Ашкинази Л. , **113 лет ошибке Эдисона.**

113 лет ошибке Эдисона

Л.АШКИНАЗИ

Как от лампы электрической произошла лампа электронная

Электронная лампа возникла из электрической. Создал первую электронную лампу Т.Эдисон, причем по ошибке. Произошло это так.

Свет в электрических лампах излучался в те времена накаленной угольной нитью. Однако от нити летели во все стороны не только фотоны, но и нечто, оседавшее на баллоне и вызывавшее его потемнение. Эдисон предположил, что летят отрицательно заряженные угольные пылинки, и если ввести в лампу дополнительный электрод и подать на него положительный относительно нити потенциал, то пылинки будут притягиваться к этому электроду и не будут попадать на баллон. Сказано – сделано (рис.1).

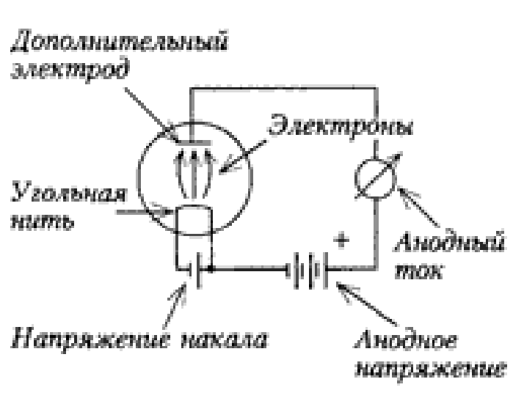

Рис. 1. Эффект Эдисона

Но баллоны все равно темнели. Жалко, конечно, зато Эдисон обнаружил, что в цепи дополнительного электрода протекает ток. Так в 1883 году он открыл два новых явления — протекание тока через вакуум и термоэлектронную эмиссию — испускание электронов нагретыми веществами. Позже эти два явления вместе были названы «эффектом Эдисона».

Как человек, мыслящий практически (автор более 1000 патентов), он тут же и придумал прибор на основе этих эффектов. Поскольку ток, текущий в цепи дополнительного электрода, сильно зависел от напряжения, приложенного к нити (называемого напряжением накала), Эдисон предложил использовать этот эффект для обнаружения малых изменений напряжения.

Через четыре года Дж.Дж. Томсон установил, что ток в лампе Эдисона переносят электроны. Но, быть может, это свойство именно угля? Нет, если нить была металлической, тоже возникал электронный ток в вакууме. Он становился особенно велик, если нить покрывали порошком окиси кальция. Так в 1904 году А.Венельт открыл оксидный катод, которому предстояло через полвека завоевать мир электронных ламп.

В 1908 году Ф.Содди обнаружил, что при улучшении вакуума ток уменьшается. Возникло естественное – хотя и к счастью неверное – предположение, что в абсолютном вакууме тока не будет совсем. Вакуумная электроника была готова умереть, не родившись. Однако эффект был объяснен: уменьшение тока при улучшении вакуума вызвано образованием в лампе отрицательного заряда. Действительно, уже летящие через зазор катод-анод электроны имеют отрицательный заряд, отталкивают электроны, только вылетевшие из катода, и уменьшают этим ток, текущий через зазор. А при наличии газа электроны ионизуют его, новые электроны начинают двигаться вместе со старыми к аноду, а положительные ионы, имеющие в среднем в 60 000 раз большую массу, уходят из зазора медленно и поэтому создают в нем большой положительный заряд, компенсирующий заряд электронов. Но и без ионов движение электронов в вакууме вполне возможно.

Первый настоящий вакуумный диод был создан в 1913 году. Для получения в вакуумных лампах того же тока, что и в лампах с частичной компенсацией пространственного заряда, требовались несколько большие напряжения катод-анод, но зато эти лампы работали стабильнее. Ибо хотя хороший вакуум и труднее получить, чем плохой, но для работы лампы с компенсацией нужен не просто плохой вакуум, а стабильно плохой. А его обеспечить сложнее, чем хороший вакуум.

«Закон 3/2» и характеристики лампы

Основная формула, описывающая работу электронных ламп, была получена И.Ленгмюром в 1915 году. Называют ее почему-то не формулой Ленгмюра, а «законом 3/2». Впрочем, человек, сделавший для физики и химии столько, сколько сделал Ленгмюр, не стал бы тратить время на приоритетные споры. Итак,

$$I \sim U^{3/2} S d^{-2}$$

— ток, который может протекать через вакуумный зазор, пропорционален площади электродов S, напряжению на зазоре U в степени 3/2 и обратно пропорционален квадрату ширины зазора d (рис.2).

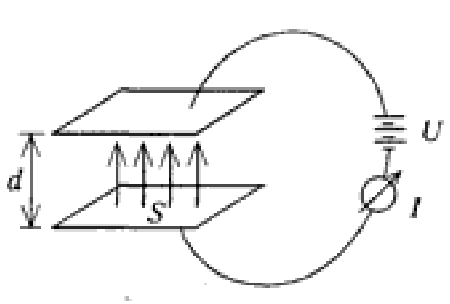

Рис.2. Ток в вакуумном зазоре

«Черный ящик», его параметры и начинка

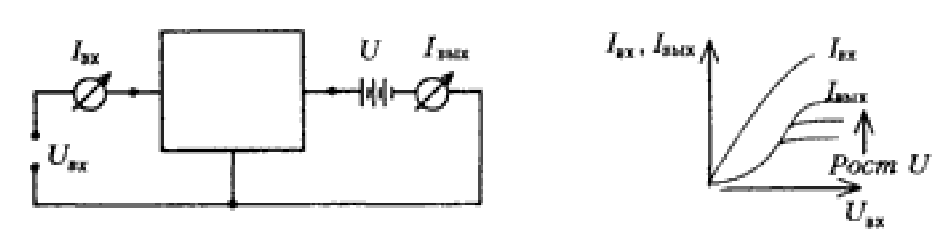

Рис.3. «Черный ящик» (слева) и его характеристики (справа)

Вернемся к диоду Эдисона и посмотрим на него снаружи. Вот «черный ящик» с клеммами для подключения внешних цепей (рис.3). «Черный ящик» характеризуется входной характеристикой $I_{вх}(U_{вх})$ и передаточной характеристикой $I_{вых}(U_{вх})$. Качество «ящика» тем выше, чем меньше $I_{вх}$ и больше $I_{вых}$ при некотором значении $U_{вх}$. Малое значение $I_{вх}$, или, как говорят, высокое входное сопротивление $R_{вх} = U_{вх}/I_{вх}$, означает, что «ящик» потребляет мало энергии из цепи управления, большое $I_{вых}$ означает, что «ящик» имеет большое усиление по току $I_{вых}/I_{вх}$ или крутизну $s = I_{вых}/U_{вх}$, т.е. хорошо усиливает сигнал. Переходя на радиотехнический язык, можно сказать, что низкое входное сопротивление не дает возможности подключать ко входу высокоомный источник сигнала, например пьезоэлектрический микрофон, а малое усиление требует наличия большого количества таких элементов, чтобы слабенький сигнал от микрофона прозвучал на всю площадь.

Заглянем внутрь «черного ящика» (рис.4). Входное напряжение и ток теперь будут называться напряжением и током накала, выходной ток станет анодным током, напряжение, включенное в выходной цепи, — анодным напряжением. Крутизна характеристики зависит от соотношения тока, определяемого «законом 3/2», и тока эмиссии — тока электронов, покидающих катод. Если ток эмиссии меньше, то весь он и приходит на анод, если ток эмиссии больше, то часть электронов возвращается на катод, а доля, определяемая «законом 3/2», приходит на анод. Ток эмиссии очень сильно зависит от температуры катода, а температура катода определяется напряжением накала. Так и получаются зависимости, показанные на рисунке 5 слева. Крутизна накальной характеристики диода весьма велика, а вот по части входного сопротивления в схеме рисунка 4 диод подкачал. Сопротивление нити накала даже для очень тонких нитей не более десятков Ом.

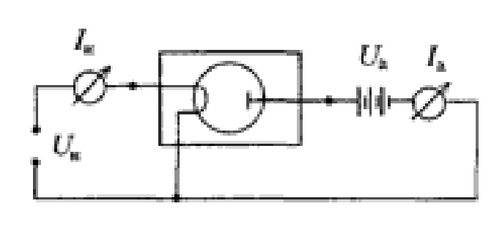

Рис.4. Содержимое «черного ящика» — диод Эдисона

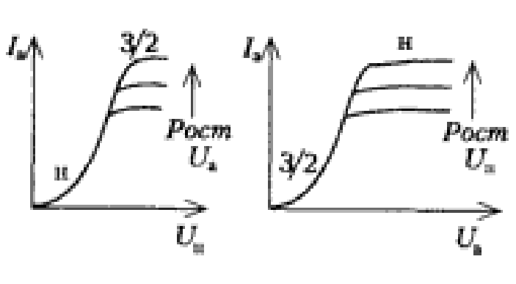

Рис.5. Накальная (слева) и вольт-амперная (справа) характеристики диода («н» — область насыщения, когда ток анода равен току эмиссии, «3/2» — закон изменения анодного тока, когда он меньше тока эмиссии)

Заметим, что если на анод подать отрицательное напряжение, то, как вы уже знаете, ток через лампу течь не будет. Поэтому диод можно применять как выпрямитель для преобразования переменного (например, синусоидального) напряжения в пульсирующее (нижние половинки синусоиды «срезаются»). Но как «усилитель» применить диод при подаче напряжения на анод нельзя — ведь зависящий от напряжения ток будет протекать в той же входной цепи.

Существуют ли иные, кроме изменения температуры катода и напряжения на аноде, способы управления движением электронов? Конечно. Совсем не обязательно изменять напряжение на аноде — ведь движение электронов зависит от электрических полей, созданных наличием зарядов и потенциалов на любых электродах, стоящих на пути электронного потока или рядом с ним.

Авоська для электронов

Ли де Форест поставил на пути электронов сетку. Теперь управляющий сигнал надо было подавать на нее (рис.6), а выходным сигналом по-прежнему был анодный ток $I_а$.

Посмотрим, что произошло с недостатком диода — низким входным сопротивлением. Недостаток устранен, причем радикально. Входное сопротивление увеличено на много порядков. При отрицательном потенциале сетки относительно катода электроны, эмитированные катодом, вообще не попадают на сетку (она их отталкивает) и входной ток может протекать только по стеклу, а оно — очень хороший изолятор. Но будет ли работать лампа при отрицательном напряжении $U_с$ на сетке? Может быть, отрицательное напряжение на сетке вообще прекратит движение электронов к аноду? Зависимость тока анода от напряжений на сетке и аноде ($U_а$) триода показана на рисунке 7.

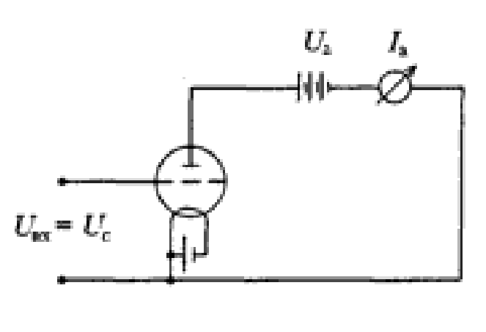

Рис.6. Триод: входной сигнал подается на сетку

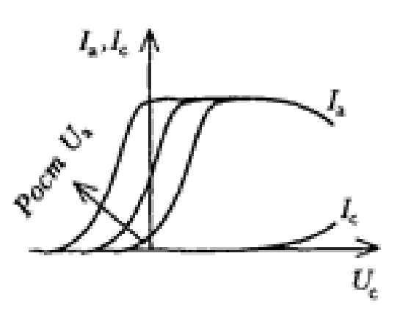

Рис.7. Анодно-сеточные характеристики триода

Влияние сеточного и анодного напряжений на анодный ток аддитивно, причем анодное напряжение влияет слабее, ибо поле, созданное им в районе катода, ослабляется сеткой.

Итак,

$$I_а \sim \left(U_с + (U_а/k)\right)^{3/2}.$$

Величину k называют усилением (смысл такого странного названия станет ясен из дальнейшего) и говорит она о том, во сколько раз изменение напряжения на сетке влияет на ток сильнее, чем изменение напряжения на аноде:

$$k = \frac{\Delta I_а/\Delta U_с}{\Delta I_а/\Delta U_а}.$$

Крутизна зависимости $I_а$ от $U_с$ равна $\Delta I_а/\Delta U_с$, где $\Delta I_а$ — изменение анодного тока, вызванное изменением сеточного напряжения $\Delta U_с$, так, естественно, и называется — крутизной. При положительных напряжениях на сетке появляется сеточный ток $I_с$, а при его росте начинает уменьшаться анодный ток (см. рис. 7). Но этот режим для работы триодов нехарактерен.

Работа триода характеризуется двумя основными независимыми параметрами — крутизной и усилением. Иногда вводят еще и третий — отношение усиления к крутизне. Оно равно $\Delta U_а/\Delta I_а$ и называется, естественно, внутренним сопротивлением. Крутизна определяет способность лампы усиливать радиосигналы, а коэффициент усиления — способность лампы усиливать низкочастотное (звуковое) напряжение. Поэтому в зависимости от предназначения лампы надо бороться (как и следовало ожидать) за разные параметры.

Вторая сетка помогает первой

Для работы первых триодов нужно было анодное напряжение около 100 В. Питались тогда радиосхемы от батарей, а соединять последовательно многие десятки элементов не хотелось. Позже, когда радиоаппаратура стала питаться в основном от сетей переменного напряжения, допускающих легкое его повышение путем трансформации, острота проблемы уменьшилась. Но проблема, во-первых, не исчезла совсем, а, во-вторых, на путях уменьшения анодного напряжения было найдено и решение проблемы большого усиления.

Итак, почему триоду нужно иметь большое анодное напряжение? Потому, что при этом получается большой анодный ток. Если анодное напряжение уменьшить, то уменьшится ток и, следовательно, крутизна. Как разорвать эту цепочку? Как получить большой анодный ток при малом напряжении? Казалось бы, ответ прямо следует из формулы Ленгмюра — приблизив анод к катоду. Да, но при этом анодное напряжение начинает сильнее действовать на ток и, следовательно (действие-то сетки остается таким же!), уменьшается усиление. А это тоже не здорово. Таким образом, надо и приблизить анод к катоду и не приблизить его... Наверное, примерно так рассуждал и Ленгмюр, предложивший в 1913 году ввести в триод дополнительную сетку, находящуюся ближе всего к катоду, и подать на нее положительное напряжение. Эти лампы были названы «двухсетками», и они действительно работали при меньших анодных напряжениях — порядка 10 – 20 В против 100 В. Но с годами получать высокие напряжения становилось все легче и легче, и, казалось, век двухсеток кончился, не начавшись.

Второе рождение второй сетки произошло в 1926 году. В.Шоттки и А.Холл предложили расположить вторую сетку не ближе к катоду, а наоборот — ближе к аноду. Прианодная сетка экранировала катод от анода и, следовательно, увеличивала усиление. Эта лампа была названа тетродом. Так была решена проблема малого усиления триода.

Впрочем, и крутизну хочется увеличить. Из формулы Ленгмюра видно, как ее увеличить — приблизить сетку к катоду. На этом пути за двадцать лет (с начала сороковых до конца пятидесятых годов) зазор сетка-катод был уменьшен в 10 раз: с 200 до 20 мкм. Но это потребовало создания технологии изготовления проволоки диаметром 7 мкм (в 7 раз тоньше волоса) и радикального изменения технологии и конструкции ламп. Ведь мало изготовить эту проволоку, надо еще сделать из нее сетку, на что-то намотать, как-то закрепить. Все это было сделано, и крутизна была увеличена, но все же лампы с такими сетками были сложными в производстве и дорогими. Другой путь — это был опять путь двух сеток. Положительная прикатодная сетка увеличивала ток и увеличивала крутизну.

Что позволено триоду, то не позволено тетроду

При больших напряжениях на сетке в триоде начинал уменьшаться анодный ток (см. рис.7). Ну что ж, ничего странного — электроны перехватывались сеткой и не доходили до анода. Стало быть, этот эффект должен быть у любого триода. Однако нет! В некоторых случаях при увеличении сеточного напряжения ток сетки начинал уменьшаться, а ток анода, соответственно, расти. Заметим, что сумма токов анода, сетки и катода должна быть равна нулю, ибо в лампе электроны не возникают и не пропадают. Впечатление такое, что либо с сетки начинают уходить какие-то дополнительные электроны и приходить на анод, либо с анода уходят положительные ионы и приходят на сетку. Ионам в лампе взяться неоткуда — вакуум хороший, электроды не разрушаются. Но почему из сетки вылетают электроны? По очень простой причине — потому, что на нее попадают электроны. Входя в материал, они передают свою энергию и электронам материала, и атомам. Передача энергии атомам — это нагрев материала, а получившие энергию электроны либо опять же отдают ее атомам, либо за счет этой энергии вылетают из материала сетки и летят к аноду. Явление это называется вторичной электронной эмиссией, а то, что изображено на рисунке 8, называется динатронным эффектом сетки.

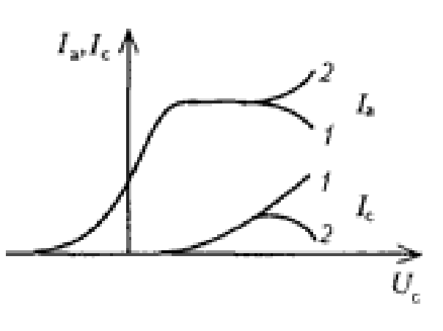

Рис.8. Динатронный эффект в триоде (1 — нормальный токоперехват, 2 — динатронный эффект сетки)

Разумеется, вторичная эмиссия имеет место и на аноде. Но покуда анодное напряжение больше сеточного, вторичные электроны с анода не попадают на сетку (энергия основной массы вторичных электронов мала), а возвращаются на анод и на ток в цепи не влияют. Если же сеточное напряжение становится больше анодного, то вторичные электроны с анода достигают сетки и ток анода все-таки начинает уменьшаться, а ток сетки опять растет.

Впрочем, для триода все это не столь важно, так как обычно триоды работают при малых сеточных напряжениях, а чаще всего — при отрицательных. Иная ситуация в тетроде. На вторую сетку (сетки принято нумеровать от катода) при работе лампы подается обычно довольно большое напряжение — сто и более вольт. В этом случае на зависимости анодного тока от анодного напряжения возникает падающий участок. При напряжении на аноде, меньшем напряжения на второй сетке, с увеличением напряжения на аноде вторичные электроны, вылетевшие с него, начинают на него возвращаться.

Вторичную эмиссию можно уменьшить выбором материала электродов. Можно бороться со вторичной эмиссией конструктивными мерами, например сделав «камерный анод» в виде полости, в которой вторичные электроны будут «запутываться», попадать со стенки на стенку, и не будут вылетать в объем лампы. Если сделать электрод шероховатым, то он будет вести себя как «камерный анод» — электроны будут запутываться во впадинах. Так смыкаются конструирование и технология.

Но есть и третий путь борьбы с динатронным эффектом. В 1926 году фирмой «Филипс» был выпущен пентод — лампа с пятью электродами или тремя сетками. Третья сетка находилась между второй и анодом. На нее подавалось напряжение, более низкое и чем на второй сетке и чем на аноде, чаще всего ее просто соединяли с катодом. В этом случае все вторичные электроны возвращались на тот электрод, с которого вылетели. Проблема была решена.

Аппетит (на сетки) приходит во время еды

Вторая сетка была введена для получения большего усиления, третья — для избавления от динатронного эффекта. Но ниоткуда не следует, что их нельзя применять и для чего-нибудь другого. Например, если на одну сетку подать переменное напряжение с частотой f_1, а на другую — с частотой f_2, то в цепи анода лампы будут протекать токи с частотами $f = nf_1 \pm mf_2$, где $n = 0, 1, 2, \ldots$, $m = 0, 1, 2\ldots$ (конечно, n и m могут быть только такие, чтобы f было больше нуля). Частоты $nf_1 + mf_2$ называются суммарными, частоты $nf_1 - mf_2$ — разностными. Фильтрами, настроенными на соответствующие частоты, эти токи можно выделить. На «смешивании» частот f_1 и f_2 и выделении разностной частоты $f_1 - f_2$, где f_1 — частота принимаемого сигнала, а f_2 — частота сигнала, генерируемого в приемнике специальным генератором (гетеродином), основана вся современная радиотехника. Лампа, в которой смешиваются сигналы, называется «смесителем».

Существуют лампы с четырьмя сетками (гексод), пятью (гептод) и шестью (октод). В некоторых случаях часть лампы выполняет роль «лампы гетеродина», а часть — «лампы смесителя». В этом случае передача сигнала из гетеродина в смеситель происходит не по проводам, а путем попадания электронов из одной части лампы в другую.

Как работает обычный триод при подаче на него высокочастотного переменного напряжения? Пока напряжение на сетке больше среднего, на электроны, летящие от катода, действует большое ускоряющее поле. Если напряжение меньше среднего, ускоряющее поле тоже меньше. Если, пока электрон летел, прошел период переменного напряжения, то итоговое воздействие на электрон отсутствует — полпериода его толкали, полпериода тормозили. Итак, на частоте, на которой период переменного напряжения равен времени пролета электрона, лампа работать уже совсем не может. Сделаем оценки. Время пролета равно $t = \sqrt{2d/a}$, где d — ширина зазора, a — ускорение. Далее, $a = F/m$, где F — сила, m — масса электрона; $F = eE$, где e — заряд электрона, E — поле; наконец, $E = \left(U_с + U_а/k\right)/d$. Подставляя, получаем

$$t = \frac{\sqrt{2}d}{\sqrt{\left(U_с + U_а/k\right)e/m}} = \frac{5\cdot10^{-6}d}{\sqrt{U_с + U_а/k}}.$$

Обычное значение знаменателя около 2, тогда $t = 2\cdot10^{-6}d$ и для d = 100 – 10 мкм получаем $t = 2\cdot10^{-10}$ – $2\cdot10^{-11}$ с. Следовательно, лампы с зазором сетка-катод в 100 – 10 мкм полностью прекратят работу на частотах 5 – 50 ГГц. Практически ситуация, как всегда, сложнее и хуже, чем на бумаге, и лучшие СВЧ-лампы работают на частотах до 10 ГГц. Достигается это уменьшением d до 10 мкм с соответствующим ростом сложности изготовления и стоимости и уменьшением надежности и мощности. Кстати — мы пока нигде ни слова не сказали о мощности, а это весьма важный параметр.

Магия мегаваттов

То, что большая мощность нужна, сомнений не вызывает. Дальность действия радиолокатора и радиопередатчика и способность работать в условиях помех зависят именно от мощности. Ее можно увеличить либо путем увеличения тока лампы, либо путем увеличения напряжения. Поскольку максимальная плотность тока, отбираемого с катода, ограничена, надо либо увеличивать площадь катода, либо напряжение. И то и другое означает увеличение размеров лампы, поскольку при увеличении напряжения приходится увеличивать зазоры между электродами во избежание возникновения электрического пробоя.

Иногда — и это самое интересное — решение бывает промежуточным, когда новая лампа не является «просто увеличенной» старой, а состоит как бы из нескольких ламп в общей вакуумной оболочке. Иногда эти лампы имеют и еще какие-то общие детали. Например, стандартным решением является наличие в лампе нескольких катодов при одной сетке и одном аноде (рис.9).

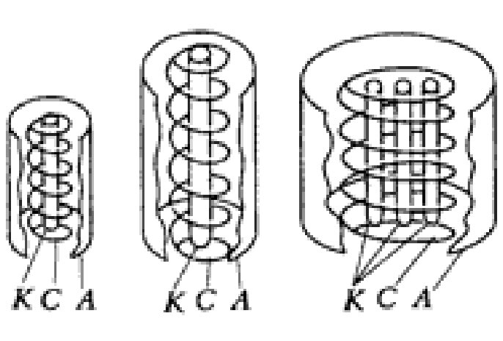

Рис.9. Лампа-прототип, мощная лампа с большим катодом и мощная лампа с несколькими катодами соответственно (К — катод, С — сетка, А — анод)

Иногда граница между «общим» и «частным» проходит так хитро, что и не сразу разберешься. Например, в многолучевой лампе (идея многолучевой лампы была высказана В.Ф.Коваленко в 1940 г.), показанной на рисунке 10 слева, катод нагрет весь, но покрытие, эмитирующее электроны, заполняет не всю его поверхность, а только участки между стержнями сетки. Дополнительный прок от вариантов, показанных на рисунке 10, — уменьшение тока сетки (электроны пролетают в основном мимо даже при положительном напряжении на ней).

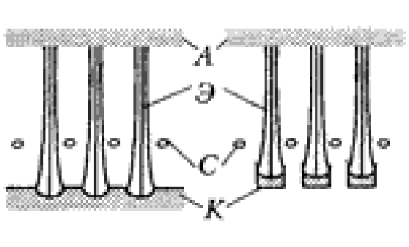

Рис.10. Варианты многолучевой лампы (разрез, Э — электронные потоки)

«Прибор нового вида»

Основные современные области применения ламп, в которых полупроводниковые приборы их не заменят и не составят им конкуренции, это приборы а) мощные, б) высокочастотные, в) термо- и радиационностойкие. Однако совершенствованию способствует конкуренция, и поэтому посмотрим, чем ответили лампы на транзисторный вызов. Но прежде всего — в чем он состоял?

Транзисторы можно сделать маленькими и их можно делать механизированными и групповыми методами. Групповые методы — изготовление сразу нескольких приборов; когда нужны миллионы приборов, технологичность может стать определяющим фактором. Заметим, что говорить про транзистор «маленький» — нельзя. Его можно сделать таким, но если нужен транзистор мощный, то малым его не сделать — выделяющееся при работе тепло выведет его из строя. Казалось бы, в этом смысле у лампы есть преимущество: будучи сделана из высокотемпературных материалов, она могла бы быть меньше транзистора той же мощности. Да, но уж очень много в лампе деталей и очень уж сложную форму они имеют. *Нельзя ли сделать лампу из небольшого количества простых деталей?*

В 1934 году Ю.А.Кацман и А.А.Шапошников предложили конструкцию «штабельной лампы». На керамических рамках закреплялись отдельные электроды, потом рамки складывались штабелем, стопкой (рис.11). Такая лампа могла быть маленькой, ее сборку можно было механизировать. Она, кстати, была термостойкой (рамки из керамики) и высокочастотной (малые зазоры).

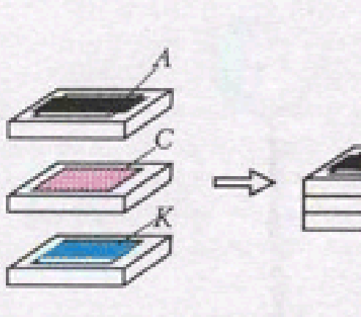

Рис.11. Штабельная лампа (А — анод, С — сетка, К — катод)

Дальнейшее развитие этой идеи привело к созданию фирмой «General Electric» ламп диаметром и высотой около 1 мм. Электроды в этих лампах делались из титана, который хорошо спаивается с керамикой. Лампа состояла из чередующихся керамических и титановых дисков, керамические служили изоляторами и определяли зазор между электродами, а *титановые диски выполняли одновременно* роль выводов и несли в своей средней части электроды лампы.

Другой путь, впрочем тоже основанный на пайке металлов с керамикой, позволил фирме «RCA» выпустить в 1959 году прибор, названный «нувистором» (от nuevo vista — новый вид). В этих лампах, успешно применяющихся по сей день, все электроды крепились пайкой к керамической пластине, которая впаивалась в металлический стаканчик, служивший оболочкой лампы. Их сборка была механизирована, они успешно работали до температуры 550 °С. Электронным лампам оставался последний шаг на пути уменьшения количества деталей, и они его сделали.

Лампа без деталей

А что в этом странного? В самом деле, сколько деталей в транзисторе? А это смотря в каком. Если транзистор *является частью микросхемы*, то деталей в нем нет ни одной, так же как нет отдельных деталей во всей микросхеме. Роль проводников выполняют напыленные пленки металлов, роль изоляторов — пленки окислов.

Первая попытка сделать лампу с уменьшенным количеством деталей посредством напыления проводящих пленок основывалась на конструкции штабельной лампы. Пленки, выполнявшие роль электродов, напылялись на керамические пластины (рис.12). Однако в этой лампе еще были отдельные детали, хотя серьезный шаг по пути избавления от них был сделан. Следующий вариант был уже чисто пленочный (рис.13). Электроны летели с катода на анод над сеткой. Но наиболее эффективной оказалась некая «смесь» штабельной лампы и планарной (рис.14). Анодная пленка нанесена на одну керамическую пластину, а катодная и сеточная на другую. Такие лампы были созданы в 1977 году в Лос-Аламосской лаборатории. Они способны работать свыше 10000 часов при температуре 500 °С и могут размещаться на подложках с плотностью 3000 1/см². Наиболее острой проблемой этих ламп является выбор материалов — при таких температурах керамика начинает понемногу взаимодействовать с металлами, да и сопротивление у керамики *уже несколько уменьшается*. Словом, рекордные параметры даром не даются.

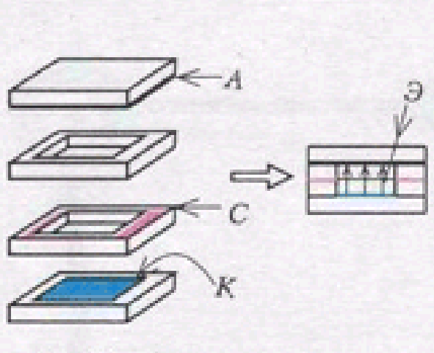

Рис.12. Штабельная пленочная лампа (Э — электронный поток)

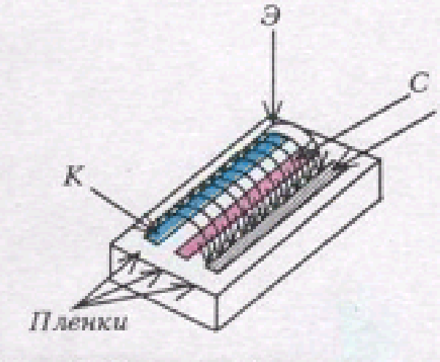

Рис.13. Пленочный триод

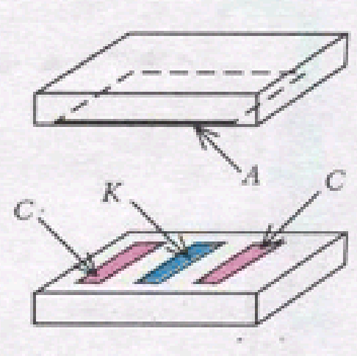

Рис.14. Пленочный триод на двух подложках

Пленочная технология была успешно применена и в мощных лампах. А именно, оказалось возможным не делать сетку отдельно, а наносить на катод изолирующие полосочки, а на них — проводящие полоски, выполняющие роль сетки. Зазор катод-сетка в этом случае получается малым (что увеличивает крутизну лампы) и стабильным. Так пленочная технология, получившая широкое распространение благодаря развитию полупроводниковой техники, способствовала улучшению параметров электронных ламп.

Мы изучили один тип электронных приборов — так называемые лампы с электростатическим управлением. Существует множество других электронных приборов. Но пугаться не надо! В самом деле — маленькая мышь съедает, как известно, большой кусок сыра. Делает она это очень просто — отъедая один маленький кусок за другим.

Copyright ©1996-2002 МЦНМО
Пишите нам: kvant@mccme.ru
Проект осуществляется при поддержке Московского комитета образования, Московского Института Открытого Образования, Электронного журнала "Курьер образования"