

6. ИССЛЕДОВАНИЕ КЕНОТРОНА

Двухэлектродная электронная лампа

Двухэлектродные электронные лампы — *диоды* применяются для выпрямления переменных токов. При этом более мощные лампы, используемые в качестве силовых выпрямителей, называют обычно *кенотронами*, а название «диод» сохраняют за детекторными лампами, применяемыми для выпрямления высокочастотных сигналов. Мы здесь не будем придерживаться этого различия в терминологии.

Диод, как и всякая электронная лампа, представляет собой стеклянный или металлический баллон, откачанный до высокого вакуума (10^{-7} — 10^{-8} мм Hg). Внутри баллона помещаются электроды — катод, нагреваемый протекающим по нему током и испускающий электроны, и анод. Катод имеет обычно форму тонкой нити (*лампы прямого накала*) или металлической трубочки, внутри которой проходит изолированная фарфоровой «рубашкой» нить накала (*лампы косвенного накала* или *подогревные*). Иногда, для того чтобы увеличить длину катода без увеличения габаритных размеров лампы, его изгибают в виде буквы *W*. Анод чаще всего имеет форму охватывающего нить цилиндра (не обязательно кругового).

Если металл, из которого сделан катод, нагрет до достаточно высокой температуры, то из него вылетают электроны. Это явление, открытое Эдисоном, называется термоэлектронной эмиссией. Общий заряд электронов, вылетающих с поверхности катода за единицу времени, или *ток эмиссии*, равен (*формула Ричардсона — Дэшмена*)

$$I_s = Ae^{-eV/kT}S$$

Здесь T — температура катода, k — постоянная Больцмана, eV — работа выхода электрона из металла, S — площадь поверхности катода, A — постоянная, зависящая от рода металла. Величина I_s очень сильно зависит от температуры и от работы выхода eV . Поэтому для получения больших токов эмиссии можно либо повышать температуру катода, применяя наиболее тугоплавкие металлы, либо изготавливать катоды из материалов с низкой работой выхода. В лампах прямого накала катоды обычно делают из вольфрама, поверхность которого часто активируют — покрывают тонкой пленкой металла с низкой работой выхода (торий, барий, цезий). Наиболее низкую работу выхода (1,0—1,2 эв) имеют *оксидные катоды*, активный слой которых состоит из смеси оксидов кальция, бария и стронция. Рабочая температура оксидного катода сравнительно низка (900—1100° К вместо 2400—2600° К у чисто

вольфрамового катода), что делает его очень удобным для применения в лампах косвенного накала. Существенно, что, несмотря на более низкую рабочую температуру, оксидный катод дает в 10—20 раз большую плотность тока эмиссии, чем вольфрамовый.

В настоящее время лампы, используемые в приемно-усилительной радиоаппаратуре, выпускаются, как правило, с оксидным катодом. Чисто вольфрамовые катоды используются в некоторых генераторных лампах, высоковольтных кенотронах, рентгеновских трубках и т. п. Преимуществом вольфрамового катода в этих случаях является его устойчивость к сильным полям (см. ниже), к ионной бомбардировке, а также к «отравляющему» действию загрязнений. Активированные катоды легко теряют активность, отравляясь атомами металлов, испаряющихся с других электродов, разогретых в процессе работы лампы.

Вылетающие из катода электроны имеют довольно большие скорости (максвелловское распределение, соответствующее температуре катода), и, поскольку анод охватывает катод почти со всех сторон, они все могли бы достигнуть анода. Этого, однако, не происходит, потому что вылетевшие электроны образуют в междуэлектронном пространстве объемный заряд, создающий область пониженного потенциала (кривая 1 на рис. 47). Большинство электронов не может преодолеть потенциального барьера и возвращается встречным полем к катоду. Устанавливается динамическое равновесие: число электронов, вылетающих за единицу времени из катода, равно числу возвращающихся на катод. Электронное облако при отсутствии разности потенциалов между электродами сконцентрировано в непосредственной близости от катода (на рис. 47 густота точек примерно соответствует плотности объемного заряда). Однако некоторые электроны, обладающие наиболее высокими скоростями, проходят через эту область пространственного заряда и достигают анода — через лампу течет небольшой ток I_0 . Для практически полного прекращения этого тока надо подать на анод отрицательный потенциал, в несколько раз

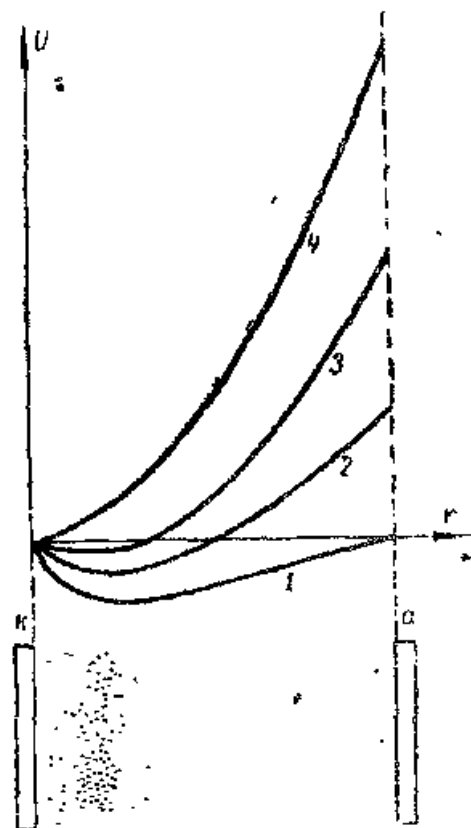


Рис. 47

превышающий величину kT/e , т. е. порядка десятых долей вольта (напряжение запирания).¹⁹

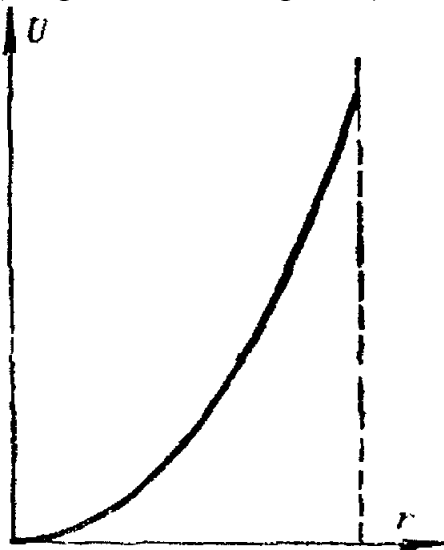


Рис. 48

Если к аноду приложить положительный потенциал, то поле пространственного заряда частично компенсируется (потенциальный барьер снижается, кривые 2 и 3 на рис. 47) и электроны начинают двигаться к аноду. Электронное облако расплывается и занимает теперь уже все междуэлектронное пространство. Однако пока потенциал анода не слишком высок, вблизи катода все еще будет сохраняться тормозящее поле, возвращающее часть электронов к катоду. Только если напряженность поля, возникающего под влиянием

приложенной разности потенциалов, превысит напряженность поля объемного заряда и распределение потенциала в лампе станет монотонным (кривая 4), то все выброшенные из катода электроны будут достигать анода. Ток через лампу станет тогда равным току эмиссии I_s , и дальнейшее повышение напряжения уже не будет приводить к возрастанию тока - наступит насыщение.

Нетрудно установить характер зависимости тока от напряжения при средних значениях потенциала анода U_a - таких, что ток заметно превышает I_0 , но еще весьма мал по сравнению с I_s . В этом случае можно приближенно пренебречь начальной энергией электронов по сравнению с eV_a и заменить действительную кривую распределения потенциала кривой без минимума, как на рис. 48. Движение электронов в поле описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{mv^2}{2} = eU; \quad \nabla^2 U = -4\pi\rho; \quad j = -\rho v,$$

где m и e — масса и заряд электрона, v — его скорость, ρ — плотность объемного заряда, j — плотность тока. Отсюда

$$\nabla^2 U = 4\pi \frac{j}{v} = 4\pi \sqrt{2eU_1 m} \frac{j}{v}$$

¹⁹ На практике существование тока I_0 бывает связано также с наличием контактной разности потенциалов между электродами. В лампах прямого накала, где катод не эквипотенциален, может течь еще добавочный ток с тех участков катода, которые имеют отрицательный потенциал относительно анода. Во избежание этого анодную цепь подключают обычно к отрицательному полюсу цепи накала (как на рис. 51).

Естественно считать, что повышение анодного напряжения в n раз приведет к повышению потенциала в каждой точке поля тоже в n раз. Тогда, как видно из уравнения, плотность тока j и анодный ток I_a увеличатся в $n^{3/2}$ раз. Таким образом, получаем (формула Ленгмюра)

$$I_a \sim U_a^{3/2}$$

где коэффициент пропорциональности зависит, конечно, от формы и расположения электродов, но не зависит от тока эмиссии, т. е. от температуры катода. Зависимость, выражаемую формулой Ленгмюра, называют обычно «законом $3/2$ ».

Напомним еще раз, что закон $3/2$ справедлив только при $I_a \ll I_s$. В противном случае изменение U_a изменяет форму функциональной зависимости U от координат, и тогда нельзя считать, что в каждой точке $\nabla^2 U \sim U \sim U_a$.

Кривая зависимости тока от напряжения (вольтамперная характеристика диода) показана на рис. 49. Пунктир соответствует закону $3/2$. Отклонения от этого закона наблюдаются при малых напряжениях, когда нельзя пренебрегать начальными скоростями, и при больших, когда ток становится сравнимым с I_s . Как видно из рисунка, реальная характеристика лампы имеет довольно большой прямолинейный участок. Это очень важно для усилительных электронных ламп (триодов и др.). Для выпрямителей же существенно то, что лампа проводит ток только в одном направлении — является вентилем. Идеальная вентильная характеристика показана на рис. 49 штрихпунктиром. Характеристика диода достаточно близка к ней в целом, т. е. диод является хорошим выпрямителем для больших амплитуд выпрямляемого напряжения. Более точно, амплитуды должны быть велики по сравнению с напряжением запираания лампы. Если же они очень малы, то лампа работает просто как нелинейное сопротивление.

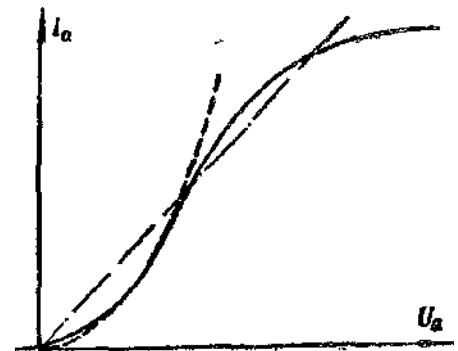
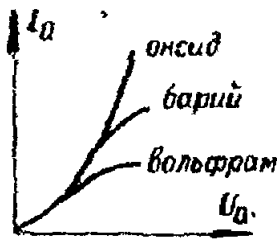


Рис. 49

При повышении анодного напряжения в области насыщения напряженность ускоряющего поля у поверхности катода увеличивается и, способствуя выходу электронов из катода, увеличивает ток эмиссии. В результате этого насыщения не должно наблюдаться — при повышении U_a анодный ток может неограниченно возрастать. Однако у металлических катодов этот эффект (эффект Шоттки) может проявляться только при очень больших полях, так что на практике он не сказывается на форме характеристик в практически достижимой области. У активированных же катодов, благодаря неровности их поверхности, существуют участки (острия), где напряженность поля очень велика, и поэтому эффект Шоттки заметен уже при обычных потенциалах анода. Особенно сильно он появляется у оксидных катодов, в которых, благодаря их полупроводниковой структуре, очень мал поверхностный скачок потенциала (работа выхода).



На рис 50 представлен ход характеристик для диодов с разными катодами. В лампах с оксидным катодом участок с уменьшающимся наклоном характеристики совершенно отсутствует. Хотя лампы с оксидным катодом не имеют насыщения, снимать с катода слишком большой ток недопустимо, так как это приведет к перегреву активного слоя. Кроме того, лампы с оксидным катодом боятся недокала нити, так как вынужденная эмиссия происходит только с

небольших участках катода, на которых, вследствие этого, наблюдается большой локальный перегрев, также выводящий катод из строя. Поэтому не рекомендуется подавать на такие лампы анодное напряжение до тех пор, пока катод не прогреется. При нормально прогревом катоде и не слишком больших анодных токах поле анода компенсируется полем объемного заряда и не вызывает вынужденной эмиссии.

Рис 50

Содержание работы и порядок ее выполнения

В данной работе исследуются вольтамперные характеристики кенотрона с вольфрамовым катодом. Изучаемая лампа включается в

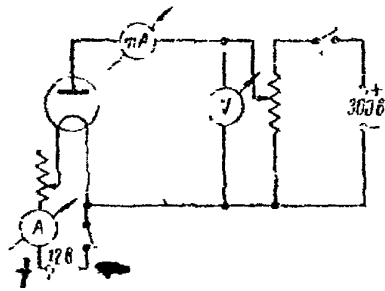


Рис. 51

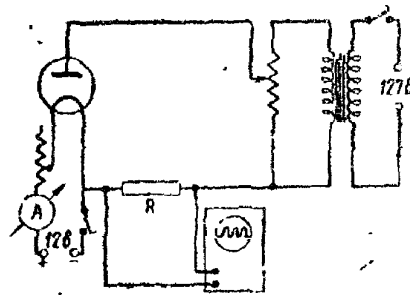


Рис 52

схему (рис. 51), обеспечивающую возможность регулирования тока накала и анодного напряжения. Необходимо измерить анодный ток I_a как функцию анодного напряжения при 5—6 значениях тока накала и построить вольтамперные характеристики. Затем, при 2—3 значениях U_a (в том числе при максимальном достижимом), следует измерить I_s в зависимости от тока накала I_n . Построить графики и объяснить их вид. Можно ли считать их графиками зависимости тока эмиссии I_s от I_n ?

Для ознакомления с работой лампы в качестве выпрямителя соберите схему рис. 52. Сопротивление R (≈ 10 ком) будет служить нагрузкой выпрямителя. Напряжение с сопротивления R подайте на вход электронного осциллографа (его описание выдается в лаборатории). Регулируя переменное напряжение на входе, проследите за изменением кривой временной зависимости выпрямленного напряжения на экране осциллографа (она же является, очевидно, и осциллограммой выпрямленного тока). Как влияет на вид осциллограммы величина выпрямляемого напряжения? Ток накала? Зарисуйте типичные осциллограммы.