если он содержит большое количество носителей заряда – свободных электронов и ионов. Процесс образования носителей заряда называется *ионизацией газа*.

Ионные приборы наполнены разреженным газом, и электроны под действием электрического поля катод – анод при своем движении сталкиваются с атомами газа. При соударении электроны отдают часть своей энергии атомам газа. При достаточно большой скорости электрона энергия, полученная атомом газа, оказывается достаточной для его возбуждения или ионизации.

В возбужденном атоме один из его электронов переходит на более удаленную от ядра орбиту и из-за неустойчивости этого положения очень быстро ( $10^{-9} - 10^{-8}$  с) возвращается на свой прежний уровень, а атом газа излучает квант энергии. Каждый газ характеризуется своим потенциалом возбуждения  $U_B$ . Если свободный электрон имеет энергию  $E_e = eU_B$ , то появляется некоторая вероятность возбуждения.

В возбужденном (метастабильном) состоянии атом остается очень недолго ( $10^{-9} - 10^{-8}$  с), после чего электроны атома самопроизвольно (спонтанно) переходят в разрешенные, нормальные состояния.

При переходе из возбужденного в нормальное состояние избыточная энергия выделяется в виде квантов света. Каждый газ имеет свой характерный спектр излучения и цвет свечения: неон Ne – красный, гелий He – желтоватый, пары ртути Hg – зеленовато-голубой, пары серебра Ag – голубой и т.д. Если энергия, полученная атомами в результате соударения с электронами, достаточна для их расщепления на электроны и ионы, то происходит ионизация газа, т.е. появляются новые носители заряда – положительные ионы. Каждый газ характеризуется своим потенциалом ионизации  $U_{II}$ . Если электрон имеет энергию  $E_e = eU_{II}$ , появляется вероятность ионизации атома и, следовательно, развитие разряда. Скорость движения электронов, а, следовательно, их кинетическая энергия, зави-

сит от напряжения, т.е. возбуждение и ионизация атомов газа происходят при определенных значениях потенциала возбуждения  $U_B$  и потенциала ионизации  $U_{II}$ , причем  $U_{II} > U_B$ . Например, для паров ртути имеем  $U_B = 5$  В, а  $U_{II} = 10$  В.

При определенной степени ионизации газа может оказаться, что плотности отрицательных зарядов (электронов) и положительных (ионов) почти равны. Такое состояние сильно ионизированного газа называется *газовой плазмой*.

Предположим, что с поверхности катода под действием внешнего ионизатора в момент  $t_1$  вышло  $n_0$  электронов. В электрическом поле электроны движутся к аноду и, сталкиваясь с молекулами газа, ионизируют их. Вновь возникшие свободные электроны присоединяются к первичным  $n_0$  электронам и при дальнейшем движении к аноду также участвуют в объемной ионизации.

Образовавшиеся в процессе объемной ионизации ионы перемещаются по направлению к катоду и выбивают с его поверхности новые электроны, которые в свою очередь участвуют в процессе объемной ионизации. Таким образом, по мере приближения к аноду число электронов лавинообразно увеличивается. Это явление называют *лавиной заряженных частиц*.

При непрерывной ионизации газа с постоянной интенсивностью помимо расщепления атомов газа на электроны и ионы происходит обратный процесс их соединения (*рекомбинация*), т.е. превращение в нейтральные атомы, поэтому число носителей зарядов в единице объема остается постоянным.

### 3.2. Электрический разряд в газе

В разреженном газе, которым наполнен прибор, всегда существует небольшое количество электронов и ионов. Пусть к двухэлектродному газонаполненному прибору подведено напряжение  $U$  (рис. 3.1).

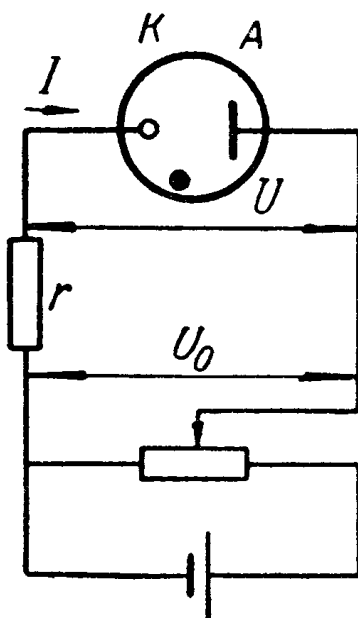


Рис. 3.1. Схема включения двухэлектродного газонаполненного прибора

Под действием электрического поля анод – катод отрицательно заряженные электроны устремляются к аноду, а положительно заряженные ионы – к катоду. При этом во внешней цепи прибора появится электрический ток. Если величина  $U$  невелика (до нескольких вольт), то через прибор течет очень маленький ток (меньший или равный  $1\text{нА}$ ), обусловленный начальной ионизацией под действием внешнего ионизатора (радиоактивное излучение, космические лучи и т.д.) и примерно пропорциональный напряжению (участок  $0A$  рис. 3.2).

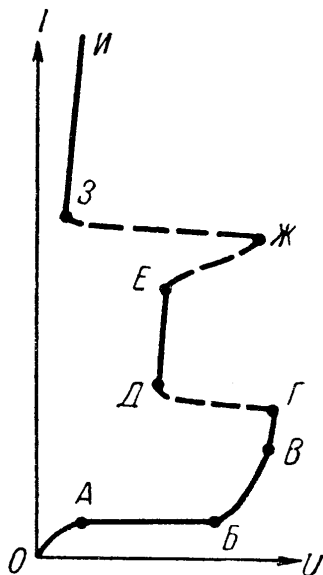


Рис. 3.2. Вольт-амперная характеристика двухэлектродного газонаполненного прибора

Электроны на пути к аноду непрерывно сталкиваются с атомами газа, которые в результате такого взаимодействия возбуждаются или ионизируются. При увеличении напряжения  $U$  (участок АБ) рост тока прекращается и наступает насыщение, обусловленное существующей интенсивностью ионизации. Обычно плотность тока на этом участке не превышает  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>. Дальнейшее увеличение напряжения  $U$  вызывает ударную ионизацию и значительный рост тока (участок БВ). Вся область ОВ соответствует *несамостоятельному разряду* в газе, который прекращается при удалении внешнего ионизатора. Данный разряд называется еще *темным разрядом*.

При повышении напряжения происходит ионизация атомов газа, при этом энергия, сообщенная атому газа свободным электроном, настолько велика, что происходит генерация

пары электрон – ион. Одновременно в газе наблюдается обратный процесс – рекомбинация или деионизация, и освобожденная энергия излучается в виде квантов, вследствие чего газ начинается светиться.

В области ВГ имеет место *тихий самостоятельный разряд*, который при уменьшении ограничительного сопротивления  $r$  сопровождается ростом тока почти без изменения напряжения  $U$  и переходит в *тлеющий разряд*. Напряжение, соответствующее точке Г, называется *напряжением зажигания тлеющего разряда*. После зажигания напряжение  $U$  скачком падает (участок ГД). При тлеющем разряде катод покрыт свечением. Если увеличивать ток  $I$  путем уменьшения сопротивления  $r$  или увеличения напряжения  $U_0$  (рис. 3.1), то свечение постепенно покрывает все большую поверхность катода, но напряжение  $U$  при этом почти не увеличивается, что соответствует *нормальному тлеющему разряду* (участок ДЕ). Тлеющий разряд характерен большими плотностями тока (более  $10^{-4}$  А/см<sup>2</sup>). Когда свечение покроет весь катод, то дальнейший рост тока связан с увеличением  $U$ , что соответствует *аномальному тлеющему разряду* (участок ЕЖ).

При дальнейшем увеличении тока (уменьшением  $r$  или увеличением  $U_0$ ) тлеющий разряд может скачком перейти в *самостоятельный дуговой разряд* (участок ЗИ). Напряжение в точке Ж называется *напряжением зажигания самостоятельного дугового разряда*. Ток при дуговом разряде может достигать сотен и тысяч ампер при напряжении 10 – 30 В.

На рис. 3.2 представлена лишь качественная картина вольт-амперной характеристики газоразрядного прибора, не отражающая действительных количественных соотношений между токами. Как видно из рис. 3.2, ток в газоразрядных приборах не подчиняется закону Ома, т.е. они являются нелинейными сопротивлениями, а участки ГД и ЖЗ на этой характеристике соответствуют отрицательным сопротивлениям.

Таким образом, в газоразрядных приборах используются два вида электрических зарядов – несамостоятельный и самостоятельный. Возникновение ионизации газа при несамостоятельном разряде происходит под воздействием внешних факторов ионизации либо источников электронной эмиссии. Для поддержания несамостоятельного разряда используется термоэлектронная или фотоэлектронная эмиссия.

Самостоятельный электрический разряд возникает при воздействии внешних факторов, но затем при установлении самостоятельного разряда действие внешних факторов ионизации не оказывает существенного влияния.

*Несамостоятельный разряд* в газах используется в приборах для измерения интенсивности ионизирующих излучений (пропорциональные счетчики, счетчики Гейгера, ионизационные камеры). *Тихий самостоятельный разряд* (область ВГ) используется в коронных стабилитронах, применяемых для стабилизации высоких напряжений (до 4 кВ) при малых токах (до 100 мА). *Нормальный тлеющий разряд* используется в неоновых лампах, стабилитронах, цифровых индикаторных лампах, тиратронах с холодным катодом, разрядниках и других приборах. *Аномальный тлеющий разряд* нашел применение в лампах дневного света. *Дуговой разряд* используется в газотронах, ртутных вентилях, тиратронах с горячим катодом.

### 3.3. Неоновые лампы

*Неоновые лампы* (или газосветные лампы) являются простейшими индикаторами тлеющего разряда, в основном используемыми для преобразования электрических сигналов в визуальную информацию (например, при настройке в резонанс колебательного контура). Это двухэлектродные приборы с ненакаливаемыми холодными электродами.

Цвет свечения зависит от вида газа. Обычно баллон неоновых ламп заполняют либо чистым неоном Ne, либо неоном



с небольшими примесями других инертных газов (обычно гелий He и аргон Ar). Давление газа в таких лампах лежит в пределах 25 – 40 кПа. Аргон вводят в газовую смесь для снижения напряжения возникновения разряда, однако яркость свечения при этом также снижается. Обычно неоновые лампы имеют оранжево-красное свечение. Для получения свечения других цветов (желтого, голубого, зеленого и т.д.) на внутреннюю поверхность лампы наносят люминофоры.

Вольт-амперная характеристика неоновой лампы показана на рис.3.3. Напряжение зажигания неоновой лампы  $U_3$  соответствует переходу несамостоятельного разряда в самостоятельный, при котором начинается образование лавины электронов, сопровождаемое интенсивной ионизацией и свечением газа. После зажигания ток  $I$  скачком возрастает до некоторого значения, определяемого ограничительным сопротивлением  $R_{огр}$ , включенном последовательно с лампой в цепь питания.

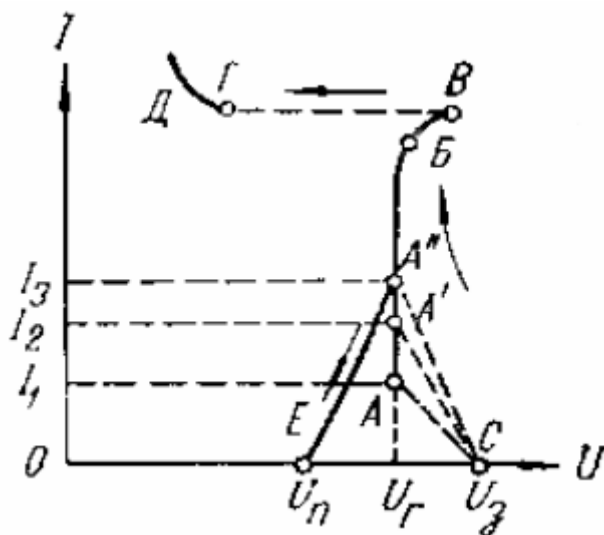


Рис. 3.3. Вольт-амперная характеристика неоновой лампы

Напряжение на лампе так же скачком снижается до величины *напряжения горения*  $U_G$ , причем всегда  $U_G < U_3$ . Линии СА, СА', СА'' соответствуют зажиганию лампы при разных значениях ограничительного сопротивления. Ток горения можно выразить как  $I_G = (E_a - U_G) / R_{огр}$ , где  $E_a$  – напряжение питания.

При уменьшении ограничительного сопротивления ток  $I_G$  растет, но напряжение на лампе  $U_G$  почти не изменяется. Этот режим работы соответствует нормальному тлеющему разряду. При дальнейшем увеличении тока  $I$  возникает аномальный тлеющий разряд (участок БВ рис. 3.3). При достаточном разогреве катода под действием тока  $I$  тлеющий разряд может перейти в дуговой (участок ГД), при котором напряжение резко снижается. Неоновые лампы не рассчитаны на дуговой разряд, поэтому для того, чтобы тлеющий разряд не перешел в дуговой, в цепь неоновых ламп обязательно включается ограничительное (балластное) сопротивление, которое иногда монтируется в цоколе лампы.

Уменьшение напряжения при уменьшении тока сопровождается гистерезисным явлением: нисходящая ветвь БА''Е характеристики располагается выше восходящей ветви САБ. Напряжение  $U_{II}$ , называемое *напряжением погасания*, соответствует прекращению самостоятельного разряда. При этом  $(U_G - U_{II})$  составляет несколько вольт.

### 3.4. Газоразрядные стабилитроны

*Стабилитронами называются приборы, предназначенные для поддержания на неизменном уровне напряжения на нагрузочном сопротивлении при значительных колебаниях тока нагрузки или питающей сети. Принцип работы газоразрядных стабилитронов основан на использовании нормального тлеющего разряда, при котором изменение тока в некото-*

рых пределах почти не вызывает изменения напряжения на электродах, что соответствует участку ДЕ на рис. 3.2.

*Газоразрядный стабилитрон* – двухэлектродный прибор с холодными электродами. Для уменьшения работы выхода электронов внутренняя поверхность катода активизирована. Газовые стабилитроны предназначены для работы в цепях постоянного тока; при их включении необходимо строго соблюдать полярность (рис. 3.4). Падение напряжения в схеме на рис. 3.4 распределяется между резистором ограничения  $R_{огр}$  и стабилитроном. При правильно подобранных элементах схемы падение напряжения на  $R_{огр}$  увеличивается или уменьшается на столько, на сколько увеличилось или уменьшилось напряжение источника питания.

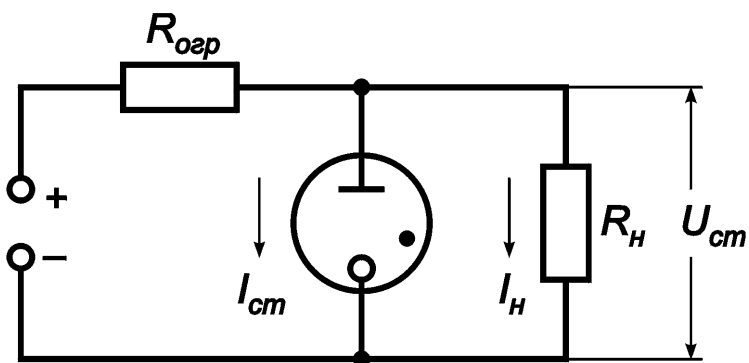


Рис. 3.4. Схема включения газоразрядного стабилитрона

Так как нагрузочный резистор  $R_н$  подключается параллельно стабилитрону, то и на нем напряжение будет почти постоянным. Пределы стабилизации ограничены минимальным  $I_{ст\ мин}$  и максимальным  $I_{ст\ макс}$  токами стабилитрона. При изменении тока в этих пределах падение напряжения на стабилитроне практически постоянное. Режим стабилизации напряжения в рассматриваемой схеме определяется напряжени-

ем горения разряда  $U_{\Gamma} = U_{CT}$ , являющимся основным параметром стабилитрона, и выпускаемые типы стабилитронов классифицируются по этому параметру. Основными параметрами стабилитронов являются также: напряжение зажигания разряда  $U_z$ ; изменение напряжения горения  $\Delta U_{\Gamma} = \Delta U_{CT}$ , внутреннее сопротивление  $R_i = \Delta U_{CT} / (I_{CT \text{ МАКС}} - I_{CT \text{ МИН}})$ . Область значений стабилизируемых напряжений равна 70 – 160 В, рабочий диапазон токов – от единиц до десятков миллиампер.

### 3.5. Газотроны

*Газотрон* – двухэлектродный неуправляемый газоразрядный прибор, наполняемый инертным газом, водородом или парами ртути, основанный на использовании тлеющего или несамостоятельного дугового разряда.

*Газотрон тлеющего разряда* представляет собой прибор с холодным катодом и графитовым анодом, работающий в режиме нормального тлеющего разряда; наполняется инертным газом (обычно He) при давлении 13 – 25 кПа. Выпрямляющее действие прибора основано на особенности конструкции электродов: поверхность катода во много раз превышает поверхность анода. Для повышения эмиссионной способности катода используют активирующее покрытие (цезий Cs, барий Ba).

Газотроны тлеющего разряда находят применение в качестве вентиля в системах зажигания двигателей внутреннего сгорания, при этом обратное напряжение может достигать нескольких киловольт, средний ток составляет 10 – 12 мА, а отношение максимального тока к среднему составляет 7 – 9.

### 3.6. Тиратроны

*Тиратроном* называется газотрон, снабженный третьим управляющим электродом (сеткой), расположенным между катодом и анодом.

Тиратрон тлеющего разряда представляет собой управляемый газоразрядный прибор с холодным катодом, в котором возникновение разряда в промежутке анод – катод осуществляется при помощи управляющего электрода.

Катод тиратрона (например, тиратрона типа МТХ-90) выполнен в виде никелевого цилиндра, внутренняя поверхность которого активируется цезием. Управляющий электрод выполнен в виде диска с отверстием в центре, через которое проходит стержневой анод из молибдена. Все это помещается в стеклянный баллон, заполненный неоном (давление 250 Па).

Уровень напряжения между анодом и катодом в тиратроне подбирается таким, при котором без участия поля управляющего электрода разряд невозможен. При подаче на управляющий электрод положительного потенциала (например, 70 – 80 В для тиратрона типа МТХ-90) между управляющим электродом и катодом возникает тихий самостоятельный разряд, создающий начальную ионизацию. Тихий разряд является подготовительным, облегчающим возникновение основного тлеющего разряда между анодом и катодом. При этом потенциал зажигания тиратрона снижается, и тиратрон открывается. Анодный ток, получаемый при открытии тиратрона, значительно больше тока в цепи его управляющего электрода, что характеризует усилительные свойства тиратрона.

При подаче напряжения между катодом и управляющим электродом (сеткой) в приборе возникает разряд между катодом и сеткой. Образовавшиеся в разряде заряженные частицы облегчают «пробой» основного газоразрядного промежутка: катод – анод. Изменением тока  $I_C$  во вспомогательном промежутке (катод – сетка) регулируют напряжение возникновения разряда  $U_3$  в основном промежутке. Пусковая характеристика тиратрона  $U_3 = f(I_C)$  приведена на рис. 3.5.

С момента зажигания тиратрона ток в анодной цепи его остается неизменным. После зажигания тиратрона изменением потенциала на сетке погасить его нельзя. Это объясняется

тем, что поле управляющей сетки нейтрализуется положительными ионами. Тиратрон закрывается лишь после снятия или снижения анодного напряжения до значения меньшего, чем напряжения горения  $U_G$ .

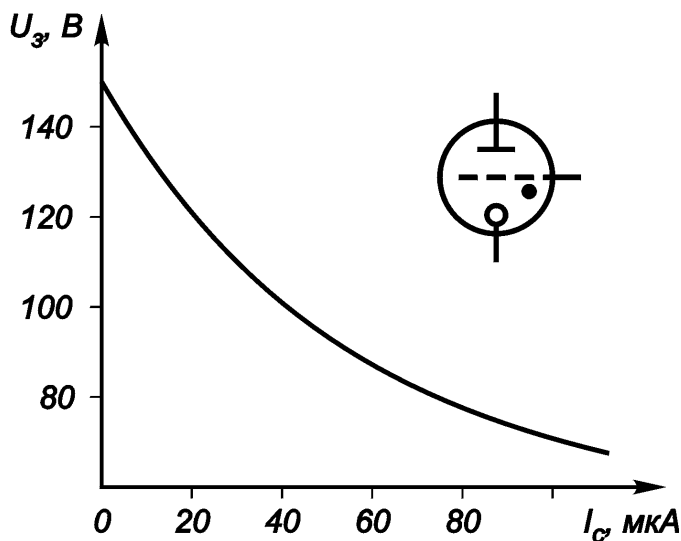


Рис. 3.5. Пусковая характеристика тиратрона тлеющего разряда

С момента зажигания тиратрона ток в анодной цепи его остается неизменным. После зажигания тиратрона изменением потенциала на сетке погасить его нельзя. Это объясняется тем, что поле управляющей сетки нейтрализуется положительными ионами. Тиратрон закрывается лишь после снятия или снижения анодного напряжения до значения меньшего, чем напряжения горения  $U_G$ .

Тиратроны работают при малых токах (до 50 мА) и средних анодных напряжениях (150 – 300 В).

На рис. 3.6. показаны схемы включения тиратронов.

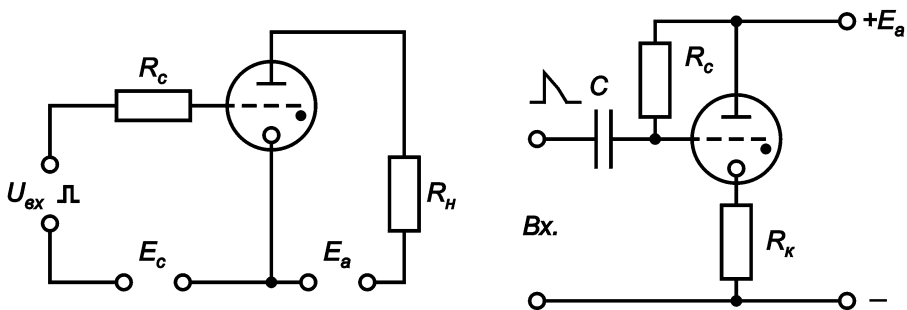


Рис 3.6. Схемы включения тиратронов тлеющего разряда

Анодная цепь питается от источника  $E_a$ , напряжение которого меньше напряжения зажигания при нулевом напряжении сетки. При подаче на сетку положительного напряжения порядка десятков вольт между сеткой и катодом возникает вспомогательный тихий разряд. Вследствие этого уменьшается напряжение зажигания тлеющего разряда между анодом и катодом  $U_{a. \text{ заж.}}$ . В тот момент, когда величина  $U_{a. \text{ заж.}}$  становится равной напряжению на аноде выключенного тиратрона  $E_a$ , зажигается тлеющий разряд, т.е. тиратрон включается и анодная цепь замыкается.

Основными параметрами тиратронов тлеющего разряда являются: падение напряжения между катодом и анодом, катодом и сеткой при прохождении тока через тиратрон, максимальное значение анодного тока, время восстановления электрической прочности, контрольные точки пусковых характеристик и долговечность. Различные типы этих тиратронов применяются, главным образом, в низкочастотных устройствах вычислительной техники и автоматики, например, в качестве электронных реле, позволяющих при малых токах в управляющей цепи коммутировать сильноточные схемы.

### 3.7. Знаковые и знаковосинтезирующие индикаторы

Особую группу приборов тлеющего разряда составляют многоэлектродные знаковые индикаторы. Эти индикаторы служат для отображения буквенной и цифровой информации и по физическим процессам ничем не отличаются от неоновых ламп, которые являются простейшими двухэлектродными индикаторами.

Многоэлектродные знаковые индикаторы содержат один или два анода и много катодов.

Катоды знаковых индикаторов (в данном случае цифровых индикаторов) выполнены в виде плоских арабских цифр от 0 до 9 из нихромовых проволок, расположенных параллельно аноду один за другим. Аноды изготавливают в виде сеток из тонкой проволоки, соединенных перемычками. Порядок расположения электродов (анодов и катодов-цифр) со стороны стеклянного купола следующий: А, 3, 8, 4, 7, 9, 5, А, 2, 0, 6, 1. Прибор наполнен неоном. Режим работы прибора подбирают так, чтобы при подаче напряжения между одним из катодов (цифрой) и анодом возникал тлеющий разряд, высвечивающий соответствующую цифру (катод). Ширина свечения катода значительно больше толщины проволоки, поэтому расположенные ближе к куполу лампы электроды закрывают последующие незначительно.

Знаковые индикаторы, отображающие буквенно-цифровую информацию, широко используются в счетно-решающей технике, в различных измерительных приборах и другой аппаратуре дискретного действия для наглядного представления различных данных.

*Знакосинтезирующие (сегментные) индикаторы* отображения информации являются газоразрядными приборами, в которых видимое изображение создается из совокупности дискретных элементов. В знаковосинтезирующих индикаторах



катоды К1 – К12 располагаются в одной плоскости за общим сетчатым анодом А (рис. 3.7 а) и представляют собой набор прямолинейных отрезков, количество и форма которых достаточна для воспроизведения нужных знаков и символов.

Простейшие знаковосинтезирующие многоразрядные индикаторы постоянного тока выполняют сегментной конструкции (рис. 3.7 б). В них используется свойство тлеющего разряда с областью прикатодного свечения повторять контуры катода. Обычно катоды всех разрядов выполняют в виде сегментов, расположенных в форме восьмерки (рис. 3.7 в). Одноименные сегменты всех разрядов электрически соединяются между собой. Над каждым разрядом (знаком) имеется индивидуальный анод. Поэтому количество выводов катодов равно количеству сегментов (на рис. 3.7, б количество катодов равно  $5 \cdot 7 + 4 = 39$ ), а выводов анодов – количеству разрядов.

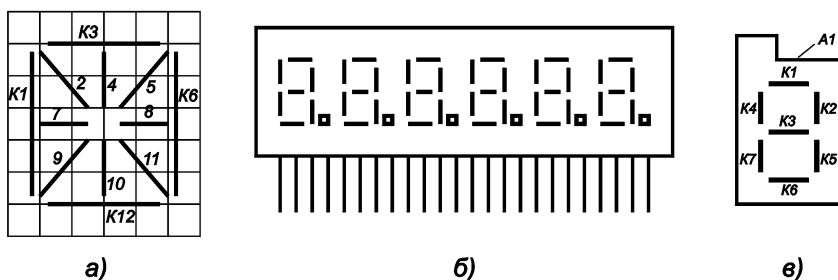


Рис. 3.7. Газонаполненные знаковосинтезирующие индикаторы:  
 а – расположение катодов в знаковосинтезирующем индикаторе;  
 б – многоразрядный знаковосинтезирующий индикатор;  
 в – расположение катодов и анода в одном разряде

Принцип работы многоразрядного знаковинтезирующего индикатора следующий. Катоды – сегменты первого разряда, сочетание которых образует нужную цифру, подключают к минусовому выводу источника питания, анод этого разряда соединяют с плюсовым выводом этого же источника. Если приложенное напряжение на аноде будет больше напряжения зажигания разряда, то около соответствующих сегментов появится световое излучение. При этом падение напряжения на газовом промежутке уменьшается, поэтому в цепь каждого катода включается резистор, на котором падает напряжение, равное разности между потенциалом зажигания разряда и потенциалом его поддержания. При этом высвечивается цифра первого разряда. В следующий момент времени к источнику питания подключается второй разряд и соответствующий анод. Высвечивается цифра второго разряда и т.д. Частота переключения напряжения составляет 100 – 700 Гц, поэтому глаз человека воспринимает все разряды светящимися.

В настоящее время разработано большое количество газонаполненных приборов, в том числе и цветных, которые позволяют успешно решать задачу отображения информации в устройствах индивидуального пользования.

### **3.8. Газоразрядные (плазменные) панели**

*Газоразрядные (плазменные) панели* (ГРП) – это многоэлектродные приборы, использующие оптическое излучение тлеющего разряда. Их применяют в качестве приборов отображения информации (индикаторы, дисплеи, многоцветные экраны, в том числе и для воспроизведения изображений и др.). Газоразрядные панели имеют много конструктивных разновидностей. Однако общим конструктивным признаком для большинства из них является наличие двух ортогональных систем электродов (катодных и анодных), нанесенных или уложенных на стеклянных плоских или гофрированных

пластинах, разделенных друг от друга диэлектрической пластиной с матричной системой отверстий, оси которых проходят через точку пересечения осей электродов (рис. 3.8). Плоскостные электроды, как правило, прозрачны, чтобы не препятствовать выходу видимого излучения прибора. Пространство между электродами заполняется либо чистыми инертными газами, либо смесью газов при давлении несколько сотен паскалей.

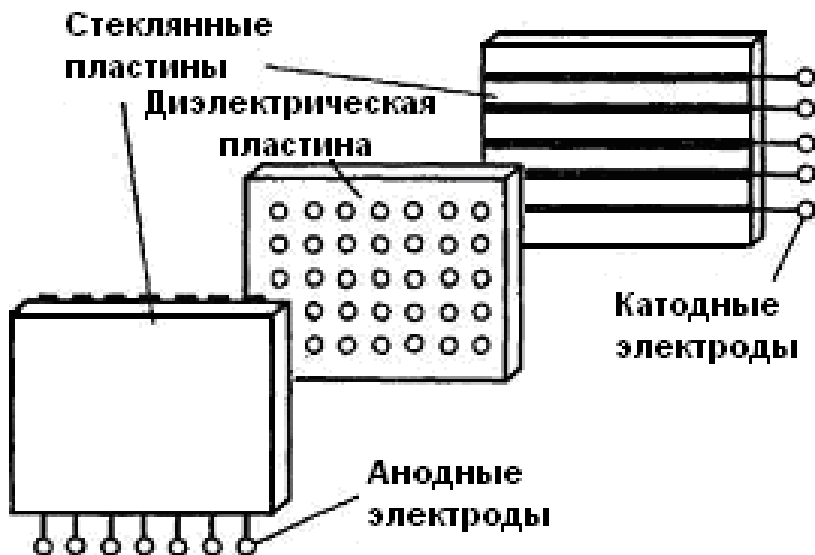


Рис.3.8. Схема устройства газоразрядной (плазменной) панели

Свечение отдельных частей тлеющего разряда в основном обусловлено переходами возбужденных атомов в нижние энергетические состояния. Состав смеси газов подбирается таким образом, чтобы увеличить интенсивность процессов

ионизации, возбуждения и рекомбинации. Например, при добавлении к неону атомов ксенона увеличивается вероятность реакции  $Ne^* + Xe \rightarrow Xe^+ + \bar{e} + Ne$ , т.е. в этом случае образование заряженных частиц идет не только в результате столкновений электронов с нейтральными атомами, но и при взаимодействии возбужденных атомов основного газа  $Ne^*$  с атомами примеси (Xe).

Спектр излучения тлеющего разряда в инертных газах лежит в инфракрасной, красной и ультрафиолетовой областях. Невидимое излучение используется для возбуждения люминофора в цветных ГРП.

В настоящее время наилучшими характеристиками обладают следующие матричные газоразрядные индикаторные панели: постоянного тока, постоянного тока с самосканированием, переменного тока (высокочастотные).

Принцип работы ГРП заключается в следующем. При подаче достаточного для зажигания разряда напряжения между каким-либо катодом и анодом (100 – 200 В) в ячейке, т.е. в месте, где эти электроды «пересекаются», возникает тлеющий разряд.

При подаче по определенному закону напряжения на несколько катодов и анодов можно с помощью точечного раstra воспроизвести любую фигуру. Надежное и безошибочное включение многочисленных разрядных ячеек в соответствии с входными сигналами индикации является сложной задачей в ГПР матричного типа. Для увеличения быстродействия и стабильности используют вспомогательный разряд в каждой ячейке ГРП.

Газоразрядные панели постоянного тока могут давать и многоцветное изображение. В этом случае на боковые или торцевые стенки ячеек наносят покрытия из люминофоров, дающие свечение определенного цвета. Располагая рядом ячейки с покрытиями из люминофоров, дающих основные

цвета (синий, зеленый, красный), можно получать цветные изображения.

Зажигание разряда в ячейках ГРП осуществляется по принципу развертки. В ГРП переменного тока для замены части изображения вводятся дополнительные электроды. В наиболее совершенных ГРП переменного и постоянного тока с автоматическим сдвигом благодаря возможности многострочной индикации можно резко сократить число элементов схемы управления.

Основные тенденции в развитии ГРП связаны с уменьшением числа схем возбуждения, возможностью интегрального исполнения части логики и изготовления высоковольтного блока возбуждения в одном керамическом корпусе с индикатором.

Разрешающая способность ГРП переменного тока составляет 25 – 30 элементов/см и соответствует расстоянию между точками 0,4 – 0,3 мм, а ГРП постоянного тока – около 12 элементов/см.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие приборы называются газоразрядными или ионными?
2. Что называется ионизацией газа?
3. Как происходит свечение в ионных приборах?
4. Нарисуйте вольт-амперную характеристику двухэлектродного газонаполненного прибора.
5. Расскажите о несамостоятельном разряде в газе.
6. Расскажите о самостоятельном разряде в газе.
7. Расскажите о нормальном и аномальном тлеющем разряде.
8. Расскажите о самостоятельном дуговом разряде.

9. В каких газоразрядных приборах используются различные виды разрядов в газе?

10. Расскажите о конструкции и принципе работы неоновой лампы.

11. Нарисуйте и объясните вольт-амперную характеристику неоновой лампы.

12. Расскажите о конструкции и принципе работы газоразрядных стабилитронов.

13. Нарисуйте и объясните схему включения газоразрядных стабилитронов.

14. Расскажите о принципе работы газотронов.

15. Что называется газотроном?

16. Расскажите о конструкции тиратрона тлеющего разряда.

17. Нарисуйте пусковую характеристику тиратрона тлеющего разряда.

18. Нарисуйте и объясните схему включения тиратронов тлеющего разряда.

19. Расскажите о знаковых индикаторах.

20. Расскажите о конструкции знаковосинтезирующих (сегментных) индикаторов.

21. Поясните принцип действия плазменной панели.

## 4. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ С ВНЕШНИМ ФОТОЭФФЕКТОМ

### 4.1. Фотоэлектронная эмиссия

*Фотоэлектронными* называются приборы, преобразующие энергию квантов электромагнитного излучения в электрическую или изменяющие свое сопротивление под действием этого излучения.

По принципу действия эти приборы можно разделить на две группы: приборы с внешним фотоэффектом, в которых при световом облучении катода возникает фотоэлектронная эмиссия (относятся к электровакуумным приборам), и приборы с внутренним фотоэффектом (относятся к приборам полупроводниковой электроники).

К первому типу фотоэлектронных приборов относятся электронные и ионные фотоэлементы, однокаскадные и многокаскадные фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Во всех этих приборах используется фотоэлектронная эмиссия.

Суть фотоэлектронной эмиссии состоит в следующем. Энергия  $h\nu$  квантов электромагнитного излучения (фотонов света) может оказаться достаточной для испускания электронов из одной среды в другую. Если эта энергия превышает работу выхода  $A$  электрона из атома, то ее избыток превращается в кинетическую энергию по закону Эйнштейна:

$$h\nu = A + \frac{m_e V^2}{2}, \quad (4.1)$$

где  $h$  – постоянная Планка ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);  $\nu$  – частота излучения;  $A$  – работа выхода электрона из атома;  $m_e$  – масса электрона ( $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг);  $V$  – скорость вылетающего электрона.

Из этого закона следует: энергия вылетающих электронов увеличивается с ростом частоты излучения; число выбитых электронов растет с увеличением интенсивности излучения, т.е. с увеличением числа квантов, падающих на поверхность в единицу времени:

$$n_e = K \cdot N_{h\nu}, \quad (4.2)$$

где  $n_e$  – число эмитируемых электронов;  $N_{h\nu}$  – число падающих на поверхность тела фотонов;  $K$  – коэффициент пропорциональности, называемый квантовым выходом.

Из формулы (4.1) следует, что фотоэмиссия возможна только в том случае, когда  $h\nu \geq A$ , т.е. когда частота излучения превысит некоторое граничное значение  $\nu_{zp}$ , зависящее от работы выхода  $A$ . Это граничное значение равно  $\nu_{zp} = A/h$ . Используя формулу  $c = \lambda\nu$ , находим максимальное значение длины волны, соответствующее этой граничной частоте  $\nu_{zp}$ :  $\lambda_{zp} = c \cdot h/A$ .

После подстановки численных значений для  $h$  и  $c$  получим следующую формулу для длины волны излучателя, способного вызвать фотоэмиссию:  $\lambda \leq 1240 / A$  (нм), где работа выхода  $A$  выражается в электрон-вольтах (эВ).

## 4.2. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом представляет собой стеклянный баллон, в котором располагаются два электрода: фотокатод в виде светочувствительного слоя, нанесенного на часть внутренней поверхности баллона, и анод из никеля в виде проволочного кольца, расположенного так, чтобы он не преграждал путь световому потоку к катоду. Обычно катод занимает половину поверхности баллона, остальная его часть остается прозрачной и служит окном, через которое свет попадает на фотокатод.



В электронных фотоэлементах создается глубокий вакуум (около  $10^{-5}$  Па), а ионные фотоэлементы наполняются инертным газом (аргоном или аргоноазотистой смесью) до давления, равного нескольким паскалям. Фотокатоды электронных фотоэлементов могут быть кислородно-серебряно-цезиевыми и сурьмяно-цезиевыми, а фотокатоды ионных фотоэлементов – только кислородно-серебряно-цезиевыми. На внутреннюю поверхность колбы наносят тонкий слой чистого серебра (подложка), затем покрывают слоем окиси цезия, на поверхности которого выделяется мономолекулярный слой металлического цезия, т.е. кислородно-серебряно-цезиевые катоды – трехслойные. Сурьмяно-цезиевые катоды состоят из двух слоев. Подложкой является сплав сурьмы с цезием, а верхним слоем – мономолекулярный слой металлического цезия. Ток вакуумных фотоэлементов определяется только фототоком, а газонаполненных – содержит также ток несамостоятельного газового разряда.

Под действием приложенного напряжения источника питания  $E_a$  между анодом и катодом фотоэлемента создается электрическое поле, и электроны, вылетающие с освещенной поверхности катода, направляются к положительно заряженному аноду (рис. 4.1). Таким образом, при освещении фотоэлемента в анодной цепи возникает фототок  $I_\Phi$ , создающий на нагрузочном сопротивлении  $R_H$  некоторое падение напряжения  $U_R$ . Ток  $I_\Phi$  пропорционален интенсивности падающего светового потока  $\Phi$ , т.е.  $I_\Phi = k \cdot \Phi$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

При изменении  $\Phi$  пропорционально ему меняется падение напряжения  $U_R = I_\Phi \cdot R_H = k \cdot R_H \cdot \Phi$ . Так с помощью фотоэлемента световые сигналы преобразуются в электрические.

В ионном фотоэлементе электроны ионизируют атомы газа и увеличивают поток электронов, т.е. увеличивают ток фотоэлемента, повышая его чувствительность.

Баллоны ионных фотоэлементов заполняются разреженным газом (при давлении около десятков паскалей). В этих приборах электроны, двигаясь к аноду, соударяются с молекулами газа. При определенном уровне кинетической энергии электронов может произойти ионизация молекул газа. Вновь образованные электроны движутся к аноду, а положительно заряженные ионы перемещаются к катоду. Это движение электронов и ионов увеличивает плотность потока заряженных частиц, и анодный ток растет. Электрический разряд в ионных фотоэлементах темный.

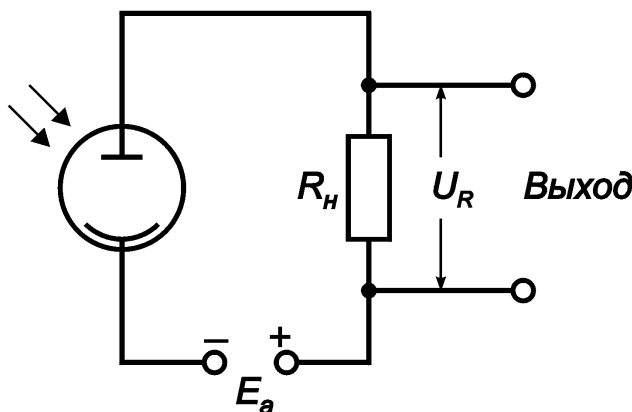


Рис. 4.1. Схема включения фотоэлемента с внешним фотоэффектом

Фотоэлементы характеризуются интегральной и спектральной чувствительностью.

*Интегральной чувствительностью* называется отношение фототока  $I_\Phi$ , измеренного при определенном анодном напряжении, к величине полного светового потока  $\Phi$ , падающего на фотокатод от стандартного источника света  $k_\Sigma = I_\Phi / \Phi_{СИ}$  (мкА/лм). Интегральная чувствительность у кислородно-серебряно-цезиевых вакуумных фотоэлементов составляет

порядка 20 – 50 мкА/лм, у газонаполненных – за счет газового усиления повышается до 150 – 250 мкА/лм. У сурьмяно-цезиевых вакуумных фотоэлементов интегральная чувствительность выше, чем у кислородно-серебряно-цезиевых (порядка 80 мкА/лм).

*Спектральной чувствительностью* называется отношение фототока  $I_\Phi$  к величине монохроматического излучения определенной длины волны  $\lambda$ :  $k_\lambda = I_\Phi / \Phi_\lambda$  (мкА/лм). Спектральная чувствительность показывает значение тока, протекающего в цепи фотоэлемента при облучении световым потоком в 1 лм заданной длиной волны  $\lambda$ . Максимум спектральной чувствительности для кислородно-серебряно-цезиевых фотоэлементов лежит в инфракрасной области спектра (0,7 – 0,95 мкА/лм), для сурьмяно-цезиевых – в области видимой части спектра (0,32 – 0,45 мкА/лм).

Для фотоэлементов обычно приводятся вольт-амперные (анодные) характеристики, т.е. зависимость  $I_\Phi = f(U_a)$  при  $\Phi = const$ ; световые характеристики, т.е. зависимость  $I_\Phi = f(\Phi)$  при  $U_a = const$ , и частотные характеристики, показывающие изменение переменной составляющей фототока  $\Delta I_\Phi$  от частоты  $f$  изменения светового потока. Основные характеристики электронных и ионных фотоэлементов приведены на рис.4.2.

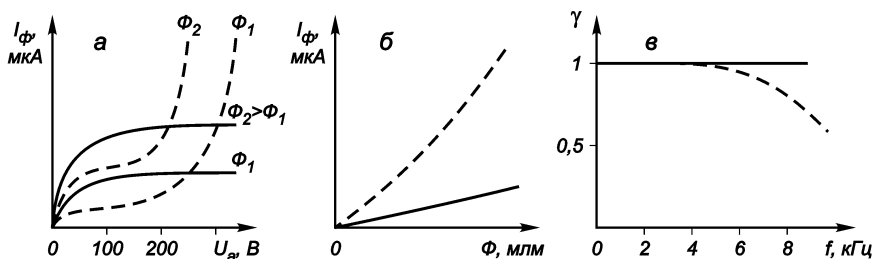


Рис. 4.2. Основные характеристики фотоэлементов с внешним фотоэффектом:

а – вольтамперная (анодная); б – световая; в – частотная.

Фотоэлементы: — вакуумный; - - - газонаполненный

Так как при небольших световых потоках зависимость  $I_{\Phi} = f(\Phi)$  для фотоэлементов почти линейна (рис. 4.2 б), то интегральной чувствительностью  $k_{\Sigma}$  можно считать величину фототока, возникающего в результате облучения катода световым потоком 1 лм, независимо от его спектрального состава. Величина  $k$  определяется свойствами фотоэлектронного катода.

Анодные характеристики электронных фотоэлементов (рис. 4.2 а) при больших потенциалах анода имеют участок насыщения, на котором величина тока зависит только от светового потока и не зависит от потенциала анода. Характеристики ионных фотоэлементов (рис. 4.2 а, пунктирные кривые) тоже имеют сначала небольшой пологий участок, но начиная с  $U_{a'}$ , соответствующего потенциалу ионизации газа  $U_{II}$ , фототок резко возрастает, т.к. в приборе начинается несамостоятельный темный разряд.

Световые характеристики электронного и ионного фотоэлементов (рис. 4.2 б) прямолинейны на значительном участке. Однако при больших освещенностях наблюдается отклонение от прямолинейности из-за возрастающей роли таких факторов, как утомляемость фотокатода, возникновение в приборе пространственного заряда и появления зарядов на стеклах баллона.

Частотные характеристики приборов (рис. 4.2 в) показывают, что электронные фотоэлементы практически безинерционны и могут работать без искажений на частотах нескольких сотен мегагерц, а ионные – проявляют инерционность уже

на частотах в несколько килогерц. Это ограничивает возможность их применения в условиях воздействия световым импульсным потоком или потоком переменной интенсивности.

Кроме чувствительности, фотоэлементы характеризуются следующими параметрами.

*Темновой ток* – ток в приборе, включенном в цепь питания, при отсутствии освещенности катода ( $\Phi = 0$ ). Иногда этот ток называют током утечки. Темновой ток электронных фотоэлементов значительно меньше, чем ионных. Величина темнового тока фактически определяет чувствительность прибора к слабым световым потокам.

*Термостойкость* – величина, определяющая диапазон рабочих температур (обычно от  $-20$  до  $+50$  °С).

*Стабильность фотокатодов* – свойство приборов сохранять постоянство параметров во времени.

*Утомляемость* – уменьшение чувствительности фотокатода при резком увеличении его освещенности. Это явление проявляется в том, что при большом световом потоке чувствительность фотоэлементов быстро уменьшается со временем, снижаясь иногда до 85 % первоначальной величины. Если после такого воздействия поместить фотоэлемент на некоторое время в темноту, то чувствительность восстанавливается почти до первоначального значения.

Фотоэлементы нашли широкое применение в фототелеграфной аппаратуре связи, звуковоспроизводящей аппаратуре кинематографии, в автоматике и телемеханике, в контрольных и измерительных устройствах связи и сигнализации и т.д.

### 4.3. Фотоэлектронные умножители

Малая интегральная чувствительность фотоэлементов не позволяет эффективно осуществлять регистрацию слабых потоков лучистой энергии без последующего усиления напря-

жения, получаемого на выходе фотоэлемента, с помощью электронного усилителя. Этого можно избежать, если применить фотоэлементы с внутренним усилением фототока. Усиление слабых фотоэлектронных токов осуществляется с помощью вторичной электронной эмиссии со специальных катодов вторичных электронов, называемых *динодами*. Таким прибором является *фотоэлектронный множитель* (ФЭУ).

ФЭУ называется высокочувствительный вакуумный фотоэлемент, в котором явление внешнего фотоэффекта сочетается с усилением фототока по принципу вторичной электронной эмиссии.

ФЭУ позволяют регистрировать слабые световые сигналы (около  $10^{-13}$  лм) и широко используются в ядерной физике при регистрации и измерениях ионизирующих излучений, в фотоэлектрических фотометрах, в различных фототелевизионных системах, астрономии для фотометрирования звезд, в автоматических пеленгаторах, осуществляющих ориентацию по направлению в пространстве и навигацию искусственных спутников Земли, межпланетных космических станций и т.п.

Промышленность выпускает однокаскадные и многокаскадные ФЭУ.

Однокаскадный множитель представляет собой фотоэлемент, в баллоне которого имеются фотокатод, анод и динод. На анод и динод относительно катода подается напряжение положительной полярности, при этом  $U_a > U_d$ . Эмиттируемые фотокатодом при воздействии световой энергии электроны под действием ускоряющего поля движутся к аноду и диноду. Небольшая часть фотоэлектронов попадает на анод и создает в его цепи анодный ток  $I_1$ . Другая часть ускоренных электронов сквозь сетчатый анод с большой скоростью устремляется к диноду, ударяясь об него, образует поток вторичных электронов, создавая ток  $I_2$ , поэтому общий ток однокаскадного ФЭУ есть сумма двух токов  $I_a = I_1 + I_2$ .

Для получения еще большего усиления тока используют многокаскадные ФЭУ. Принцип устройства многокаскадного ФЭУ следующий. В стеклянном откаченном баллоне на внутреннюю торцевую поверхность нанесен полупрозрачный сурьмяно-цезиевый слой, выполняющий функцию фотокатода (рис.4.3).

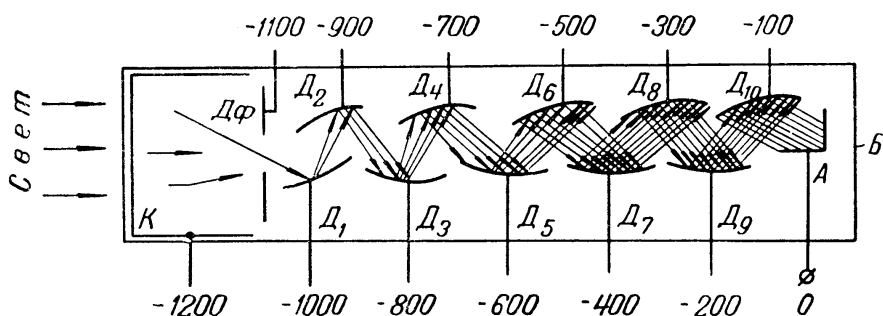


Рис. 4.3. Принцип устройства многокаскадного ФЭУ

Поток выбитых светом электронов с фотокатода через диафрагму  $D_{\Phi}$  направляется на систему полусферических электродов  $D_1 - D_{10}$ , или динодов. Потенциалы на динодах установлены так, что они возрастают в направлении от катода к аноду. Обычно эти потенциалы обеспечиваются за счет одного высоковольтного источника тока и делителя напряжения, состоящего из цепочки резисторов.

Каждый падающий (первичный) электрон выбивает из динода  $\sigma$  вторичных электронов ( $\sigma$  – коэффициент вторичной эмиссии, равный 2 – 8). Вторичные электроны с динода  $D_1$  под воздействием поля ускоряются и фокусируются на динод  $D_2$ ,

вызывая новый поток вторичных электронов. Далее этот процесс повторяется на всех последующих динодах. В результате общий коэффициент усиления фототока в умножителе равен  $M = \gamma_k \sigma^n$ , т.е. с  $n$ -го электрода на анод поступает  $M$  электронов, где  $\gamma_k$  – коэффициент собирания ( $\gamma_k < 1$ , т.к. не все первичные электроны попадают на динод). На практике  $n = 2 - 15$ , поэтому коэффициент усиления может достигать больших значений. Например, при  $n = 13$ ,  $\sigma = 3$  и  $\gamma_k = 1$  значение  $M = 3^{13} = 1,5 \cdot 10^6$ .

Ток в анодной цепи ФЭУ, имеющей  $n$  каскадов, при условии что коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma$  всех динодов одинаков, определяется по формуле  $I_a = I_o \sigma^n$ , где  $I_o$  – ток с фотокатода. Коэффициент усиления ФЭУ по току будет равен  $K_u = I_a/I_o$ . Интегральная чувствительность ФЭУ равна  $K_\Phi = K \cdot K_u$ , где  $K$  – интегральная чувствительность фотокатода.

ФЭУ являются практически безинерционными приборами. При регистрации коротких световых вспышек (сцинтилляций) в анодной цепи ток может иметь форму импульсов с длительностью  $10^{-8}$  с.

Кроме названных параметров ФЭУ (коэффициент вторичной эмиссии динодов  $\sigma$ , коэффициент усиления  $M$ , анодный ток  $I_a$ ), основными параметрами и характеристиками являются также следующие.

*Квантовый выход* – это отношение числа выбитых из фотокатода электронов к числу падающих фотонов определенной энергии (определенной длины волны). У наиболее часто применяемого сурьмяно-цезиевого фотокатода квантовый выход в области максимальной чувствительности ( $\lambda \approx 0,39$  мкм) составляет около 30 %. Интегральная чувствительность этого фотокатода составляет 30 – 80 мкА/лм.

*Анодная чувствительность* ФЭУ – отношение анодного тока к световому потоку:  $K = I_a/\Phi$ . Это отношение зависит от величины приложенного напряжения и достигает значений



30 – 80 мкА/лм. Однако ток в нагрузке не должен превышать десятков – сотен микроампер, т.к. при больших токах в нагрузке наблюдаются явления утомления динодов и ухудшение характеристики ФЭУ или даже его повреждение.

*Темновой ток* ФЭУ есть анодный ток  $I_T$  при отсутствии освещения фотокатода. Он определяется в основном двумя причинами: током утечки между электродами и термоэлектронной эмиссией фотокатода и первых динодов даже при комнатной температуре.

К характеристикам ФЭУ можно отнести следующие зависимости: зависимость коэффициента усиления от общего напряжения  $U_o$ , световая  $I_a = f(\Phi)$  и анодная  $I_a = f(U_a)$  характеристики. Последняя показывает зависимость анодного тока от напряжения между последним динодом и анодом при постоянных напряжениях на всех остальных электродах.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие приборы называются фотоэлектронными?
2. Объясните физику внешнего фотоэффекта – фотоэлектронной эмиссии.
3. Как найти граничную частоту фотоэмиссии и соответствующую ей длину волны света?
4. Расскажите о конструкции фотоэлемента с внешним фотоэффектом.
5. Нарисуйте схему включения фотоэлемента с внешним фотоэффектом и объясните принцип его работы.
6. Какие основные характеристики фотоэлементов с внешним фотоэффектом Вы знаете?
7. Что называется интегральной и спектральной чувствительностью фотоэлемента?
8. Нарисуйте вольт-амперную (анодную) характеристику и объясните ее зависимость для вакуумного и газонаполненного фотоэлементов.

9. Чем отличается световая и частотная характеристики для газонаполненного и светового фотоэлементов?

10. Какие параметры характеризуют фотоэлементы?

11. Какой физический принцип положен в основу работы фотоэлектронных умножителей ФЭУ?

12. Где может использоваться ФЭУ?

13. Расскажите о конструкции ФЭУ и принципе его работы.

14. Какие параметры характеризуют ФЭУ?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассматриваются устройство, физические процессы, характеристики, параметры, система обозначений и простейшие схемы применения электронных ламп, электронно-лучевых трубок, газоразрядных и фотоэлектронных приборов.

В пособии использованы соответствующие действующим ГОСТам терминология, система обозначений и условные графические изображения электронных приборов.

При работе над пособием предполагалось, что студенты хорошо изучили такие разделы физики, как «Электрическое поле в вакууме», «Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях», «Электрические явления в вакууме и разреженных газах», а также знакомы с теоретическими основами электротехники и владеют математическим аппаратом. Авторы старались избежать сложных математических выкладок, поскольку перегруженность математическим аппаратом материала пособия отрицательно сказывается на усвоении студентами физической стороны изучаемых явлений.

Систематизированное рассмотрение основных типов электровакуумных и газоразрядных приборов и явлений, лежащих в основе их работы, облегчит понимание и восприятие материала лекций по новой дисциплине «Вакуумная и плазменная электроника», читаемых студентам третьего курса специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» (направление 210100 «Электроника и микроэлектроника»).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Физические основы эмиссионной электроники.	
Электронно-управляемые лампы	8
1.1. Общие сведения	8
1.2. Электронная эмиссия	10
1.3. Конструкция и электроды электровакуумных ламп	16
1.4. Диоды	27
1.5. Триоды	33
1.6. Тетроды	40
1.7. Пентоды	46
1.8. Комбинированные и многосеточные элек- тронные лампы	47
Контрольные вопросы	49
2. Электронно-лучевые приборы	51
2.1. Общие сведения	51
2.2. Электронно-лучевые приборы с электроста- тическим отклонением луча	53
2.3. Электронно-лучевые приборы с магнитным отклонением луча. Кинескопы	58
2.4. Индикаторный электронно-лучевой прибор	63
2.5. Запоминающие трубки	65
2.6. Передающие телевизионные трубки	68
Контрольные вопросы	73
3. Газоразрядные приборы	74
3.1. Элементарные процессы при разряде в газе	74
3.2. Электрический разряд в газе	77
3.3. Неоновые лампы	81
3.4. Газоразрядные стабилитроны	83
3.5. Газотроны	85
3.6. Тиратроны	85

3.7. Знаковые и знаковосинтезирующие индикаторы	89
3.8. Газоразрядные (плазменные) панели	92
Контрольные вопросы	96
4. Фотоэлектронные приборы с внешним фотоэффектом	97
4.1. Фотоэлектронная эмиссия	97
4.2. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом	98
4.3. Фотоэлектронные умножители	104
Контрольные вопросы	108
Заключение	110
Библиографический список	111

Учебное издание

Горлов Митрофан Иванович  
Свистова Тамара Витальевна

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ  
И ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

Компьютерный набор О.А. Ивановой

ЛР № 066815 от 25.08.99. Подписано к изданию 18.05.04.  
Уч.-изд. л. 5,3.

Воронежский государственный технический университет  
394026 Воронеж, Московский просп., 14