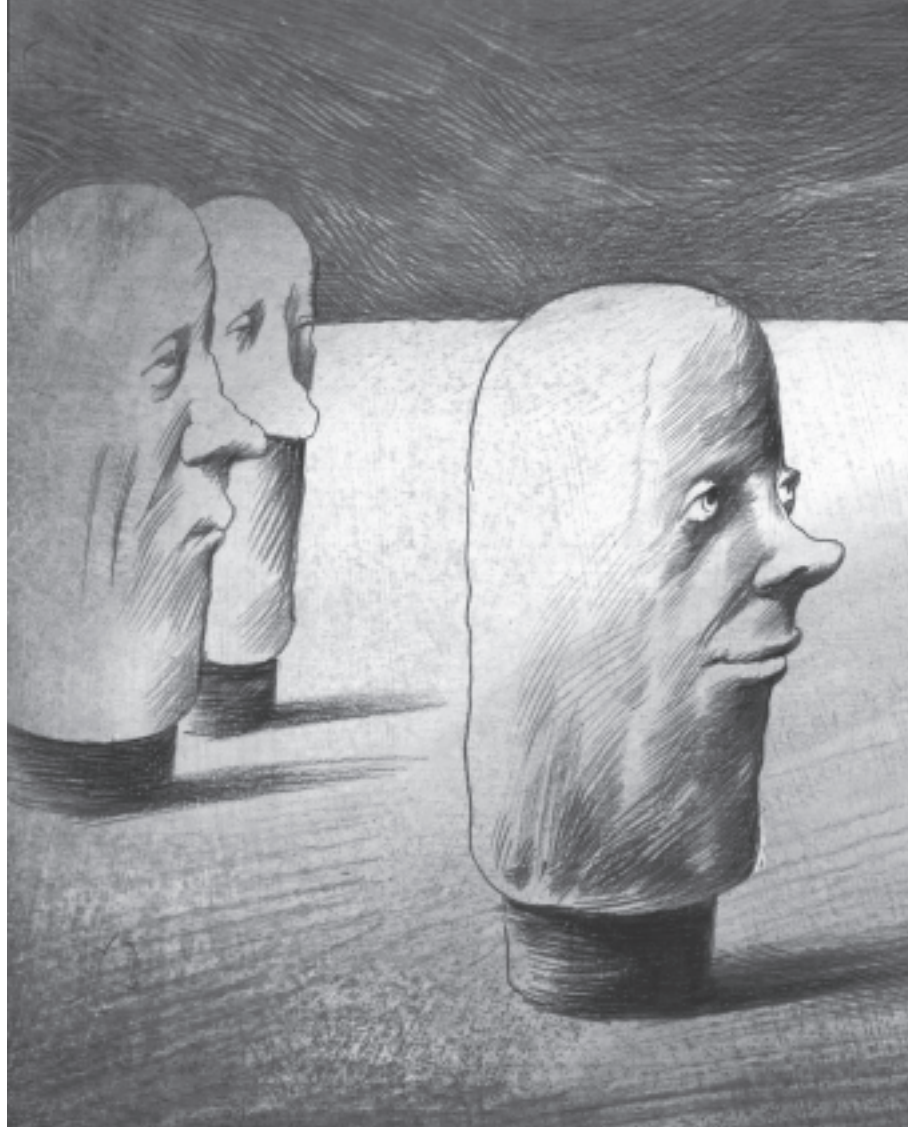


Кандидат  
физико-математических  
наук  
**Л.А.Ашкинази**

# Электронные лампы: заря второй эпохи



Электронно-вакуумные приборы (ЭВП) возникли в начале прошлого века и до пришествия приборов полупроводниковых обеспечивали всю электронику, связь и вычислительную технику. Когда появились полупроводниковые приборы, многим показалось, что эпоха ЭВП кончается. Но не тут-то было: полупроводникам свойственны принципиальные ограничения, прежде всего по мощности, затем по рабочим частотам, а также по некоторым другим параметрам, например по термо- и радиационной стойкости. Причем если приборы, способные работать при высоких температурах и высоких уровнях радиации, — это все-таки не магистральный путь развития, то высокие частоты и мощности — именно что «направление главного удара». Ибо способность передавать много информации — это высокие частоты, а способность передавать далеко — это высокие мощности.

Поэтому между ЭВП и полупроводниками сложилось некоторое равновесие или разделение сфер влияния, причем граница с десятилетиями медленно, но смещалась — полупроводники

совершенствовались, появлялись новые материалы, улучшалась технология, возникали новые конструкции. Лампы, ясное дело, тоже не стояли на месте и тоже продвигались в сторону больших частот и мощностей. Правда, в отличие от транзисторов они осваивали целину.

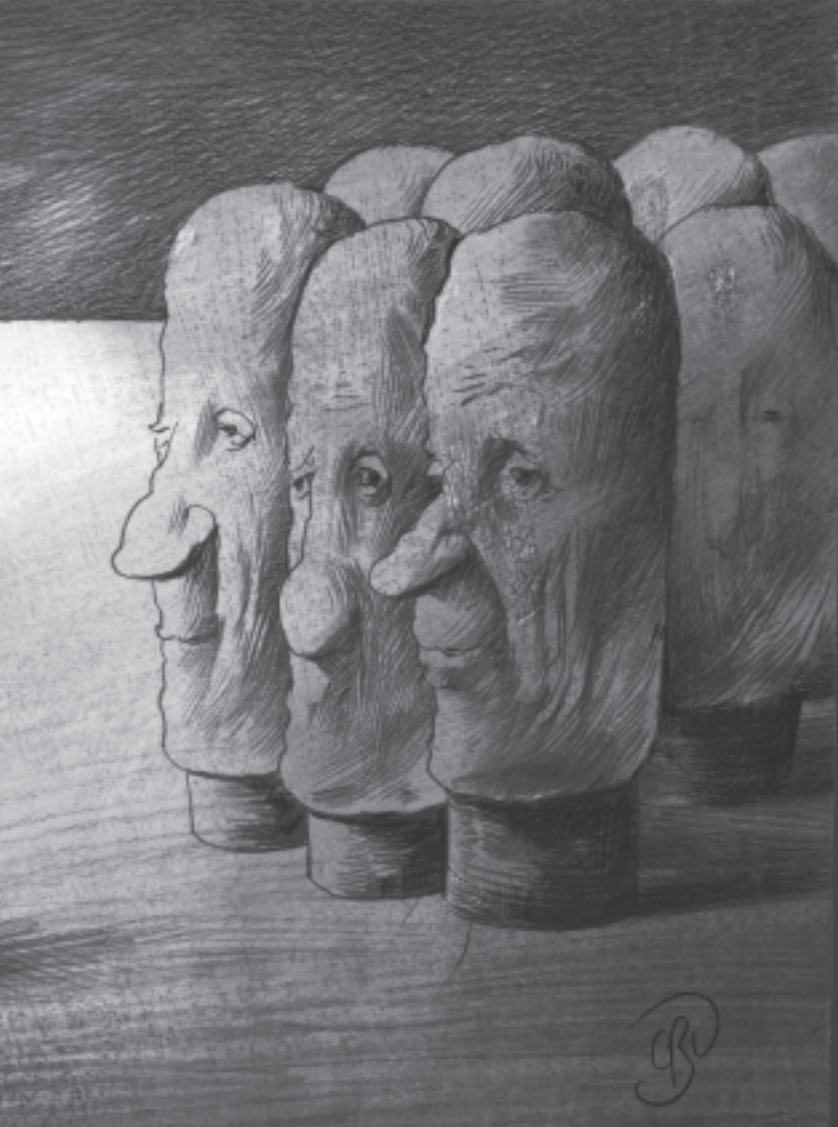
Разумеется, попутно имела место подковерная борьба: полупроводники пытались освоить высокотемпературный диапазон, лампы пытались уменьшить габариты. Но в последней трети прошлого века плавная эволюция кончилась и на наших — физиков и разработчиков приборов — глазах началась революция. Точнее, даже две.

Во-первых, начали один за другим появляться ЭВП, основанные на новых принципах и способные работать на более высоких частотах и/или с более высокими мощностями, чем известные ранее. Соответственно эти лампы не посягали на транзисторную вотчину, они позволяли радистам и схемотехникам проникнуть в совсем новые области.

Во-вторых, начали появляться ЭВП, основанные хоть и на старых прин-

ципах, зато на новой для них полупроводниковой технологии. И эти лампы оказались при сохранении термо- и радиационной стойкости сравнимыми по размерам с полупроводниковыми приборами. Причем не с транзисторами 70–80-х годов, с которыми лампы успешно конкурировали уже тогда, а с современными приборами, реализованными на чипах и имеющими размеры в десятки микрон.

Поскольку, как говорил К.Прутков, нельзя в одной статье объять необъятное, сейчас мы поговорим о первом направлении. Причем расскажем лишь об одном типе приборов. Тип этот выбран нами для рассказа не случайно: во-первых, он позволяет генерировать максимальные на сегодня мощности сигнала, во-вторых, его изучение позволит вам увидеть, как в простейшей ситуации возникает весьма сложное поведение. Конечно, это поведение выглядит сложным лишь по техническим меркам, живая клетка ведет себя сложнее. Но она-то состоит из множества соединений и структур,



Художник С. Дергачев

а у нас будут лишь электроны и ионы. И две железки...

### Когда не вмещается

Представим себе, что мы взяли брандспойт и направили мощную струю воды в прочную железную бочку — вдоль оси. Что произойдет? Вода, отразившись от дна, вылетит обратно. А вот электроны могут вылететь обратно, отразившись, можно сказать, от себя самих. Ничего странного в этом нет — у электронов есть заряд, а одноименные заряды отталкиваются. Странно другое — при этом возникают колебания, и очень даже хитрые.

Представим себе не бочку и брандспойт, а пространство между двумя электродами, причем с левого стартуют — с некоторыми начальными скоростями — электроны. Электроды находятся под одинаковыми потенциалами. Имея начальную скорость, электроны летят себе по инерции и достигают правого электрода. Однако когда электронов эмитируется много, в зазоре появляется

заметный пространственный заряд, создающий электрическое поле. Это поле тормозит летящие от левого катода электроны, но, если энергия их достаточна, они преодолевают это поле и достигают правого электрода. При увеличении поля мы попадаем в ситуацию, когда электроны не могут его преодолеть, останавливаются и — летят обратно. В зазоре образуется так называемый виртуальный катод: электроны летят от него, как будто это он их эмиттировал. Поскольку все больше электронов останавливаются, не долетев до виртуального катода, максимум электронной плотности начинает смещаться влево. Как будто бульдозер ползет справа налево, сгребая снег: куча электронов делается все выше и все ближе к катоду — левому электроду. В итоге она рушится на него — и процесс начинается сначала. А это и есть колебания, а этот прибор называется виркатор. На сегодня это самый мощный импульсный генератор СВЧ.

Но генератор весьма необычный. Начнем с очевидных плюсов. Первое

— фантастическая простота конструкции. Второе — отсутствие магнитного поля, которое в обычных ЭВП некоторых типов нужно всегда (магнетрон), а в некоторых (клистрон и лампа бегущей волны) — довольно часто, и тем чаще, чем о более коротких волнах заходит речь (тонкий электронный пучок трудно сфокусировать и протаскать по длинному пролетному каналу, не применяя магнитного поля). Третье — низкие требования к качеству пучка (его пространственной однородности и ламинарности). Что же касается минусов, то ситуация требует философского предисловия.

Предположим, что мы выпускаем некоторое изделие — не важно, СВЧ-прибор, автомобиль или шариковую ручку. К нам приходит изобретатель и говорит: вот новая модель, у нее все параметры как у старой, но вот этот параметр — лучше. Это самая простая и понятная ситуация. И мы говорим: отлично, будем делать новую модель. Вот случай более сложный — новая модель, у которой что-то немного хуже, а что-то лучше. Тут нужен анализ рынка, чтобы понять, захочет ли потребитель брать, скажем, автомобиль, который стоит на столько-то дороже, но потребляет на столько-то меньше бензина. Это, кстати, весьма нынче распространенная ситуация, ибо на Западе внедрение «гибридных» автомобилей тормозится именно стартовой ценой. Но вот третья ситуация — нам приносят нечто абсолютно новое. Например, на дворе середина прошлого века, мы все пишем перьевыми ручками, а нам приносят шариковую. Она тоже пишет, то есть выполняет вроде бы ту же функцию, но пишет иначе, требует совершенно нового производства и вообще воспринимается как нечто странное. Даже гениальный психолог не угадает, что «это» из забавной игрушки (на Западе) и предмета престижного потребления (в СССР) через четверть века превратится в товар, одни виды коего будут столь же дешевы и повседневны, как бумажный носовой платок, а



другие останутся предметами престижного потребления, символами высокого положения и стоить будут где дневную, а где и месячную зарплату.

Но ситуация может быть и еще сложнее. На дворе середина века, а мне приносят широкий фломастер (маркер). Писать им если и можно, то неудобно. Рисовать? Серьезные взрослые художники — народ консервативный, они тысячу лет технику не меняют. Забавную вещь сделали вы, сэр, вежливо говорим мы, но для чего бы ее применить, не понимаем. А что через полвека эта вещь будет лежать на всех прилавках — этого мы пока не знаем и догадаться не можем.

Теперь опишем эту же ситуацию на инженерном языке, на языке параметров и сравнения их значений. Два близких изделия сравнить легко — например, две перьевые или две шариковые ручки (вес, размер, ширина линии, нажим, длина линии). Перьевую и шариковую сравнить уже сложнее: при внешне одинаковых функциях это «разные вещи» — мы это интуитивно ощущаем, хотя и не можем описать одним параметром. А вот обычную перьевую ручку и маркер сравнить по параметрам затруднительно. Разве что по общетехническим — размер, вес, стоимость, прочность... Слишком разные вещи. И у них разные области применения.

Так вот, виркатор — это другая вещь. Он генерирует сигнал не одной частоты, как другие электронные приборы, а сразу нескольких, причем спектр сигнала сильно зависит от режима работы. И поэтому трудно сказать, чем он лучше или хуже — кроме общетехнических параметров.

Но этим дело далеко не кончается. В объеме прибора, кроме электронов, обычно есть и ионы, частично компенсирующие пространственный заряд. Казалось бы, раз влияние пространственного заряда электронов ослаблено, то вся картина просто сдвинется в область больших токов. Отнюдь нет! Ситуация станет намного сложнее. Если средний заряд ионов равен среднему заряду электронов, то в зависимости от тока прибор может работать уже не в двух, а в трех режимах, генерируя сигналы с разным спектром, а если начать менять и соотношение средних зарядов, то в восьми.

Эта ситуация иллюстрирует одну очень важную — существенно более важную, чем все ЭВП СВЧ, вместе взятые, — вещь. Реальная структура, причем совсем простая (два плоских параллельных электрода, поток электронов и ионы, частично компенси-

рующие заряд электронов), может вести себя очень сложно, причем не просто сложно, а непредсказуемо сложно. Причем кроме фиксированных частот, прибор генерирует еще и шум, а это уже хаотическое поведение. И, даже зная спектр, нельзя предсказать, какой будет напряженность поля через секунду.

Вот простой пример. Рассмотрим одну конкретную аудиторию в моем родном вузе, МИЭМе. Будем записывать раз в минуту (или раз в секунду) количество студентов в ней. Через неделю мы получим примерно такую таблицу: 0 человек — 52% случаев, 1 человек — 1,5% случаев, 2 — 4,2%, 3 — 2,0%, 4 — 2,6%... 20 — 7,8%, 21 — 8,1%, 22 — 5,6%, 23 — 4,2%... 38 — 3%, 39 — 5,2%, 40 — 4,1%, 41 — 2,0%... Это и называется спектр. Ноль человек — это ночные замеры. Пик в области 21 человека — это семинарские занятия, а пик в области 39 человек — это лекция для двух моих групп. Мы описали явление, проведя усреднение по времени, и даже смогли понять, что происходит! Спектр устойчив — в следующую неделю он повторится. Но предсказать количество студентов на следующем семинаре мы не сможем — скорее всего, будет между 20 и 23, но точнее сказать трудно. Так же и в виркаторе нельзя предсказать значение напряженности поля в какой-то определенный момент.

Как может быть устроен генератор на виртуальном катоде? Вариантов конструкций много, вот два примера: на рис. 1 — так называемый отражательный триод, на рис. 2 — виркатор на пролетном токе. Стрелки на обоих рисунках — траектории электронов



1



2

До сих пор мы рассматривали виркаторы, так сказать, в чистом виде. Однако на основе виркатора может быть сделан и гибридный прибор, комбинация виркатора с другим СВЧ-прибором. Например, если та часть электронного пучка, которая проходит сквозь область виртуального катода, попадает в так называемую лампу обратной волны, то навстречу пучку начинает распространяться электромагнитная волна, которая доходит до катода виркатора и начинает модулировать пучок еще до попадания в область виртуального катода.

Ужас ситуации состоит в том, что любой электронный прибор работает с потоком электронов и поэтому почти из любых двух приборов можно сделать гибрид. Биологам такое и не снилось! Конечно, не все гибриды оказываются жизнеспособными, и еще реже они дают жизнеспособное потомство, то есть начинают развиваться. Через десять лет станет ясно, какие гибриды выживут, какие лампы действительно составят вторую эпоху. Но пока что редко месяц проходит без сообщения о предложении нового прибора.

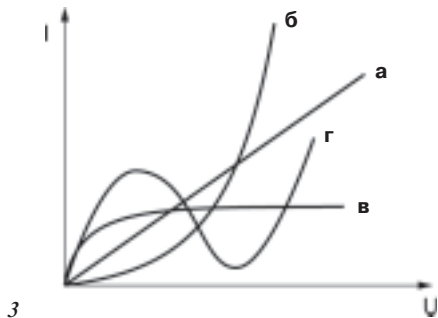
## Как нарисовать не-функцию

Описание работы новых ЭВП, как вы уже поняли, вещь непростая. Непредсказуемую вещь в принципе невозможно описать точно: ведь описание (физическое, в отличие от исторического) — всегда предсказание. Но можно описать какие-то параметры генерируемого сигнала, например средние значения или распределения мощности по частотам (спектр). Поведение же самого устройства описывают связью параметров: допустим, например, тока, протекающего через лампу, и напряжения на ней. В частности, эта связь важна для расчета источника питания. Однако и здесь нас ждут сюрпризы.

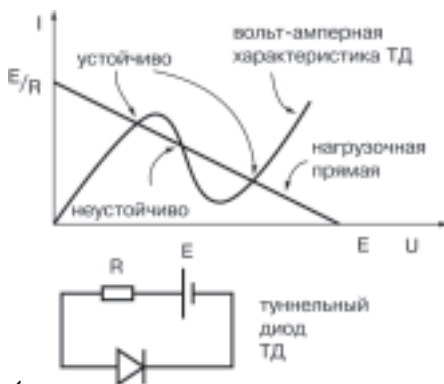
Начнем с простейшего варианта. Пусть на сопротивление подается



изменяемое напряжение и определяемая зависимость тока от этого напряжения (рис. 3). Зависимость будет

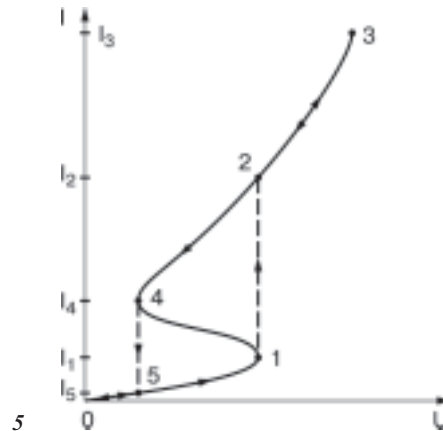


3  
прямой линией  $I = U/R$  (закон Ома), если  $R$  постоянно (а). Эффектами нагрева сопротивления током, сжатия тока своим магнитным полем (пинч) или поверхностным (скин-эффект) пренебрегаем. Чуть более сложный случай — нелинейное сопротивление, например полупроводниковый диод (б) или стабилитрон (в). Еще более сложный случай — немонотонная зависимость  $I$  от  $U$ , свойственная туннельному диоду (в). Здесь (рис 4), в отличие от первых трех



4  
случаев, в простейших схемах из батарейки, сопротивления и диода возможны два устойчивых состояния.

Но это все же случаи, когда зависимость тока от напряжения однозначна. У тиристора это уже не так (рис. 5). При увеличении поданного на него напряжения от 0 до  $U_{\max}$ , а потом уменьшения до 0 рабочая точка перемещается по траектории 0–1–2–3–2–4–5–0, а ток, соответ-



5  
ственно, 0–1–2–3–2–4–5–0, причем от  $I_1$  к  $I_2$  и от  $I_4$  к  $I_5$  ток изменяется скачком.

Похожая ситуация реализуется и в вакуумном зазоре, в который вводится ток. На рис. 6 изображена связь тока пучка, минимального потенциала в зазоре и устойчивости режима. При увеличении тока от 0 до макси-



6  
мального значения и последующем уменьшении тока до 0 рабочая точка перемещается по траектории 0–5–1–2–3–2–4–5–0, при этом на участках 0–5–1 и 5–3–4 положение точки устойчиво, на участке 1–4 оно неустойчиво, а генерация происходит на участке 4–2–3.

## Почему прошлое не похоже на настоящее

По многим причинам. А по многим другим — похоже. История — если мы не просто перечисляем даты и кто кого

отравил, а хотим понять, почему все шло так или этак, — сложная наука. Но одну вещь надо иметь в виду всегда: прошлое не похоже на настоящее потому, что мы видим его не непосредственно, как настоящее, а только как след, как отражение. Отражение в вещах, документах, в мифах, в умах и словах людей, причем всегда в той или иной мере искаженное. Причин для искажений много, но, даже если не вдаваться в их анализ, видно, что одни из этих причин не связаны с психологией людей, а другие связаны. И это весьма осложняет анализ, ибо приходится учитывать психологию, думать, что и почему люди не хотят вспоминать, что им вспоминать стыдно или страшно.

Что касается истории ЭВП СВЧ, то тут ситуация сравнительно проста: мы видим прошлое несколько упрощенным, ибо до сегодняшнего дня дожили только хорошие, эффективные варианты приборов. Да и то не все, поскольку некоторые уступили место полупроводниковым приборам. А на самом деле вариантов технических решений было намного больше. Правда, при большом желании можно их раскопать и изучить — существуют библиотеки патентов, и в них отражены, наверное, почти все технические решения.

Сегодняшняя ситуация с ЭВП СВЧ, которую мы условно называем «второй эпохой» (привет Толкиену), выглядит намного более разнообразной. Существуют десятки вариантов каждого прибора! И каждый год появляются новые. И все — со своими названиями... Ход развития техники делает свое дело: от всего этого разнотравья останутся четыре-пять основных типов (так сказать, мейнстрим), которые и будут изучаться студентами через пятнадцать лет. А остальное станет достоянием истории техники.

Внеся свой необходимый вклад в общий ход развития, в конкуренцию и кооперацию, без которых нет и не будет прогресса.

