

ЭЛЕКТРОНИКА. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

УДК 37.6
ББК 92
М17

Максина Е.Л.

М17 Электроника / Е. Л. Максина — М. : Т8 Издательские технологии / RUGRAM, 2020. — 160 с. — (Полезные конспекты).

ISBN 978-5-521-75671-1

Данное пособие представляет собой конспект лекций по Электронике, составленный в помощь студентам средних и высших технических учебных заведений.

BIC JN
BISAC EDU000000

ЛЕКЦИЯ № 1. Электронные приборы

1. Введение. Электронные лампы

В широком смысле электронными приборами принято называть усилительные устройства, основанные на электронных эффектах, происходящих в вакууме, разреженных газах, твердых телах, жидкостях или на границах их разделов при воздействии на них электрических, магнитных, световых, тепловых, акустических или других полей. По своей сути электронные приборы являются достаточно эффективными управляемыми (с помощью некоторого управляющего сигнала) преобразователями энергии, отбираемой от источника питания и передаваемой потребителю энергии. В правильно сконструированном и работающем в соответствующем режиме устройстве на управление тратится энергия, значительно меньшая, чем энергия, поступающая потребителю от источника, вследствие чего происходит в конечном итоге усиление мощности управляющего сигнала.

При создании большинства электронных приборов обычно приходится решать множество различных проблем и задач, одной из важнейших из которых является проблема создания потока относительно свободных электронов, проводимости и управления его интенсивностью, положением в пространстве или скоростью движения отдельных электронов в этом потоке.

В других видах электронных приборов используются практически неподвижные электроны, входящие в состав внешних валентных оболочек атомов, прочно связанные с атомными ядрами и поэтому не имеющие возможности в обычных условиях перемещаться. Однако под действием внешних электрических, магнитных, световых, тепловых или радиационных полей валентные электроны могут переходить на более высокие энергетические уровни (при этом происходит поглощение энергии внешнего поля) с последующим возвратом на начальные уровни и излучением поглощенной ранее энергии в виде электромагнитных квантов.

Это явление используется в квантовых приборах, например **лазерах, мазерах, ирразерах.**

Электроны являются заряженными частицами, поэтому их движением можно управлять с помощью электрических и магнитных полей.

Принцип действия большинства электронных приборов в основном сводится к управлению плотностью, скоростью или направлением движения электронного (или электронно-ионного в случае плазменных приборов или ионного в хемотронных приборах) потока, движущегося в вакууме, разряженном газе, полупроводнике, диэлектрике или электролите. При создании любого усилительного электронного прибора возникают две главные задачи: получение направленного электронного потока и создание устройства, эффективно и энергетически экономно управляющего этим потоком.

Технических решений этих задач к настоящему времени имеется множество, и поэтому существует несколько сот видов электронных усилительных приборов, основанных на различных эффектах, происходящих в вакууме, разряженных газах, твердых телах, жидкостях или на границах их разделов.

Особенностью современной радиоэлектроники является то, что она на 95% основывается на полупроводниковых приборах. Но это не означает, что все другие виды электронных приборов, в том числе и электровакуумные приборы, разработанные почти столетие тому назад, в настоящее время не применяются. Существует много областей науки и техники, где применение полупроводниковых усилительных приборов очень затруднено или почти невозможно. Это работа аппаратуры в интенсивных радиационных полях (как то аппаратура контроля работы ядерных реакторов или аппаратура для применения в хранилищах отработанного ядерного топлива, аппаратура для устранения последствий аварий ядерных реакторов, работа в условиях высоких температур (аппаратура систем контроля работы сопел ракетных двигателей), мощные усилители и генераторы сверхвысоких частот (радио- и телепередатчики, радиолокаторы, промышленные и бытовые СВЧ-печи)). В этих случаях очень часто применяются электровакуумные усилительные и генераторные приборы.

Кроме этих областей, большое применение электровакуумные приборы (электронные лампы) находят в бытовой технике, напри'

мер для создания мощных сверхвысококачественных аудиоусилителей.

Электронные лампы. В электронных лампах для получения потока свободных электронов используется явление электронной эмиссии — излучения электронов с поверхности твердых или жидких тел. Однако потеря даже малого числа электронов с поверхности тела нарушает его электрическую нейтральность, вследствие чего тело заряжается положительно и возникают тормозящие силы, стремящиеся вернуть электроны и препятствующие продолжению эмиссии. Для преодоления тормозящих сил электроны должны иметь достаточно большую энергию, называемую работой выхода, — до нескольких электронвольт. Работа выхода зависит от многих факторов, решающий из которых — расстояние между атомами в кристаллической решетке (чем расстояние больше, тем работа выхода меньше). Чтобы придать электронам дополнительную энергию, позволяющую им эмитировать с поверхности тел, в электронной технике используются следующие способы: нагревание до высоких температур, воздействие сильным электрическим полем, бомбардировка поверхности частицами высоких энергий, облучение светом.

При нагревании тела, используемого как излучатель электронов и называемого катодом (или эмиттером), увеличивается скорость движения электронов проводимости, возрастает их кинетическая энергия, и все большее их число покидает катод. Вблизи поверхности катода возникает электронное облако вылетающих из катода (и возвращающихся в него) электронов, плотность которого пропорциональна температуре катода и почти обратно пропорциональна работе выхода:

$$I_m = A_m T^2 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right),$$

где I_m — плотность тока термоэлектронной эмиссии, А/см²;

A_m — постоянная, зависящая от материала катода и состояния его поверхности;

T — абсолютная температура;

W — работа выхода;

k — постоянная Больцмана.

Для увеличения плотности тока термоэлектронной эмиссии необходимо увеличить температуру катода и использовать мате-

риалы с малой работой выхода. Для изготовления термоэлектронных катодов используют стойкие к испарению материалы: вольфрам, тантал, молибден и ниобий.

Эмиссионные свойства термоэлектронного катода существенно повышаются, если на его поверхность нанести тонкий слой активирующего металла, имеющего малую работу выхода. Конструктивно термоэлектронные катоды выполняют в виде катодов **прямого и косвенного нагрева**.

Во многих видах современных электронных приборов применяются **холодные** катоды, электронная эмиссия с поверхности которых достигается за счет воздействия сильных электрических полей. Плотность тока получаемой таким способом эмиссии:

$$I_0 = \frac{A_0}{W} E_a^2 \exp\left(-B_a \frac{W^{3/2}}{E_a}\right),$$

где W — работа выход;

E_a — напряженность электрического поля у поверхности катода;

A_0 и B_a — конструктивные постоянные.

Разновидностью холодного катода является туннельный катод.

Принцип действия электронной лампы сводится к управлению плотностью, скоростью или направлением движения потока электронов, движущихся в колбе, из которой откачан воздух.

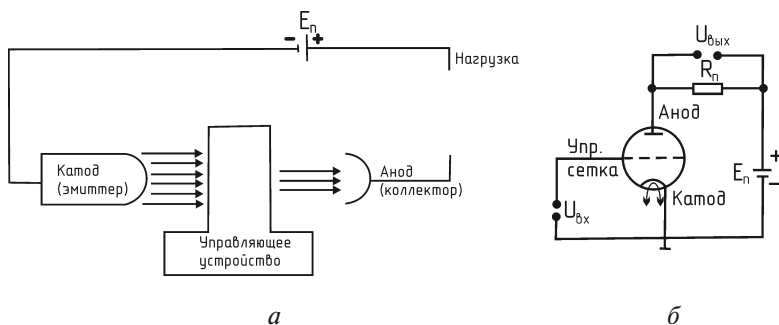


Рис. 1. Принцип действия электронной лампы (а), включение ее в качестве усилителя сигналов (б)

В электронной усилительной лампе с управлением плотностью электронного потока (рис. 1а) электроны, эмиттированные с поверхности катода, под действием ускоряющего поля, создаваемо'

го внешним источником питания, устремляются к аноду. На пути электронного потока устанавливается устройство управления, которое под действием напряжения источника сигнала создает электрические или магнитные (или те и другие) поля, которые способствуют или препятствуют прохождению электронов от катода к аноду.

Электронные лампы классифицируют по числу основных электродов. Если в лампе два электрода (анод и катод), то она называется **диодом**. Трехэлектродная лампа имеет анод, катод и управляющую сетку и называется **триодом**. Четырехэлектродная лампа называется **тетродом**, пятиэлектродная — **пентодом** и т. д.

Диоды. В диоде отсутствует устройство управления и его основное свойство — односторонняя электрическая проводимость, т. е. электрический ток может протекать в одном направлении — от катода к аноду. Это происходит тогда, когда диод включен в электрическую цепь с источником тока так, что на аноде оказывается плюс, а на катоде — минус. Только в этом случае электроны, эмитированные катодом, могут достигнуть анода.

Аналитически вольт-амперная характеристика диода — зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a — аппроксимируется параболой вида:

$$I_a = AU_a^{2/3},$$

где A — конструктивная постоянная.

В современной радиоэлектронике вакуумные диоды находят ограниченное применение. При этом используется свойство односторонней проводимости (в высоковольтных выпрямителях при рабочих напряжениях в десятки и сотни тысяч вольт) и возможность создавать очень равномерный «белый шум» с не зависящим от частоты спектром, генерируемым при работе в режиме насыщения анодного тока.

Триоды. В триоде управление плотностью электронного потока осуществляется с помощью управляющего электрода, изменяющего напряженность электрического поля в околоэлектродном пространстве.

В триодах с термоэлектронным катодом управляющим электродом служит тонкая металлическая **управляющая сетка** (рис. 1б).

Обычно сетка расположена вблизи поверхности катода на расстоянии в несколько десятков микронетров, в то время как рас-

стояние «катод — анод» может быть весьма большим (от единиц миллиметров до нескольких десятков сантиметров).

Поэтому изменение потенциала управляющей сетки сказывается на напряженности поля в околоскатодном пространстве сильнее, чем изменение потенциала анода. Если потенциал управляющей сетки отрицателен, то поле вблизи катода является тормозящим, и плотность электронного потока по мере увеличения этого потенциала уменьшается вплоть до полного прекращения прохождения электронов к аноду. При этом происходит запаривание лампы.

При положительном потенциале сетки ее поле является ускоряющим, не препятствует прохождению электронов к аноду, и поэтому плотность электронного потока возрастает.

Принцип действия усилителя на электронной лампе сводится к тому, что под действием напряжения входного сигнала $U_{вх}$ изменяется плотность электронного потока, идущего от катода к аноду. При этом изменяется кажущееся внутреннее сопротивление электронной лампы, что ведет к изменению анодного тока, обеспечиваемого за счет источника питания E_n . Это приводит к изменению падения напряжения $U_{вых}$ на сопротивлении нагрузки R_n . Так как управляющая сетка расположена намного ближе к катоду, чем анод, то напряжение $U_{вых} \gg U_{вх}$, т. е. входной управляющий сигнал усиливается.

Анодная характеристика триода — это зависимость анодного тока от напряжения на аноде и управляющей сетке.

Под **анодно-сеточной вольт-амперной характеристикой** понимается зависимость анодного тока от напряжения на управляющей сетке при постоянном напряжении на аноде.

Основные параметры триодов, используемые для их сравнения и выполнения различных расчетов, — это крутизна анодно-сеточной характеристики и внутреннее сопротивление переменному току:

$$S = \Delta I_a / \Delta U_c \text{ при } U_a = \text{const}; R_i = \Delta U_a / \Delta I_a \text{ при } U_c = \text{const},$$

где ΔI , ΔU , ΔU — приращения соответственно анодного тока, сеточного и анодного напряжений.

Важнейший параметр триода — **статический коэффициент усиления** $\mu = \Delta U_a / \Delta U_c$ при $I_a = \text{const}$. Он показывает, во сколько раз изменение напряжения на управляющей сетке эффективнее воз-

действует на анодный ток, чем изменение анодного напряжения. Величина μ определяется конструкцией триода и режимом его работы и тем больше, чем больше расстояние «анод — сетка» по сравнению с расстоянием «сетка — катод» и чем гуще сетка (т. е. чем ближе друг к другу витки сетки).

При работе в линейном режиме связь между параметрами триода выражается формулой: $\mu = SR_i$.

Недостаток триода, ограничивающий его применение, — обратная связь (т. е. нежелательная передача энергии с выхода усилителя на его вход) на высоких частотах между анодной и сеточной цепями, возникающая через емкость «анод — управляющая сетка».

Тетроды. В тетроде анод и управляющая сетка разделены электростатическим экраном, выполненным в виде экранной сетки.

Экранная сетка не должна препятствовать прохождению электронов от катода к аноду. С этой целью сетка выполняется из тонкого провода, и на нее подается положительное напряжение.

Особенность тетрода — необходимость работать в таком режиме, когда напряжение на экранной сетке ниже напряжения на аноде. Если это требование нарушается, то наблюдается **динатронный эффект**: вторичные электроны, появляющиеся в результате попадания на анод электронного потока, движущегося с весьма большой скоростью, эмиттируются с его поверхности и захватываются экранной сеткой. Это вызывает уменьшение анодного тока вплоть до того, что может стать равным нулю.

Пентоды. В маломощных электронных лампах динатронный эффект устраняется третьей, защитной (или антидинатронной) сеткой, помещаемой между анодом и экранной сеткой и имеющей потенциал, равный потенциалу катода. Трехсеточные (пятиэлектродные) лампы называются пентодами.

Многоэлектродные и комбинированные электронные лампы. Увеличение числа сеток свыше трех-четырех практически не улучшает ее усилительные свойства настолько, чтобы это было оправданно существенным усложнением производства и снижением надежности эксплуатации.

Электронные лампы с управлением плотностью электронного потока могут работать только на частотах 2—5 Гц и не позволяют использовать принципы управления плотностью электронного

потока для усиления напряжений сигналов сверхвысоких частот (СВЧ).

Поэтому для усиления СВЧ-сигналов применяются приборы со скоростным управлением: **клистроны**, **лампы бегущей волны**, **магнетроны** и т. д. Принцип действия этих приборов основан на взаимодействии электромагнитного поля электронных потоков, идущих от катода к аноду, с электромагнитным полем управляющего сигнала, что в определенных условиях может приводить к передаче энергии электромагнитного потока электромагнитному полю управляющего сигнала и к его усилению.

2. Газоразрядные (плазменные) приборы

В электронных вакуумных лампах перенос электрического тока производится электронами. В плазменных лампах (внутри колб которых находится инертный газ) в процессе работы происходит ионизация молекул газа, и возникают положительно заряженные ионы, в результате чего промежуток пространства между катодом и анодом оказывается заполненным плазмой — примерно равным числом электронов и положительно заряженных ионов газа.

Плазменные лампы могут работать как с нагретым, так и с холодным катодом, надо только каким-либо образом первоначально пропустить импульс тока между катодом и анодом, после чего ток через прибор самостоятельно поддерживается за счет автоэлектронной эмиссии и вторичной эмиссии электронов, выбиваемых с поверхности отрицательно заряженного катода ударяющимися в него положительными ионами. В режиме холодного катода работает большая часть плазменных ламп. В тех случаях, когда внутреннее сопротивление должно быть минимальным, применяют термоэлектронный катод.

Плазменные лампы управляются электрическими, магнитными, тепловыми или радиационными полями, с помощью которых можно управлять моментом включения и выключения, можно изменять величину рабочего тока или пространственное положение электрического разряда.

При работе в плазменной лампе возникает свечение: рекомбинирующие с электронами ионы отдают излишек энергии в виде света.