**Океан в капле воды, или Вся техника в одной стекляшке**

Леонид Ашкинази

Рассмотрена история электронных вакуумных приборов (сеточных ламп и СВЧ-приборов), принципы их работы, основы конструкции и технологии.

Повествование о любом объекте техники должно состоять из рассказа о его теории, конструкции, технологии и применении. Вот, к примеру, велосипед: его теория соединяет технику с физикой (гироскоп), конструкция и технология – со всей техникой (конструкция – с самописцем: цепная передача, технология – с метательным оружием: резина), применение соединяет велосипед с психологией (прогулки с девушкой), социологией (сбыт), биологией (мозжечок). Причем все это должно рассматриваться в развитии, в истории, и кончаться прогнозом – будет ли кататься и как именно киборгизированный и клонированный человек XXII века? Я полагаю, что с мороженым в руке.

Понятно, что последовательное и глубокое воплощение такой программы – «это вещь на века, как Баальбекская платформа». И оно требует совершенно нереального объема публикации. Попробуем воплотить эту программу последовательно, охватив все аспекты, но установив такую глубину захвата, чтобы уложиться в статью. При этом читатель получает общую картину, а уточнять детали ему придется – если возникнет интерес – самому.

Эти две статьи будут об электронных лампах. В первой мы рассмотрим теорию, конструкцию, историю и роль в цивилизации примерно до середины прошлого века. Во второй – их роль во второй половине века, технологию и перспективы. Для такого деления материала есть несколько причин, главная из них такова: во второй половине века у ламп возник конкурент – полупроводниковый прибор, транзистор. Это существенно повлияло на развитие ламп, а конкуренция между лампами и транзисторами и разделение ими сфер влияния сильнейшим образом повлияли на технику вообще и на развитие цивилизации в целом. Достаточно сказать, что без транзисторов мы бы не имели современных компьютеров, а без ламп – радио и телевидения.

Начнем с определения и нескольких принципиальных тезисов. Электронная лампа – это один из приборов, предназначенных для преобразования электрических сигналов, и он использует воздействие электрического и магнитного поля на электроны, движущиеся в вакууме. От полупроводниковых и газоразрядных приборов лампу отличает то, что в ней вакуум. Стало быть, нужен баллон, отделяющий вакуум от атмосферы. Раз мы собираемся работать с электронами, нужен катод – электрод, из которого мы будем извлекать электроны. Чаще всего это термокатод, то есть энергию, необходимую электронам для выхода из катода в вакуум, мы будем сообщать им путем нагрева. Для нагрева потребуется нагреватель. Раз мы извлекли электроны, надо будет их вернуть (соблюдая закон сохранения заряда), то есть потребуется анод – электрод, который примет электроны из вакуума и вернет их в электрическую цепь. И нам потребуется какой-то электрод, посредством которого мы будем управлять электронами. В простейшем варианте такой электрод будет один, его называют сеткой, он действительно на нее похож, и именно сквозь нее пролетают электроны, держа путь от катода к аноду. При изменении напряжения на сетке изменяется поток электронов: отрицательное напряжение на сетке, отрицательный заряд отталкивает электроны, положительный притягивает. Сеток может быть несколько, напряжение на каждой будет влиять на ток, и мы получим смеситель – лампу, в которой сигналы будут «смешиваться». Все это называется «лампы с электростатическим управлением».

Если мы попробуем усиливать такой лампой сигнал все более высокой частоты, то возникнет проблема. Электрону требуется какое-то время, чтобы долететь от катода до сетки, и если за время его полета напряжение на сетке успеет сменить знак, влияние напряжения на ток ослабеет и в итоге исчезнет совсем. Для работы в области таких частот применяются лампы «с протяженным электронным пучком». Существует несколько типов таких ламп, а основные принципы их работы были предложены в предвоенные годы – стимулом стало развитие радиолокации. Именно такие лампы применяются для космической связи и в телевидении, и в обозримом будущем они не будут вытеснены полупроводниковыми приборами, поскольку есть принципиальные физические ограничения на создание высокочастотных и мощных полупроводниковых приборов. В области же низких частот электронные лампы в значительной мере уступили место полупроводникам, за исключением высоковольтных и сильноточных приборов и ламп для высококачественного усиления звука. В первом случае полупроводниковая экспансия ограничена относительно низким – не более нескольких киловольт – рабочим напряжением и относительно небольшим – не более килоампер – током, во втором случае – нелинейностью зависимостей токов от напряжений, приложенных к приборам. Еще две области применения, в которых полупроводниковые приборы не могут тягаться с лампами, – это высокие температуры и радиация.

Если в определении электронной лампы выкинуть слово «электрических», то придется считать лампой и кинескоп (в телевизоре и компьютере), который преобразует электрический сигнал в оптический, и фотоэлемент, который осуществляет обратную операцию, и электронно-оптический преобразователь, который делает и то, и это. Относить их к электронным лампам или нет – дело вкуса. Мы так поступать не будем по простой причине – иначе в статью уж точно не уложимся.

Электронная лампа возникла из электрической. Создал первую электронную лампу Т.А. Эдисон, и произошло это так. Свет в электрических лампах излучался в те времена накаленной угольной нитью. 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. Если ввести в лампу дополнительный электрод, – решил он, – и подать на него положительный относительно нити потенциал, то пылинки будут притягиваться к этому электроду и не будут попадать на баллон.

Но баллоны все равно темнели. Обидно; зато Эдисон обнаружил, что в цепи дополнительного электрода протекает ток. Так в 1883 году он открыл два новых явления: протекание тока через вакуум и термоэмиссию – испускание заряженных частиц нагретыми веществами. Позже эта два явления вместе были названы «эффектом Эдисона». Как практически мыслящий человек (автор более 1000 патентов), он придумал и 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. А вот концы батареи он не перекинул, и то, что в его условиях вакуум пропускает ток только в одном направлении, не обнаружил. Диодный эффект был открыт лишь через 21 год!

Между тем в 1887 году (по некоторым источникам – в 1886-ом) Дж.Дж. Томсон установил, что ток в лампе Эдисона переносят именно электроны, а не ионы. Но, быть может, это свойство именно угля? Нет, если нить была металлической, электронный ток возникал тоже. Он становился особенно велик, если нить покрывали порошком окиси кальция (ну, то есть зубным порошком). Так в 1904 году А. Венельт открыл оксидный катод, которому предстояло через полвека завоевать мир электронных ламп. В том же году Дж.А. Флеминг наконец-то перекинул концы от батареи, подал на дополнительный электрод минус относительно нити и немедленно обнаружил, что ток не идет. Он и создал вакуумный диод.

Однако этот диод был не совсем вакуумным. 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. Выяснилось, что уменьшение тока при улучшении вакуума вызвано образованием в лампе отрицательного заряда. А почему он не влиял раньше? Ведь уже летящие через зазор катод-анод электроны имеют отрицательный заряд, отталкивают электроны, только-только вылетевшие из катода, и уменьшают этим ток, текущий через зазор. Но при наличии газа электроны ионизуют его, причем 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 положительный заряд, компенсирующий заряд электронов. Поэтому при наличии газа суммарный заряд оказывается меньше, а ток больше. Но и без ионной компенсации движение электронов в вакууме оказалось вполне возможно. Первый настоящий именно вакуумный диод был создан в 1913 году У. Кулиджем и в 1915 году С. Дэшманом. Для получения в вакуумных лампах того же тока, что и в лампах с частичной компенсацией пространственного заряда, требовались большие напряжения между катодом и анодом, 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.

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 споры о приоритете. Закон звучит так: ток, который протекает через вакуумный зазор, пропорционален площади электродов, напряжению на зазоре в степени 3/2 и обратно пропорционален квадрату ширины зазора. Это при положительном напряжении на аноде относительно катода, когда анод притягивает электроны. При отрицательном напряжении ток не идет. Поэтому диод может быть применен в качестве выпрямителя, то есть прибора, пропускающего ток в одну сторону и не пропускающего в другую, в качестве «нелинейного сопротивления», не подчиняющегося закону Ома и, наконец, в соответствии с идеей Эдисона – для контроля малых изменений напряжения. Из этих трех идей радиотехника использовала первую – активно, вторую – слабее, а третью, кажется, не использовала вовсе.

Однако диод даже не вполне лампа – в нем нет независимого способа управления движением электронов. Существуют ли иные, кроме изменения температуры катода и напряжения на аноде, способы управления движением электронов? Движение электронов зависит от электрических полей, созданных наличием зарядов и потенциалов на любых электродах, стоящих на пути электронного потока или рядом с ним.

В 1906 году Ли де Форест поставил на пути электронов сетку. Теперь управляющий сигнал надо было подавать на нее, а выходным сигналом по-прежнему был анодный ток. На движение электронов в лампе, и, стало быть, на ток анода, теперь влияют два напряжения – на аноде и на сетке. Причем сеточное влияет гораздо сильнее – она ближе к катоду. Величину, которая говорит, во сколько раз изменение напряжения на сетке влияет на ток сильнее, чем изменение напряжения на аноде, называют усилением. Отношение изменений тока к изменению напряжения на сетке – крутизной (не в современном смысле, в в смысле – крутизна характеристики, графика). Крутизна определяет способность лампы усиливать радиосигналы, коэффициент усиления – способность лампы усиливать низкочастотное (звуковое) напряжение. Поэтому в зависимости от предназначения лампы надо бороться (как и следовало ожидать) за разные параметры. Заметим, что это были лампы «с плохим вакуумом», то есть с частичной компенсацией заряда. Настоящий именно вакуумный триод был создан И. Лэнгмюром и Г. Арнольдом в 1915 году.

Для работы первых триодов нужно было анодное напряжение около 100 вольт. Бедные радиолюбители держали под столами батареи по нескольку десятков банок, и несло от них кислотой... Позже, когда радиоаппаратура стала питаться в основном от сетей переменного напряжения, допускающих его изменение путем трансформации, острота проблемы уменьшилась. Но не исчезла совсем, а, кроме того, на путях уменьшения анодного напряжения было найдено и решение проблемы большого усиления.

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. То есть хорошо бы и приблизить анод к катоду, и не приблизить его... Наверное, примерно так рассуждали В.И. Коваленков в 1911 году и тот же И. Ленгмюр в 1913 году, которые предложили 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. Но с годами получать высокие напряжения стало легче, и, казалось, век двухсеток кончился.

Второе рождение второй сетки произошло, когда В. Шоттки и А. Холл, по одним источникам – в 1919, а по другим – в 1926 году, предложили расположить вторую сетку не ближе к катоду, а наоборот – ближе к аноду. Прианодная сетка экранировала катод от анода, уменьшала его влияние на ток, и, следовательно, увеличивала усиление. Эта лампа была названа тетродом. Так была решена проблема малого усиления триода. В. Шоттки и А. Холл еще войдут в историю физики – открытием эффекта Шоттки и эффекта Холла, но пока они этого не знают.

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 микрон. Но это потребовало создания технологии изготовления проволоки диаметром 7 микрон (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, но лампы с такими сетками были сложны в производстве и дороги. Другой путь – это был опять путь двух сеток: прикатодная сетка с положительным потенциалом увеличивала ток и крутизну.

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. Третья сетка была предназначена для борьбы с «динатронным эффектом» – попаданием на вторую сетку электронов, выбитых из анода (этот эффект называется вторичной электронной эмиссией). Она их отталкивала и возвращала домой – на анод.

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 f1, а на другую – с частотой f2, то в цепи анода лампы будут протекать токи с частотами nf1 ± mf2, где n и m = 0, 1, 2, 3... (результат должен быть больше нуля). Фильтрами, настроенными на соответствующие частоты, эти токи можно разделить. На «смешивании» частот и выделении разностной частоты f1 – f2, где f1 – частота принимаемого сигнала, а f2 – сигнала, генерируемого в приемнике специальным генератором (гетеродином), основана радиосвязь. 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, то есть током в вакууме.

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. Лучшие СВЧ-лампы работают на частотах до 10 гигагерц. Достигается это уменьшением зазора между катодом и сеткой до 10 микрон – с соответствующим ростом сложности изготовления и стоимости, а также уменьшением надежности и мощности.

С увеличением рабочей частоты возникают и другие проблемы. Поскольку напряжение на сетке изменяется, электроны влетают в зазор сетка-анод с разными скоростями. Время пролета от сетки до анода тоже не равно нулю, и электроны могут «перепутываться» – влетевшие позже, но с большими скоростями, могут обгонять влетевшие раньше, но с меньшими скоростями. В результате будет искажаться форма импульса, если лампа работает в импульсном режиме. Наконец, резонансная частота контура возрастает с уменьшением индуктивности и емкости. Если лампа работает на некоторой частоте, обычно в ее сеточной и анодной цепях применяются контуры, настроенные на эту частоту. Но лампа имеет собственную емкость (между электродами) и собственную индуктивность (вводов). Ни меньше этой емкости, ни меньше этой индуктивности емкость и индуктивность контура сделаны быть не могут.

Это проблемы, связанные с частотой. Есть еще проблемы, связанные с мощностью. Дальность действия радиолокатора и радиопередатчика и способность работать в условиях помех зависят 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 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. Иногда граница между «общим» и «частным» проходит так хитро, что не сразу и разберешься. Например, в многолучевой лампе, которая была предложена В.Ф. Коваленко в 1940 году и А.П. Федосеевым в 1941 году, катод нагрет весь, но покрытие, эмитирующее электроны, заполняет не всю его поверхность, а только участки между стержнями сетки. Поэтому электроны пролетают в основном мимо сетки даже при положительном напряжении на ней.

Одним из направлений развития конструкций ламп были попытки уменьшения количества 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. Такая лампа могла быть маленькой, ее сборку можно было механизировать. Она была термостойкой (рамки из керамики) и высокочастотной (малые зазоры).

В электронной лампе электроны пролетают сквозь сетки. Представьте себе электронный поток, пронизывающий две близко расположенные сетки. Пока между сетками нет напряжения, стало быть, в зазоре между ними нет поля, каждый электрон вылетает из зазора с той же скоростью, с которой влетает в него. Когда напряжение между сетками есть, скорость электронов будет увеличиваться, если поле между сетками ускоряющее, и уменьшаться, если тормозящее. Что произойдет, если напряжение изменяется синусоидально? Электроны, пересекающие зазор при ускоряющем поле, будут двигаться быстрее тех, которые пересекали зазор при тормозящем поле. В результате электроны начнут собираться в сгустки, состоящие из электронов, пролетевших зазор раньше, но при тормозящем поле, и пролетевших позже, но при ускоряющем поле. Так образуется электронный прибой – электронные волны, накатывающиеся на берег... Электронные сгустки – это что-то мощное, серьезное, почти осязаемое. Так что вроде бы можно малое напряжение преобразовать во что-то большее. Но во что?

Модуляцию скорости мы создали, пропустив электронный поток между двумя сетками. Попробуем использовать ту же систему для отбора энергии от электронных сгустков. Если, скажем, электронные сгустки пролетают через зазор между сетками, в котором имеется тормозящее поле, то из зазора электроны выйдут с меньшими энергиями – значит, часть энергии мы у них отобрали. Надо бы это поле создать... Сейчас мы введем очень важное для техники электровакуумных приборов понятие – «наведенный ток». Пусть внутри зазора, от левого электрода к правому, летит электрон (хоть один, хоть сгусток). По мере полета напряженность поля между левым электродом и сгустком убывает, а между сгустком и правым электродом возрастает. Значит, изменяются и плотности зарядов на электродах и, следовательно, протекает ток в цепи, соединяющей эти электроды. Это и есть наведенный ток. Обратите внимание – электрон не попадает на электрод, а ток в цепи идет.

Этот ток и несет энергию, отданную электронами. Он может заряжать аккумулятор, выделять тепло в сопротивлении или использоваться как-либо иначе. Если электроды соединены сопротивлением, то на нем, согласно закону Ома, при протекании тока возникнет напряжение. Это напряжение имеет такую полярность, что поле тормозит электроны. Иначе и быть не могло – если бы полярность напряжения была бы иной, пучок сам собой бы ускорялся. Как тогда быть с законом сохранения энергии? А так все в порядке – энергия, потерянная пучком, поступает в нагрузку и, если это простое сопротивление, превращается в тепло. Итак, с помощью двухсеточного зазора можно создать у электронного пучка модуляцию по скорости, затем она преобразуется в модуляцию по плотности, и с помощью двухсеточного же зазора у такого пучка можно отнять энергию. Этот прибор изобрели в 1939 году братья Р. и З. Вариан и, независимо, В. Хан и Г. Меткалф. Назвали они его «клистрон» – от греческого слова, означающего ударять или окатывать волной. Позже его стали называть пролетный клистрон, чтобы отличать от другого прибора, о котором мы расскажем немного ниже. Оба эти прибора могут работать на частотах, в 100 раз более высоких, чем лучшие лампы с электростатическим управлением.

Представьте себе, что надо передавать информацию и имеется передатчик, работающий на некоторой частоте f. С какой скоростью можно передавать информацию при наличии такого передатчика? Пусть мы можем управлять передаваемым сигналом, вырезая из него отдельные периоды колебаний. Таким способом можно передавать информацию со скоростью f бит/с (1 бит – это один выбор из двух ситуаций: есть полуволна или нет; для передачи буквенного текста надо 5 бит на букву (если разных букв – 32)). Существует много видов модуляции, и скорости передачи информации с их помощью различны. Но порядок величины будет таким, как мы получили. Чем больше информации мы хотим передать, тем выше нужна рабочая частота, поэтому телевизионные передачи ведут на частотах метрового диапазона и даже на более коротких волнах. Кроме того, высокочастотные электромагнитные колебания используются в радиолокации, для питания ускорителей и для многих других целей, в том числе для нагрева продуктов в микроволновых печках.

Вспомним про проблемы ламп. Вот какими они были: время пролета катод – сетка, время пролета сетка-анод, емкость/индуктивность лампы. Как поступил с этими проблемами клистрон? Уменьшить время пролета можно увеличением скорости электрона. Это и сделано в клистроне. Сначала электрон ускоряется относительно высоким напряжением и лишь затем вводится в двухсеточный управляющий зазор. Время пролета сетка-анод обращено на пользу – именно в это время скоростная модуляция преобразуется в модуляцию по плотности. А что делать с емкостями и индуктивностями? Представим себе контур, настроенный на очень высокую частоту. Конденсатор в нем – две пластины, индуктивность – кусок провода, их соединяющий. У такого контура есть недостаток – он будет сильно излучать в окружающее пространство. Как с этим бороться? Известно как – экранированием. Прокрутим мысленно провод, соединяющий пластины конденсатора, вокруг оси – получим нечто, похожее на тор («бублик»). Вместе с пластинами он образует то, что называется «объемный резонатор». Емкость у него связана с пластинами, а индуктивность – с остальной оболочкой. А как хорошо он сочетается с двухсеточным зазором! Надо только сделать зазор из двух сеток, либо на лампу с двухсеточным зазором надеть снаружи (можно уже вне вакуума) «индуктивную» часть резонатора – тор. Для невооруженного глаза он выглядит пустым изнутри. Но мы-то знаем – внутри у него магнитное поле. Пролетный клистрон можно легко превратить в генератор. Для этого надо вывести часть сигнала из выходного резонатора и вернуть ее во входной. Если сдвиг фаз в самом клистроне и в цепи обратной связи такой, что часть выходного сигнала, возвращаясь на вход, совпадает по фазе со входным сигналом, усилитель может превратиться в генератор.

Заметим, что сигналом является и сам электронный поток, точнее – распространяющиеся в нем электронные сгустки. Что, если заставить их возвращаться во входной резонатор? Пусть, например, вместо второго резонатора стоит «отражатель» – электрод, на который подано отрицательное напряжение. Сгусток подлетит к нему, развернется и полетит назад, к входному зазору. Проходя через входной зазор, такой сгусток вызовет появление электрического поля. Если фаза этого поля такова, что оно будет усиливать модуляцию электронного потока, с каждым пролетом сигнал будет нарастать, прибор начнет генерировать электромагнитное поле. Изменяя напряжение на отражателе, можно управлять временем полета сгустка между первым и вторым проходами через резонатор. Чем больше отрицательное напряжение на отражателе, тем на большем расстоянии от себя он остановит сгусток и заставит вернуться его в зазор. Поэтому у отражательного клистрона частота генерируемых колебаний меняется при изменении напряжения на отражателе. Естественно – он генерирует на той частоте, на которой выполняется условие совпадения фаз, а время полета сгустка и фаза его прибытия зависят от напряжения на отражателе. Но откуда берется самый первый сгусток, самая первая неоднородность потока, с которой начинается лавинное нарастание сигнала, переходящее в генерацию? Самые первые неоднородности – это флуктуации электронного потока, случайные неоднородности, которые есть всегда. Хотя бы потому, что поток заряда не непрерывен – он состоит из отдельных электронов.

Отражательный клистрон был создан в 1940 году В.Ф. Коваленко и, независимо от него, Н.Д. Девятковым, Е.Н. Данильцевым, И.В. Пискуновым. В течение десятилетий он был основным типом генератора сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний. Позже полупроводниковые приборы составили отражательному клистрону серьезную конкуренцию. Однако в диапазоне миллиметровых длин волн ЭВП по-прежнему «дают фору» полупроводникам.

Здесь мы должны сделать небольшое чисто человеческое отступление. Во многих книгах об изобретении отражательного клистрона писали, что он был изобретен академиком Девятковым. И все. И не врали, и правды не говорили. Успешно замалчивалась роль Вадима Коваленко и в других случаях. А он внес большой вклад в развитие советской вакуумной электроники: достаточно сказать, что в некоторые годы половина статей в журнале «Электроника СВЧ» – главном журнале отрасли – содержала или ссылки на его работы, или благодарности ему «за полезное обсуждение», «за критику» и т.п. И это при том, что своих оригинальных публикаций у него было немного. Он поразительно умел угадывать важные проблемы, успешно решал их и писал ясные статьи – в смысле методики изложения многие его работы остаются непревзойденными. Мы все делали одно дело, откуда же бралась зависть? Неужели потому, что он – умный человек и великолепный рассказчик – пользовался большим успехом у женщин? Мы все равны перед историей, она все расставит по своим местам, споры о приоритете не нужны тем, кого все равно давно нет с нами, а когда-то они не потребуются и нам. Наша честность – в этих вопросах тоже – нужна нам самим и сейчас.

Проблем в области конструкции и технологии ЭВП СВЧ оказалось немало. Проще сказать, что там все – проблема. Во-первых, сетки, образующие зазор в резонаторе. Какая-то доля электронов оседает на этих сетках, мигом превращая всю свою кинетическую энергию в тепловую. Сетки делали и тугоплавкие, и с тонкими высокими ребрами (чтобы они лучше передавали тепло на охлаждаемую часть резонатора), но все равно – в мощных приборах сеток как таковых нет. Электронный пучок летит через отверстие – как бы через сетку с одним большим окном.

Следующая проблема – «окно для вывода энергии». Мощные электромагнитные колебания генерируются в вакууме, а нужны они нам снаружи прибора, в воздухе. Казалось бы, особой проблемы нет – любое стекло или керамика прозрачны для электромагнитного излучения и «не прозрачны» для воздуха. Но часть электромагнитного излучения поглощается стеклом или керамикой и нагревает ее. Керамика – материал сам по себе термостойкий, однако при нагреве увеличивается ее проводимость, она начинает сильнее поглощать электромагнитное излучение, еще сильнее нагреваться и так далее. Этот процесс называется тепловым пробоем, а кончается он сквозным проплавленным отверстием, соединяющим вакуумный объем прибора и атмосферу.

Многие ЭВП СВЧ работают в импульсном режиме. Это значит, что электронный поток обрушивается на поверхность коллектора импульсами – скажем, 1 мкс ток идет, а потом 1 мс тока нет. Здесь, на коллекторе, кончается короткая, но яркая биография электрона – в вакууме он ускорялся, тормозился и генерировал, а в металле есть только безликий электронный газ, там электроны не отличаются друг от друга. Но напоследок электрон мстительно делает вот что – отдав остаток энергии на нагрев коллектора, он способствует его разрушению. Действительно, когда ток идет, поверхность коллектора нагревается, в паузе – остывает. При нагреве и охлаждении возникают термические напряжения, в материале коллектора понемногу накапливаются дислокации, потом возникают трещины, и в итоге коллектор начинает разрушаться.

Что касается окон для вывода энергии, то они перегреваются и разрушаются из-за поглощения в них энергии электромагнитной волны. Казалось бы, созданием диэлектриков с очень малой проводимостью эту задачу можно решить. Увы, электрон, ударяясь о любой материал, выбивает из него вторичные электроны. Ну и что? Пусть даже шальной электрон ударился в керамическое окно вывода энергии – ну выбьет он сколько-то вторичных электронов, ну разлетятся они куда попало, и все. Но, во-первых, выбьет он вторичных электронов довольно много – несколько штук. Во-вторых, раз окно это предназначено для вывода энергии, то, значит, вокруг него и в нем самом всегда есть сильное электромагнитное поле. Вторичные электроны ускорятся этим полем, наберутся от него энергии, врежутся в керамику, выбьют из нее еще больше вторичных электронов, которые опять ускорятся полем, и пошло-поехало. Электронная лавина нарастает, энергия отнимается от электромагнитной волны и идет на нагрев окна. Такого издевательства – а оно называется высокочастотным вторично-электронным разрядом – не выдерживает самая высокотемпературная керамика. Решение было найдено, но об этом – позже. А пока поговорим о другом приборе.

Возможно, что изобретатель лампы бегущей волны Р. Компфнер придумал ее в 1944 году, поднимаясь по какой-нибудь лестнице. Особенно удобно было бы сделать это изобретение, если бы в середине лестничного проема медленно двигался лифт, а человек, быстро поднимавшийся по лестнице, мог бы заглядывать в кабину. Конечно, восстановить, как именно было сделано изобретение, трудно. Технический детектив в чем-то, по-видимому, сильно отличается от просто детектива, ибо хороших детективов много, а хороших технических детективов мало.

Представьте себе, что лифт движется чуть быстрее человека и из него подталкивают бегущего по винтовой лестнице человека – быстрее, быстрее! Согласно третьему закону Ньютона, на лифт будет действовать сила, направленная против движения, он будет тормозиться и отдавать свою энергию человеку, бегущему по лестнице. В итоге их скорости уравняются. Не обвивайся лестница вокруг шахты лифта, ничего бы не получилось – человек движется по прямой лестнице быстрее лифта. А если она обвивается, длина ее увеличивается. Можно подобрать угол наклона витков спирали («лестницы») и скорость электронов («лифта») так, чтобы электромагнитная волна, бегущая по спирали, имела ту же скорость перемещения вдоль оси спирали, что и электроны.

Возьмем проволоку, свернем ее в спираль и запустим в один ее конец электромагнитную волну. По оси же пропустим электронный пучок и начнем варьировать энергию (скорость) электронов. Когда энергия электронов будет такая, что скорость их станет чуть больше скорости волны («осевой» скорости), начнется перекачка энергии от электронов к волне, и с выходного конца спирали мы получим более мощную волну и хилые – с уменьшенной энергией – электроны. В лампе бегущей волны, как и в клистроне, происходит преобразование модуляции по скорости в модуляцию по плотности. Только напряженность поля у спирали меньше, чем в резонаторе (в резонаторе есть резонанс). Поэтому нужен большой путь – и электронам и волне надо пройти много витков спирали, чтобы возникла заметная модуляция, а потом, после преобразования модуляции, волна начала усиливаться, отбирая энергию от собирающихся в сгустки электронов. Собираются электроны в те места волны, где поле меняет знак – сзади оно ускоряющее, спереди тормозящее, – как люди перед входом в метро в час пик.

Можно сделать из клистрона и ЛБВ гибридный прибор, взяв один конец от одного прибора, а другой – от другого. Если создавать исходную модуляцию, как в ЛБВ, потом давать электронам подрейфовать, а снимать сигнал с пучка резонатором, как в клистроне, получится один гибридный прибор. Если же создавать исходную модуляцию, как в клистроне, а снимать сигнал с пучка, как в ЛБВ, получится другой гибридный прибор. Все эти приборы уже придуманы. Как бы узнать, какие приборы еще не придуманы? Ниже мы вернемся к этому интересному вопросу.

Мы начали с аналогии между лестницей и спиральной замедляющей системой. Раньше всех в ЛБВ была использована в качестве замедляющей системы спираль. Но время шло, требования к мощности и рабочей частоте ЛБВ увеличивались. А спираль трудно охлаждать – она закрепляется на диэлектрических опорах, которые проводят тепло плохо. При длине волны меньше 5 мм сделать спираль становится трудно. Для работы в области больших мощностей и малых длин волн применяются другие замедляющие системы. Такие системы состоят из отдельных резонаторов, связанных отверстиями, через которые электромагнитное поле проникает из одного в другой.

ЛБВ, как и клистрон, можно превратить в генератор. По спирали волна может распространяться в обе стороны. Идя в одну сторону, она усиливается, подкачиваясь от пучка, а в другую бежит сама по себе, понемногу затухая. Нельзя ли сделать некое подобие ЛБВ, в которой будет усиливаться обратная волна? Тогда замыкание цепи обратной связи будет автоматическим, даже без учета отражений на концах: в одну сторону энергия будет переноситься электронами, а обратно – волной. И мы получим генератор. Но можно ли сделать так, чтобы электроны отдавали энергию волне, спешащей навстречу им? Представьте себе, что электронный пучок летит с одной стороны от металлического экрана с окнами, а волна бежит с другой. Пусть электронный сгусток, пролетая мимо окна, увидел там тормозящее поле, притормозился, отдал часть энергии и полетел дальше. У следующего окна он опять увидел тормозящее поле и опять пострадал. Вы сразу же видите, что таким способом можно усиливать волну, не обязательно имеющую ту же скорость, что и электронный сгусток. Важно лишь, чтобы электрон, пробегая мимо окон, видел в них одинаковые фазы колебаний.

Сгусток будет в следующем окне видеть не то место волны, с которым взаимодействовал в предыдущем окне, а другое. Но что с того? Он будет отдавать энергию, а волна будет усиливаться. При этом электрону безразлично, куда летела эта волна – с ним или навстречу.

Конструирование – всегда компромисс. Если больше мощность – то меньше диапазон частот, а если нет – то короче срок службы или дороже прибор. И так одно за другое, другое за третье, пятое и девяносто девятое... При определенной длине волны резонаторы в клистроне и спираль в ЛБВ должны иметь определенные размеры. Какая-то доля электронного пучка перехватывается сеткой в зазоре резонатора или спиралью. Пучок перехватывается – мощность выделяется – деталь нагревается – металл испаряется или плавится. Если плавится, то все ясно. А если испаряется, то пары оседают или на изоляторах, превращая их в проводники, или на катоде, изменяя его состав до потери работоспособности.

Что делать? Во-первых, можно искать конструкции, в которых меньше плотность мощности, выделяющейся на поверхностях электровакуумных приборов. Ну конечно, электронный пучок не должен перехватываться тем, чем не должен. Но при попытке сжать пучок посильнее он теряет ламинарность. Такой пучок не удается сильно затормозить (рекуперировать) на коллекторе, кпд прибора падает. Не будем разматывать эти клубки до девяносто девятого слоя, но поверьте – цифра не преувеличена. В лампе бегущей волны все связано одно с другим. Как и в других приборах. Жизнь вообще так устроена. И не ситуация в ЛБВ – самая трудная для понимания.

Прибор, называемый магнетроном, был изобретен... о, это длинная история! Дело в том, что в отличие от ЛБВ и клистрона, изобретение магнетрона состояло из нескольких этапов – один элемент, потом второй, третий и так далее. А.У. Холл – 1921 год, Яга и Окабе – 1928 год (это тот самый Яга, который «антенна Уда-Яги» – посмотрите на крышу любого дома), Г. Бут и Дж. Рэндалл – 1939 год, наконец – Н.Ф. Алексеев, Д.Е. Маляров и В.П. Илясов в 1939 году (еще раз о приоритете – во многих книгах про последнего не упоминают, в некоторых – неправильно пишут его фамилию). Некоторые ЛБВ интересны тем, что изготавливаются лишь в нескольких десятках экземпляров (ЛБВ для спутников связи), а магнетрон интересен тем, что это первый действительно массовый СВЧ-прибор. Ибо те магнетроны, которые используются в СВЧ-печах, впервые начали выпускаться в Японии миллионами. Традиционная японская кухня предпочитает варить, парить и тушить, а не жарить. Румяная корочка (содержащая, между прочим, канцерогенные продукты термолиза низкосортных жиров) – не ее цель. Так вот, СВЧ-печи как раз и делают нечто похожее на варку, парку и тушение, поскольку электромагнитная волна сверхвысокой частоты поглощается всем объемом сразу.

Магнетрон – это прибор со «скрещенными полями»: с магнитным и электрическим полями, перпендикулярными друг другу. Электрон вылетает из катода с маленькой скоростью и начинает двигаться к аноду. Пока электрон пролетел мало и скорость его мала, сила, действующая со стороны магнитного поля, тоже мала, и электрон летит почти по прямой. По мере приближения к аноду скорость электрона растет, сила Лоренца увеличивается, траектория изгибается. При малой индукции магнитного поля электрон отклонится от прямой, но анода достигнет. При большой индукции поля траектория электрона анода не достигает, он описывает кривую и возвращается к катоду, уменьшив свою скорость до нуля – согласно закону сохранения энергии.

Но если в объеме прибора возбуждаются колебания электромагнитного поля, то есть происходит генерация, то энергия, которая перекачивается в поле, должна отбираться от электронов. Значит, часть из них не возвращается к катоду – у них не хватает на это энергии. Они падают на анод, а полученную от постоянного электрического поля энергию частично отдают на генерацию электромагнитного поля, а частично – аноду. В лампе бегущей волны электрон падает на участке от катода до начала замедляющей системы. Падает в том же смысле, в котором падает камень, оторвавшийся от вертикальной скалы – двигаясь по силе, уменьшая потенциальную энергию и увеличивая кинетическую. Электроны входят в замедляющую систему, набрав скорость, и уже в ней отдают кинетическую энергию электромагнитной волне.

В магнетроне поведение электронов описывается двумя процессами – сортировкой и фазировкой. Электрон, который вышел из катода в такой момент, что потом он должен отдавать энергию волне, падает на анод, падает и отдает энергию. Электрон, который вышел из катода в такой момент, что волна должна отдавать ему энергию, тут же завершает свою биографию, врезавшись в катод. Это и есть сортировка – поэтому большинство электронов отдает энергию волне, а не забирают ее у нее. Кроме того, электроны «фазируются», собираются в сгустки, как в ЛБВ.

В работающем магнетроне в каждый момент времени заряды и потенциалы участков поверхности между входами в резонаторы чередуются. При этом возникает электрическое поле, которое направлено от положительно заряженных участков к отрицательным. А поскольку магнитное поле перпендикулярно электрическому, возникает сила Лоренца, которая ускоряет и тормозит электроны, попавшие в зоны действия по-разному направленного электрического поля и, следовательно, собирает (замечаете аналогию с работой ЛБВ?) электроны в сгустки, протянутые от катода к аноду и называемые «спицами».

Классический магнетрон имеет цилиндрический катод и цилиндрический, коаксиальный ему анодный блок с резонаторами – то есть замедляющая система свернута в кольцо и электронные траектории тоже замкнуты. Поэтому магнетрон – генераторный прибор: сигнал в нем «возвращается». Но, разомкнув или одно, или другое, или и то и это вместе (итого 4 варианта), можно превратить магнетрон в усилитель. Не говоря уж о том, что магнетрон может работать на прямой и на обратной волне (как ЛБВ) и может использовать сформированный своим катодом или введенный извне («инжектированный») электронный пучок. Худо-бедно 4×2×2×2 = 32 варианта приборов со скрещенными электрическим и магнитным полем. И не все они реализованы...

Еще одно важное отличие магнетрона от клистрона и ЛБВ – «переплетенность». В клистроне все отдельно – катод, входной резонатор, дрейфовое пространство, выходной резонатор и коллектор. В ЛБВ средние три элемента соединены в спирали: входная ее часть в основном модулирует пучок, выходная в основном снимает сигнал с пучка и вся она – пролетное пространство. В магнетроне переплетено все – все его сечения эквивалентны, все они содержат кусочек катода, кусочек пролетного пространства, коллектора и замедляющей системы.

О переплетении работы и жизни рассказывает единственная художественная книга, названная именем электровакуумного прибора. Книга «Магнетрон» была написана в 1957 году физиком Г.И. Бабатом и писательницей А.Л. Гарф. Это книга о временах, когда перед физиками Америки и Англии стоял вопрос: как сделать, чтобы на экранах радаров были видны перископы германских нацистских подводных лодок? Сейчас это вообще не вопрос – длина волны, которую генерирует магнетрон, должна быть меньше диаметра перископа. А тогда этот вопрос стоил – и не «64 тысячи долларов», как пошутил персонаж Ст. Лема, а десятки тысяч жизней.

Но откуда в магнетроне взялось электромагнитное поле, почему возникла генерация? Как вы уже знаете, электронные сгустки, пролетая мимо резонаторов, вызывают появление в металле наведенного тока, а в резонаторе – поля. Если период выступов подобран правильно, то поля, возникающие при пролете сгустков, складываются, поле усиливается, и в итоге мы получаем мощную сверхвысокочастотную электромагнитную волну. Часть электронов, эмитированных катодом, возвращаются на него, причем имея вполне приличную скорость. Возврат таких электронов на катод влечет его нагрев. Иногда мощность, поступающая на катод, оказывается так велика, что его приходится не греть, а охлаждать. Электроны, попавшие на катод, выбивают из него вторичные электроны. Этот вид эмиссии называется вторичной электронной эмиссией. Часто вторичная электронная эмиссия оказывается достаточной, чтобы магнетрон работал только за ее счет.

Конструкторских и технологических проблем в магнетроне много. Одна из них – проблема обеспечения малых размеров и малых допусков (то есть точных размеров). Эта проблема общая для многих ЭВП, но, согласитесь, намотать спираль диаметром 1 мм для ЛБВ проще, чем сделать анодный блок для магнетрона диаметром тоже 1 мм. Применяют пайку (для резонаторов лопаточного типа), выдавливание, электроискровую и электрохимическую обработку, резку и сверление электронным лучом и, наконец, все традиционные виды металлообработки. Выдавливанием удается делать системы с толщиной лопаток 0,1 мм, а допуски на размеры при электроискровой обработке составляют 1 мкм. Когда же размеры анодного блока становятся меньше 1 мм, идут, например, на такое ухищрение – делают отдельные пластины из фольги толщиной 10...20 мкм и складывают анодный блок из таких пластин. Отверстия же сложной формы в фольге делают методами, заимствованными из полупроводниковой техники (например, фотолитографией). Впрочем, все это относится скорее к технологии, и скоро мы к ней обратимся.

Выше мы описали историю электровакуумных приборов и их конструкции, доведя наше повествование до возникновения транзисторов. Теперь посмотрим, как реагировали лампы на транзисторную экспансию, и расскажем о технологии ламп, их сегодняшнем состоянии и перспективах.

Первые транзисторы были не очень надежные, с плохими параметрами, но маленькие по сравнению с лампами. Кроме того, их можно было изготавливать «групповыми методами» – сразу много приборов. А когда нужны миллионы приборов, технологичность может стать определяющим фактором. Посмотрим, как лампы ответили на вызов.

Реакция ламп на появление транзисторов, улучшение их параметров и расширение области их применения носила троякий характер. Первый, самый простой путь – уступить место. И во многих случаях так и происходило. Сегодня, после полувека совместного существования, можно сказать, что транзисторы вытеснили лампы из области низких частот и малых мощностей – за одним исключением. В области сверхвысококачественного воспроизведения звука, «High End», лампы все-таки оказались лучше транзисторов. Им свойственна высокая линейность характеристик, позволяющая уменьшить искажения. Сегодня этот рынок не слишком велик, но существует он стабильно.

Второй путь – уменьшение габаритов. Путь к этому открыла упомянутая выше «штабельная лампа». Позже фирма «General Electric» создала лампы 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 одновременно выполняли роль выводов и несли в своей средней части электроды лампы. В 1959 году фирма «RCA» начала массовый выпуск прибора, названного «нувистором» (от nuevo vista – новый вид). В этих лампах все электроды крепились пайкой к керамической пластине, которая впаивалась в металлический стаканчик, служивший оболочкой. Сборка была механизирована, лампы успешно работали до температуры 550 по Цельсию.

Электронным лампам оставался последний шаг на пути уменьшения количества деталей, и они его сделали. Посмотрим, сколько деталей в ее конкуренте – 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. Но этим способом можно изготовить и лампу. 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. Однако в лампе еще были отдельные детали, хотя серьезный шаг по пути избавления от них был сделан.

Следующий вариант был уже чисто пленочный. Электроны летели с пленки-катода на пленку-анод над пленкой-сеткой. Но наиболее эффективной оказалась некая «смесь» штабельной лампы и планарной. 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 10 000 часов при температуре 500 по Цельсию и могут размещаться на подложках с плотностью 30 штук на квадратном миллиметре. 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.

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, которая получила широкое распространение благодаря развитию полупроводниковой техники, способствовала улучшению параметров электронных ламп.

Но, тем не менее, тягаться с транзисторами в области малых мощностей нувисторы не смогли, а остальные варианты не стали массовыми. Можно, конечно, пофантазировать насчет Пентиума на лампах, но – жизнь решила иначе. Впрочем, мне кажется, что ничего особо страшного не произошло бы – позже были созданы холодные катоды, лампы смогли работать бы без нагрева, пленочная технология позволила бы получить габариты в десятки микрон. Ну и был бы процессор размером с пакет молока... Между прочим, переход с ламп на транзисторы повлиял на стиль проектирования схем – лампы могли осуществлять сложные преобразования сигнала, на которые транзисторы, которые являются с точки зрения ламп «всего лишь» триодами, не способны. Сложные функции пришлось осуществлять за счет сложной схемы. Возможно, это подтолкнуло развитие цифровой техники.

Третий путь, по которому может пойти техника – гибридизация приборов и решений. Скрестить электровакуумный прибор с полупроводниковым можно, в принципе, несколькими способами, и некоторые из них были реализованы. Можно создать электронный пучок в вакууме «электровакуумными» методами, но бомбардировать им не анод, а полупроводник, вводя в него носители заряда. Поскольку энергия электронного пучка может быть очень велика, то носителей заряда в полупроводнике на каждый падающий электрон образуются тысячи. Другой вариант гибридного прибора – это вакуумный полевой триод. Он похож на полевой транзистор, только затвор отделен не твердым диэлектриком, а вакуумом. Между прочим, газоразрядный прибор тоже можно «скрестить» с вакуумным, и тоже несколькими способами.

Чтобы лампа реально существовала и работала, мало придумать принцип ее работы и конструкцию. Лампу, как и любую вещь, надо сделать. Когда все упирается в технологию? Довольно часто. Особенно если попытаться сделать что-то новое – ЭВП рекордной мощности, КПД или частоты. Оказывается, что либо нельзя сделать такую конструкцию, как хочется, либо сделать можно, но нет материалов, при использовании которых все это сможет работать. Выход из положения – создание новой технологии или новых материалов.

Собственно технология начинается с исходных материалов. Своих материалов требует любая область техники; а специфика состоит в том, какие именно материалы и с какими именно свойствами требуются. Например, металл А, особо чистый по примесям В, С и Д – это обычная формулировка. Но А, В и т.д. – в каждой области свои. Электротехнике страшны те примеси к меди, которые понижают электропроводность – P и Si. Технике электронных ламп страшны примеси Cd, Zn и O к меди, на электропроводность не влияющие. Ниже мы объясним, почему.

Есть требования и по структуре – материал может иметь кристаллическую структуру, и в этом случае важно, какого размера эти кристаллы и как они расположены. Причем как примеси, так и структура могут быть важны не только для работы лампы, но и для процессов изготовления: примесь (S в меди) или структура (длинные одинаково ориентированные кристаллы), которые делают металл хрупким, не дадут применить пластическое деформирование (гибку, выдавливание).

Проблемой исходных материалов для техники электронных ламп занимались целые институты, были опубликованы тысячи статей, есть и книги на эту тему. Все это не аргумент, – скажете вы, – мало ли кто занимался ерундой, мало ли дурацких книг было издано. Но в крупнейших электронных фирмах были специальные металлургические отделы. Те, кто делал лампы, считали необходимым иметь свою собственную металлургию.

Многие технологические проблемы сводятся к выбору материала. Причем ситуация обычно устроена так, что материал, который способен выдерживать более высокие температуры (например, тугоплавкие и прочные при высоких температурах молибден и вольфрам), будет и нагреваться сильнее (например, из-за плохой проводимости и плохой теплопроводности). Чистых металлов в природе не так уж много, но сплавов – не счесть. Вдобавок есть еще композитные материалы – например, смесь (не сплав) вольфрама и меди – сочетающие высокие проводимость, теплопроводность и прочность.

После того, как изготовлены и разложены по полкам на складе исходные материалы, начинается изготовление деталей. Для изготовления деталей ламп применяются те же способы, что и в технике вообще. Но одни применяются чаще, другие реже, а третьи – в каких-то вариантах или модификациях. Например, реже применяется механическая полировка – потому что при ней в поверхность внедряются загрязнения. Вместо нее используют химическую или электрохимическую полировку, а если надо применить именно механический процесс – то шлифовку.

Требования к чистоте деталей в электронной технике намного выше, чем в технике вообще. Чтобы понять, почему это так – достаточно посмотреть на лампу и осознать, что в ней вакуум. В технологии электронных ламп, как и во всей технике, применяются химические способы очистки. Характерное отличие – широкое применение ультразвуковой очистки. Возможно, это связано просто с тем, что технология электронных ламп создавалась позже общетехнической и впитала в себя новые (на тот момент) решения. Затем, взрастив эти решения внутри себя, она стала источником этих решений для остальной техники. Позже такая же ситуация в какой-то мере возникла между техникой электронных ламп и полупроводниковых приборов – вторая строилась на более прогрессивных методах, но первая позже заимствовала их, увидев, как они хороши.

Намного чаще, чем в остальной технике, используют при производстве ламп для очистки отжиг. Если он правильно проведен, то содержание загрязнений уменьшается не только на поверхности, но и в глубине деталей. Там, откуда они все равно при работе лампы попали бы сначала на поверхность деталей, а потом в ее объем. Таким образом, процесс отжига в некотором смысле имитирует работу деталей в лампе.

При отжиге из металлов выделяется в основном водород, иногда азот и кислород. Выделение воды и оксидов углерода – результат взаимодействия диффундирующих из глубины металла водорода и углерода с оксидами на поверхности, поскольку газы диффундируют в металлах не в виде молекул, а в виде отдельных атомов. При значительном содержании углерода желательно, чтобы металл был окислен, так как углерод сам по себе, без реакции с кислородом, с поверхности не удалится – он и не испаряется (при этих температурах), и в реакцию с водородом не вступает. Если же оксида для окисления углерода не хватает, то металл отжигают во «влажном водороде» – смеси водорода и воды – для окисления.

В диэлектриках газы могут диффундировать и в виде молекул, поэтому выделяющиеся из стекол и керамик вода и углекислый газ – не продукт реакций, а их собственные, имевшиеся в объеме вода и углекислый газ. Для удаления примесей в печи должна быть среда, концентрация загрязнений в которой достаточно мала. Иначе загрязнения будут не удаляться из деталей, а насыщать их. Отжиг в вакууме является первым приходящим в голову решением. Но это плохое решение: получить в большой печи, набитой грязными (по меркам электроники) деталями, такой вакуум, какой нужен в лампе, – трудная задача. Поэтому чаще отжигают в водороде, который заодно восстанавливает оксидные пленки. Правда, при этом водород проникает в некоторые металлы; само по себе это не очень опасно – при обработке уже собранной лампы водород относительно легко покидает детали и откачивается насосами. Но нельзя отжигать в водороде металлы, активно поглощающие водород – при поглощении ими водорода они становятся хрупкими.

Кроме того, проникновение водорода в металл опасно, например, если проникший в глубь металла водород соединяется с кислородом, получившиеся водяные пары разрывают металл. Называется это явление «водородная болезнь». Поэтому, например, если используют медь и предполагают позже отжигать детали в водороде, то берут металл с пониженным содержанием кислорода (бескислородную медь). Кроме водорода, детали отжигают в аргоне, а иногда в смесях инертного и восстанавливающегося газов.

Отжечь детали так, чтобы они стали чище «снаружи и изнутри» – сложная задача. В этой области выполнено множество исследований, опубликовано немало статей, а в книгах по технологии электронных ламп отжигу отводится обычно весьма заметное место. Температура, время, состав газа, скорость протока, загружаемые детали – их количество, материал, расположение – все влияет на результат, зачастую непонятным и непредсказуемым образом. Загрязнения переносятся при отжиге с одних деталей на другие; несмотря на избыточное давление, атмосферные газы проникают в печь; лампы, собранные из более тщательно очищенных деталей оказываются грязнее собранных из менее очищенных. Эти и десятки других загадок, успешные и безуспешные попытки их решения – вот что такое ежедневная работа технолога.

Что же до ситуаций, когда хорошо очищенные детали хуже очищенных плохо, то причина такова: при особо тщательной очистке поверхность детали оказывается химически очень активной и мгновенно окисляется при извлечении деталей из печи. Если же очистка производилась не столь «зверски», то слегка окисленные детали далее окисляются уже медленно. Отсюда видна важность проблемы хранения; и действительно, в технике электронных ламп это – отдельная проблема. Существует специальная тара для хранения и транспортировки деталей, их хранят в осушенной и очищенной от пыли среде, а иногда в среде инертного газа или в вакууме.

Отжиг применяется в технологии электронных ламп не только для очистки, он еще применяется для восстановления исходной, равновесной кристаллической структуры, изменившейся при механической обработке. При многих видах механической обработки, особенно при вытяжке и иной пластической деформации, происходит увеличение количества дислокаций (нарушений кристаллической решетки) и изменение размера кристаллов – удлинение в направлении деформации. У такого материала меняются свойства – механические, электрические, химические. В частности, у него становится меньше способность деформироваться – она уже частично (или полностью) израсходована. Для восстановления исходных свойств и, в частности, для возможности дальнейшей деформации надо уменьшить количество дислокаций и измельчить вытянутые кристаллы. Это и происходит при так называемом рекристаллизационном отжиге.

Если же материал деформирован в упругой области и форма его стабилизирована какой-то технологической оснасткой (например, на оправку навита проволока – мы хотим сделать пружину), то отжиг необходим для снятия напряжений. Иначе проволока после снятия с оправки благополучно раскрутится, и вместо пружины мы получим проволокой по носу, и хорошо, если не по глазам. Автор это проходил...

Другой процесс, который также имеет в электронике свою специфику, – это процесс нанесения покрытий. Вообще в технике покрытия применяются чаще всего для увеличения коррозионной стойкости, трения, коэффициента излучения и твердости, уменьшения трения, коэффициента излучения и износа. То есть детали и устройства в целом работали бы и без покрытий, но хуже, и быстрее вышли бы из строя. В отличие от этого в технике электронных ламп покрытия, как правило, и являются тем, что работает, несет основную функцию. Покрытия экранов кинескопов излучают свет – без них кинескоп не работал бы вообще. Катодные покрытия эмиттируют, изоляционное покрытие на подогревателе изолирует его от катода – без них лампы не будут работать. Поэтому в технике электронных ламп было бы иногда логичнее говорить не о покрытиях на деталях, а о деталях, которые существуют лишь для того, чтобы на них могли быть покрытия.

Разумеется, в технике электронных ламп могут применяться все обычные покрытия – например, медные радиаторы вполне могут снабжаться покрытиями, предохраняющими их от коррозии или увеличивающими проводимость (в области сверхвысоких частот, когда токи протекают по поверхности). Внутриламповые детали могут иметь покрытия, уменьшающие коэффициент излучения (для увеличения экономичности) или увеличивающие его для охлаждения соответствующих деталей. Все остальные покрытия, которые мы рассмотрим, специфичны для электровакуумных приборов, причем многие из них наносится по специфической, применяемой в основном в этой области, технологии.

По обычным технологиям наносится в основном два типа покрытий. Антиэмиссионные покрытия на сетках ламп (золото, серебро, сплав олово-никель, титан и др.), предназначенные для увеличения работы выхода сеток при попадании на них с катода бария или тория наносят либо гальванически, либо протягиванием проволоки для сетки через расплав того металла или сплава, который надо нанести. Полупроводящие прозрачные покрытия из оксида олова получают либо пиролизом паров хлорида олова либо осаждением из раствора хлорида олова (стекло с таким покрытием можно нагревать пропусканием тока, например, чтобы оно не обледеневало).

Много сил и времени было потрачено на поиск материала и конструкции окон, допускающих вывод больших мощностей. Рекорд мощности клистрона 30 мегаватт (импульсная мощность, при длине импульса несколько микросекунд) продержался около 20 лет. Но в 1983 году в Стэнфордском университете был разработан клистрон мощностью 50 мегаватт, а еще через 2 года там же американские и японские специалисты сделали клистрон мощностью 150 мегаватт. Кроме всего прочего, оказался важным выбор антиэмиссионного покрытия для окна вывода энергии (помните – вторичноэлектронный разряд?).

Остальные процессы нанесения покрытий в технике электронных ламп строятся по следующей схеме: на поверхность наносится порошок вещества, которым мы хотим покрыть поверхность, а затем деталь нагревается так, чтобы произошло «спекание» – срастание частиц друг с другом и с поверхностью путем взаимной диффузии. Степень спекания обычно невелика, и покрытие получается пористым. Для эмиссионных и геттерных покрытий это необходимое условие работоспособности, для прочих оно допустимо. Обеспечить же высокую степень спекания нельзя потому, что для такого спекания нужна либо недопустимо высокая температура, либо давление, что обычно неудобно технологически.

Сам порошок может наноситься несколькими способами, различающимися тем, в какой среде находятся перед нанесением частицы порошка – в газе или жидкости – и под действием каких сил они приближаются к поверхности – электрических, гравитационных или упругих. Например, из суспензии в жидкости под действием электрических сил – это электрофорез, когда заряженные частицы устремляются к детали, на которую подается потенциал. Из жидкости под действием гравитации – это просто осаждение, так наносят в основном люминофорное покрытие на кинескопы. Из жидкости под действием упругих сил – это распыление или намазка суспензии. Из газа под действием электростатических сил – это так называемое электростатическое напыление, вообще применяемое в технике для нанесения красок. Чтобы порошок, попавший на поверхность, не осыпался с нее сразу, а дождался начала процесса спекания, к суспензии часто добавляют органические вещества с большой адгезией, клеи, испаряющиеся или разлагающиеся в процессе спекания.

По этим технологиям наносят покрытия почти всех видов – перечислим их. Проводящие покрытия из мелких частиц графита на баллонах кинескопов и электронных ламп. Полупроводящие покрытия из частиц оксидов хрома, железа и марганца для выравнивания потенциалов в высоковольтных электронных приборах. Геттерные покрытия из частиц активно взаимодействующих с остаточными газами металлов для поглощения газов внутри лампы. Изоляционные покрытия из частиц оксида алюминия на подогревателях. Люминесцентные покрытия в кинескопах и – кто помнит? – лампах-индикаторах настройки («кошачий глаз», серия Е). Эмиссионные покрытия оксидных катодов из оксидов щелочноземельных металлов и покрытия из металлических, как правило, никелевых частиц, на которые обычно и наносится собственно эмиссионное покрытие. И наконец, покрытия из частиц оксидов магния и алюминия на слюдяных изоляторах в лампах. Зачем же наносить изоляционное покрытие на изолятор? – удивитесь вы. Но его наносят не для изоляции, а для того, чтобы слюда стала шероховатой. А зачем ей становиться шероховатой? – еще больше удивитесь вы – ведь она в вакууме ни обо что не трется, это же не тормозные диски для Чероки! Шероховатость нужна для того, чтобы напыляющиеся на слюду при работе лампы металлические пленки не могли стать сплошными, проводящими и закоротить зазор.

Теперь, когда все детали изготовлены и молча лежат в эксикаторах с обеспыленной и высушенной средой или, пуще того, в вакуумных шкафах, из которых выкачан воздух, чтобы детали не окислялись, окинем их взглядом: катоды с эмиссионным покрытием; сетки из проволоки с антиэмиссионным покрытием, намотанной на траверсы (стойки) или, для ламп с планарной геометрией – на рамки; подогреватели, покрытые изоляцией; аноды, штампованные из черненного тонкого листового металла – для расположения внутри лампы и охлаждения излучением – или массивные медные, составляющие часть оболочки лампы и предназначенные для воздушного или водяного охлаждения; всяческие изоляторы из слюды или в мощных лампах из керамики, чтобы стабилизировать положение деталей относительно друг друга; оболочки ламп или, точнее, заготовки оболочек из стекла или иногда, в частности, для мощных ламп, из керамики; вводы, которые будут впаяны в стекло и начнут доставлять в лампу и из лампы электроны; и, наконец, газопоглотители или геттеры, которых, впрочем, может и не быть (об этом позже), а если они есть, то они могут существовать в виде покрытий на других деталях и в виде отдельных деталей – нераспыляемых геттеров или распыляемых – они при обработке лампы будут нагреты и напылят на стекло слой бария, который и будет поглощать потом остаточные газы.

Теперь мы приступим к сборке. На заре эпохи электронных ламп, 3/4 века назад, для работы в области больших мощностей применялись разборные лампы, работавшие с постоянной откачкой. Стучал насос, радиоволны неслись в эфир. Сейчас все лампы – неразборные и соединения в них выполняются, как правило, неразборными. Только в мощных лампах – и то редко – детали соединяют винтами; впрочем, поверх головок все равно приваривают накладки, исключающие ослабление и отвинчивание винтов. Лампа – не картофелеуборочный комбайн, в нее с гаечным ключом не залезешь. В маломощных лампах основной метод соединения деталей – контактная электросварка, называемая часто точечной сваркой; применяется также лазерная сварка. В мощных лампах применяется еще и аргонно-дуговая сварка, она дает вакуумно-плотный шов и поэтому может использоваться для соединения деталей оболочки лампы.

Сварка – это такой метод соединения деталей, когда расплавляется материал обеих соединяемых деталей. Если материалы остаются твердыми, а зазор между ними заполняется жидким металлом, который застывает, – это пайка. Если же расплавляется один из материалов, это называется пайка оплавлением. До сих пор мы говорили о соединении металл-металл. При соединении металлов с диэлектриками сварка – в обычном ее виде – не применяется, так как температура плавления керамик значительно выше температур плавления большинства металлов и, вдобавок, при плавлении керамики разлагаются. Стекло же плавится легко, но – наоборот, слишком легко – металлы же, с которыми соединяют стекло, плавятся при более высоких температурах. То есть это пайка оплавлением, причем плавится стекло.

А зачем вообще при пайке оплавлением расплавляют один из соединяемых материалов? Чтобы сблизить соединяемые материалы. Но можно и не плавить – нагреть и сильно сжать. За счет пластичности нагретых материалов они сблизятся на атомные расстояния, и диффузия, ускоренная нагревом, перемешает их. Такой способ соединения называется термокомпрессионной сваркой. Слово «сварка» тут совершенно не к месту, но такова традиция.

Часто говорят, что те или иные материалы соединить можно или нельзя. Так говорить некорректно – ибо соединить можно любые материалы. Вопрос в том, какую прочность будет иметь такое соединение. Тем более, что кроме внешних усилий (лампы роняют), существуют еще и внутренние, возникающие из-за различий в термических расширениях. Действительно, все эти пайки – сварки делаются при высоких температурах. Потом мы прибор охлаждаем, и если соединенные при высокой температуре материалы по-разному укорачиваются при охлаждении, то в соединении возникают термические напряжения.

Поэтому вопрос о соединении – это вопрос о согласовании расширений, о возникающих в соединении усилиях и о прочности тех соединений, которые возникают в сварной зоне или в зоне диффузии припоя и материала деталей друг в друга. Если говорят, что два металла хорошо соединяются, это означает, что возникающие в зоне их взаимодействия соединения не хрупки и прочны.

А еще в некоторых случаях в зоне соединения образуются легкоплавкие соединения. Автору этой статьи понадобилось как-то распылить в вакууме никель. Он взял титановую фольгу, вырезал ленточку, закрепил ее в вакуумной камере, положил на ленточку квадратик из никелевой фольги и начал греть титан, пропуская по нему ток. И в какой-то момент с ужасом увидел, что никель исчез, а в титановой ленте зияет аккуратное квадратное отверстие. Как квадратное отверстие в облаках у Стругацких, в «Гадких лебедях». При 955 по Цельсию в зоне контакта титан-никель началось плавление интерметаллида и расплавившаяся зона молча капнула вниз.

В отличие от спая металл-стекло, который по существу делается путем оплавления металла стеклом, соединение металла и керамики так получить нельзя – керамика тугоплавка. Поэтому сначала ее металлизируют, нанося на поверхность металлический порошок или соединения и расплавляя их. При этом за счет диффузии и реакций образуется переходная зона. А уже потом паяют керамическую металлизированную деталь и собственно металлическую.

Можно, впрочем, обойтись и без металлизации. При так называемой «активной пайке» между керамической и металлической деталью прокладывают фольгу из титана, затем этот комплект сжимают и нагревают. При взаимодействии образуется переходная зона, и детали соединяются. Заметим, что в электронике – как и вообще в жизни – более простая на вид технология требует более высокой технологической культуры и она более «строга», то есть требует лучшей стабилизации параметров. Поэтому попытки заимствования «простых» технологий не всегда бывают успешны.

Наконец, металл с керамикой (впрочем, и стекло со стеклом), можно соединить с помощью пайки, но не металлическими припоями, а легкоплавкими стеклами, или «глазурями» – фантазия технологов неисчерпаема. Особенно, когда постоянно приходят конструкторы с очередными безумными идеями. Проблема согласования коэффициентов термического расширения особенно важна, если один из соединяемых материалов хрупок: например, при спаивании металла со стеклом. В частности, для согласования с теми или иными сортами и группами сортов стекла разрабатывались специальные сплавы. А иногда разрабатывались стекла, надежно спаивавшиеся с каким-то определенным металлом. А на какие чудовищные ухищрения приходилось идти, чтобы спаять, например, германий со стеклом, сапфир со стеклом или кварц со стеклом. У вас не сжалось сердце? У кварца термическое расширение на порядок меньше, чем у стекол, и технологам пришлось разработать ряд из примерно десяти стекол, которые спаивались так: первое с кварцем, второе с первым и так далее – до последнего, которое спаивалось с обычным электровакуумным стеклом.

А вот еще маленькая одиссея: в древности вводы в стекло делали из платины, подобрали стекла, которые с ней хорошо спаиваются, и привыкли к ним. Но рано или поздно, а от платины пришлось отказываться. И придумали вводы из «платинита» – проволоки из сплава Н42 (42% никеля, остальное – железо), покрытой медью, причем толщина меди подбиралась так, чтобы у этой композитной проволоки расширение было, как у платины.

Итак, лампа собрана и надо начинать ее обработку. Для этого, разумеется, недостаточно выкачать из нее воздух и запаять стеклянную трубку (штенгель), по которой шла откачка (или перекусить, сварив холодной сваркой – металлическую). Даже если лампа собрана из чистых деталей, то они чистые «не в том смысле», в котором должны быть чистыми в лампе. А некоторые – даже очень грязные, и вообще – они еще не детали, а полуфабрикаты. А одной детали в лампе при сборке просто нет. Позже мы узнаем, откуда она возьмется.

Как бы ни была хорошо очищена деталь до сборки, после нее она оказывается грязнее. И хоть собирают лампы в капроновых перчатках, и хоть отбирают девочек-монтажниц по сопротивлению кожи влажных рук (что связано и со степенью влажности и с концентрацией ионов), но все равно – после сборки надо чистить. Вдобавок, в печи деталь нагревается и обезгаживается не так, как в лампе. Во-первых, не при тех температурах – обычно при более высоких, но не всегда. Во-вторых, в лампе нагрев неравномерен. И, наконец, в лампе нагрев производится не только нагревателем и излучением катода, но и электронным потоком, который разлагает оксиды на поверхности деталей. В печи его нет, значит – чистить придется в собранной лампе.

Для создания электронного потока катод должен эмиттировать, а для этого лампа не должна быть уж очень грязной. Поэтому процесс очистки лампы электронной бомбардировкой – отчасти саморегулирующийся. Если грязи летит слишком много, эмиссия катода уменьшается. Из этого сразу следует, что существует оптимальный режим, но его построение – немалое искусство, вопрос чутья технолога. Одна из главных идей очистки лампы – грязь не надо гонять с электрода на электрод. Очистка всех частей должна вестись одновременно. В технике электронных ламп стараются чистить все электроды лампы одновременно, причем по возможности по всей площади.

Поскольку очистка всех деталей и чистая сборка – большие проблемы, то в технике электронных ламп известны по крайней мере два приема, позволяющих сделать более чистой лампу, собранную из грязных деталей. Во-первых, это прогрев лампы при прокачке через нее водорода, имитация отжига в среде водорода. Во-вторых, это зажигание в лампе газового разряда, очистка электродов бомбардирующими их ионами, аналогично очистке в газовом разряде, применяющейся в полупроводниковой технике для обработки подложек перед напылением. Разумеется, откачка ламп при их прогреве – это также и очистка деталей в уже собранной лампе, но, поскольку прогрев стеклянной лампы обычно производится при температуре около 400 по Цельсию, реально обезгаживается только стекло.

Деталь, которая поступает на сборку и помещается в лампу в виде полуфабриката – это катод, а также все покрытия, нанесенные, как указано выше, с применением связок (клеев). При нагреве клей должен испариться или разложиться, при этом выделяется значительное количество газа и возможно загрязнение других деталей. Для оксидного катода эта ситуация усугубляется тем, что он наносится в виде кристаллов карбоната щелочноземельных металлов, а для перевода в оксиды их надо нагреть, разложить, откачать выделяющуюся смесь оксидов углерода, которая опять же, может окислить детали лампы. Построение такого режима нагрева катода, то есть зависимости температуры от времени, чтобы клей не разлагался, а испарялся, а карбонаты разлагались, но не окисляли – предмет многих научных работ, объект стараний поколений технологов и их головная боль.

После того, как лампа в основном обезгажена и даже катод превращен в оксиды, наступает этап активирования катода и обработки геттера. Активирование катода – это загадочный процесс, при котором в результате нагрева, отбора с него тока и химического взаимодействия оксида с активными присадками к материалу керна (основы, на которую нанесен тройной оксид бария-стронция-кальция) в покрытии возникает некоторый дефицит кислорода (отклонение от стехиометрии). В результате катод становится катодом – у него увеличивается эмиссия и проводимость.

Процесс обработки геттера выглядит по-разному, в зависимости от того, распыляемый или нераспыляемый геттер применен в лампе. Нераспыляемый – это кусочек пористого титана или какого-либо сплава, хорошо поглощающего остаточные газы и поддерживающего вакуум в лампе (как бы мы хорошо ни обезгаживали, при работе лампы вакуум в ней может и ухудшаться). Такой геттер начинает работать после кратковременного нагрева, при котором имеющийся на его поверхности кислород продиффундирует вглубь, очистив место для новых атомов, прилетающих из объема прибора. Если же геттер распыляемый, то его тоже надо нагреть, но с другой целью. При нагреве в геттерной смеси из нее выделяется барий, который напыляется на стекло. Вот эта пленка бария – «геттерное зеркало» и есть та деталь, которой не было при сборке лампы.

Наличие специального геттера, вообще говоря, не обязательно. Если лампа очень хорошо обезгажена и если, вдобавок, она содержит детали из титана (которые сами работают как геттер), то можно обойтись. И обходятся – в лампах типа «нувистор» геттера как отдельной детали нет.

Но нам еще осталась морока с высоким напряжением... Когда на лампу начнут подавать все более и более высокое напряжение, то будут происходить пробои – броски тока с последующим (если цепь не отключить) расплавлением электродов лампы. Посмотрим, почему и как это происходит.

Если на поверхности электрода есть пылинка или слабо держащийся кусочек материала, он отрывается, летит к противоположному электроду (кусочек заряжен, и поле его ускоряет), врезается в электрод, как метеор, испаряется и заполняет объем прибора паром. Если на электроде есть острие, на нем напряженность поля оказывается очень велика, начинается автоэлектронная (полевая) эмиссия – вырывание электронов из металла электрическим полем, пучок электронов разогревает электрод, а ток, протекающий по острию, разогревает острие; где нагрев – там испарение, объем прибора заполняется паром. Что так, что этак, но в парах материала электрода и происходит обычный пробой в газе. Собственно, высуньте голову в окно в подходящий момент – это она и сверкнула. Только в приборе маленькая, а между тучами – большая.

Теперь лампу надо отпаять от вакуумного поста, отделить от насоса. Если баллон стеклянный и откачка производилась по стеклянной трубке (штенгелю), ее нагревают. Атмосферное давление сжимает размягчившееся стекло, и трубка запаивается (точнее было бы сказать – заваривается). После отпайки ее надо прогреть для уменьшения напряжений в стекле. В лабораториях, когда отпайка ламп производилась вручную, она считалась искусством, которое высоко ценилось (ценой в те времена было уважение коллег). Неумелая отпайка могла погубить недельную работу.

Если лампа откачивалась через металлический штенгель, его откусывают. К счастью, не зубами, а специальными клещами, создающими в зоне «куса» столь высокие механические напряжения, что металл течет и происходит холодная сварка. Отпайка прибора от насоса и активирование катода могут производиться и в иной последовательности. В частности, при обработке маломощных приборов активирование производят после отпайки; выделяющиеся при этом газы откачивает геттер.

Затем к лампе приделывают цоколь, пишут на ней, как она называется, испытывают, измеряют ее параметры, упаковывают, везут – слышите: тук-тук, тук-тук, тук-тук – это стучат колеса. Следующий раз она увидит свет дня уже тогда, когда упаковку вскроют, а ее вставят в устройство – и начнется ее трудовая биография. Те, кто делал электронную лампу, надеялись, что эта биография будет долгой – и лампа постарается не обмануть их ожидания.

Чем она будет заниматься? Как уже говорилось, за лампами осталось несколько областей применения. Прежде всего – приборы на большие напряжения и токи, мощные приборы. Конечно, соединяя полупроводниковые приборы последовательно и параллельно, можно сделать схему, имеющую надлежащие параметры. Но это окажется уже не маленький изящный прибор, а большая, дорогая и, может оказаться, менее надежная схема. Выбор решения осложнен тем, что очень мощных приборов обычно требуется немного, а разработка такого электронного прибора – мероприятие очень дорогое. В результате оказывается дешевле сделать более дорогую схему, чем разработать более дешевый прибор. И на Западе, и в СССР были разработаны электронные лампы с напряжениями в сотни киловольт и токами в сотни ампер. Но широкого распространения они не получили.

Другая область применения, в которой положение ламп, по-видимому, более надежно – это генерация электромагнитных волн сверхвысоких частот: радиолокация, ускорительная техника и микроволновые печи. И есть, по крайней мере, еще две ситуации, в которых лампа явно выигрывает у транзистора – высокие температуры и мощная радиация. Но в технике редко бывает, что нет альтернативных решений. Для защиты от высоких температур существуют холодильные установки, для защиты от излучения – экраны. Какое решение будет выбрано, зависит от конкретной ситуации: требуемых параметров изделия, сроков и стоимости разработки. Но в любом случае грамотный выбор решения требует не только серьезного знания той или иной области техники, но и – что бывает, к сожалению, нечасто – широкого технического кругозора.