

# Длинная дорога от ВХОДА К ВЫХОДУ

Л. АШКИНАЗИ

## Наперегонки с лифтом

Вполне 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 поднимающийся по лестнице, мог бы заглядывать в кабину. Или, скажем, чуть-чуть от нее отставать...

Конечно, восстановить, как именно было сделано изобретение, трудно. Можно иногда выявить ход рассуждений изобретателя, но как уловить движение ощущений, предчувствий, интуиции? Технический детектив в чем-то, по-видимому, сильно отличается от просто детектива, ибо хороших детективов много, а хороших технических детективов почти нет.

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 уравниваются. Не обвивайся лестница вокруг шахты лифта, ничего бы не получилось – человек движется по прямой лестнице быстрее лифта. А если она обвивается, длина ее увеличивается.

Аналогично, можно подобрать угол

наклона витков спирали («лестницы») и скорость электронов («лифта») так, чтобы электромагнитная волна, бегущая по спирали, имела почти ту же скорость перемещения вдоль оси спирали, что и электроны.

Чем выше частота, тем ближе к поверхности металла сосредотачивается ток. Это явление называется скин-эффектом (skin по-английски – кожа). На частотах СВЧ-диапазона толщина скин-слоя составляет единицы микрон. Так же, прижимаясь к проводу, распространяется вдоль него и электромагнитная волна, отдаляясь от поверхности не далее чем на расстояние порядка длины волны. Однако бежит эта волна «по и около» проводника быстро, ее скорость сравнима со скоростью света. И хотя разогнать до такой скорости электроны можно, для этого нужны напряжения в сотни киловольт, а это неудобно. Но ничего, мы уже знаем, как «замедлить» волну, – надо заставить ее бегать по спирали (по «лестнице»).

Итак, 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.

Длиннохвостыми интегралами, взволнованно повествующими о судьбе электронов и волн в лампе бегущей волны, заполнены тома. И в этом смысле – в смысле интегралов – первым изобретателям было легче. Сейчас техника ушла в плане насыщенности физикой так далеко, а физика ушла так далеко в плане насыщенности математикой, что среди людей выделяются два подвида – люди знающие и люди делающие. Единственный путь борьбы с этой небиологической эволюцией это знать математику – язык физики и знать физику – язык техники. Тогда вы будете делать, зная.

Реальная ситуация в лампе бегущей волны, конечно, сложнее. В спирали, а точнее в «спиральной замедляющей системе», могут распространяться не одна, а несколько волн. Не все они двигаются чуть медленнее пучка, не все они усиливаются... Но об этом уже «на пальцах» рассказать нельзя. А о том, о чем можно рассказать просто, удобнее рассказывать, опираясь на то, что мы уже знаем.

## Танцуем от печки, т.е. от клистрона

В конце концов, клистрон был изобретен раньше, да и «идеология» его проще. Так вот, 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, по мере преобразования модуляции, волна начинает усиливаться, отбирая энергию от собирающихся в сгустки электронов (рис.1). Собираются электроны в те

*Эта статья является органичным продолжением двух предыдущих статей того же автора: «113 лет ошибке Эдисона» («Квант» №5 за 1996 г.) и «Электронный прибор» («Квант» №4 за 1997 г.).*

*Серия статей Л.Ашкинази посвящена современной вакуумной электронике, ее физическим основаниям и историческим истокам.*

*Разумеется, каждую статью можно читать и независимо, но для более полного и глубокого восприятия и получения цельной картины мы рекомендуем заинтересованному читателю изучать эти статьи в указанной последовательности.*

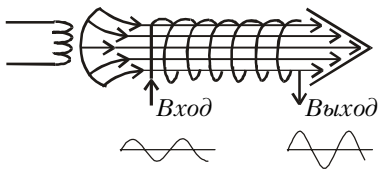


Рис. 1. Лампа бегущей волны

места волны, где поле меняет знак – сзади оно ускоряющее, спереди тормозящее, – как люди перед входом в метро в час пик.

Что объединяет и что отличает лампу бегущей волны (ЛБВ) и клистрон? Первое и важнейшее отличие: у клистрона – резонаторы, у ЛБВ – спираль, нерезонансная замедляющая система. Поэтому клистрон – прибор узкополосный, а ЛБВ – широкополосный. Это свойство важно для систем передачи информации. Правда, замедляющая система может быть не только спиральная. Если мы поставим вдоль электронного пучка просто резонаторы и надлежащим образом возбудим в них колебания, то такая ЛБВ тоже будет работать. Надлежащим образом – это так, чтобы разность фаз между колебаниями в соседних резонаторах была такой, чтобы подлетающие электроны встречали волну в нужной фазе. Такие замедляющие системы называются системами со связанными резонаторами. Связь – это как раз то, что нужно для организации «нужных фаз».

(Ясно, что можно взять 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. Этот прибор сочетает (в некоторой мере) сильные стороны ЛБВ и клистрона и называется твистроном.)

Мы можем провести границу между замедляющими системами на связанных резонаторах и многорезонаторными клистрономы именно здесь: в клистроне резонаторы связаны только электронным пучком, в лампах бегущей волны – еще и электромагнитной волной. Эта связь имеет важное следствие – в ЛБВ электромагнитная волна может бегать и туда и обратно. По пути «туда» ее усиливает электронный поток, а на обратном пути она только затухает,

и если усиление окажется больше затухания, лампа возбуждается, превратится в генератор. Для защиты от возбуждения в ЛБВ вводится так называемая поглощающая вставка – деталь из вещества, сильно поглощающего электромагнитное излучение. Она устанавливается в середине ЛБВ и сильно ослабляет электромагнитную волну (как бегущую «туда», так и бегущую «обратно»). Усиление при этом, конечно, уменьшается, но – как это ни странно – не очень сильно, так как через участок с поглощающей вставкой энергию пронесет электронный пучок. Зато возможность возбуждения исчезает – ведь обратно электронный пучок энергию не переносит. Конечно, каждая из половинок ЛБВ – это тоже ЛБВ, и она тоже может возбуждаться... Одним словом, реальная ситуация всегда будет сложнее, сколько ни рассказывай.

Из чего делать поглощающую вставку? В диэлектрик электромагнитная волна проникает, но в металл она почти не проникает. Так что поглощающие вставки должны делаться из «плохого проводника» – чего-то такого, во что электромагнитная волна проникает и в чем она поглощается. Часто вставки делают из углерода, точнее – из тонких углеродных пленок, нанесенных на диэлектрик.

## Архитектура лампы бегущей волны

Мы начали с аналогии между лестницей и спиральной замедляющей системой. Раньше всех в ЛБВ была использована в качестве замедляющей системы спираль. Конструктивно простая, технологичная и позволяющая создавать широкополосные ЛБВ, она стала символом ЛБВ. Но время шло, требования к мощности и рабочей частоте ЛБВ увеличивались. А спираль трудно охлаждать – она закрепляется на диэлектрических опорах, которые проводят тепло плохо. Далее, при длине волны меньше 5 мм сделать спираль становится трудно. Для работы в области больших мощностей и малых длин волн применяются другие замедляющие системы. На рисунке 2 показаны несколько таких систем, состоящих из отдельных резонаторов, связанных отверстиями, через которые электромагнитное поле проникает из одного в другой.

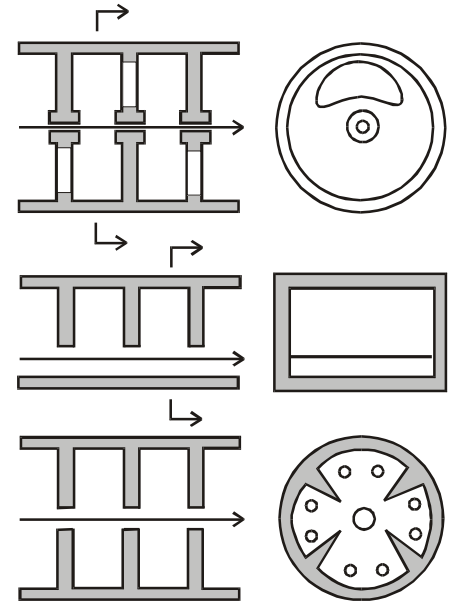


Рис. 2. Замедляющие системы. Горизонтальная стрелка – электронный пучок. Нижняя замедляющая система имеет поэтическое название «клеверный лист»

Энергия, подводимая к ЛБВ, превращается в кинетическую энергию электронов. И вот она начала передаваться электромагнитной волне. Энергия электронов уменьшается, летят они все медленнее, и, наконец, скорости их уравниваются со скоростью волны. Передача энергии прекращается. Как сделать, чтобы то, что у электронов осталось, было поменьше? Как выкачать из электронов побольше? Один из путей – сделать так, чтобы скорость волны уменьшалась при ее движении вдоль ЛБВ. Например, можно изготовить спираль с переменным шагом. Таким способом можно уменьшить энергию, остающуюся у электронов. Ну, а с ней что делать? Ведь вся энергия, с которой электроны долетают до коллектора, во-первых, нагревает его, порождая свой круг проблем (охлаждение, перегрев и т.д.), а во-вторых, теряется зря.

Решение этой задачи – так называемая рекуперация. На коллектор подается потенциал ниже, чем у замедляющей системы, и поэтому электроны, прежде чем поглотиться металлом коллектора, подтормаживаются. Расход энергии на питание лампы уменьшается. Рост КПД при использовании рекуперации порядка 10%. Это немало. Бывает, что удастся получить и больше, в частности, если применен многоступенчатый коллек-

тор. В нем более быстрые электроны добираются до более глубоких участков, находящихся под более низким потенциалом. Каждый электрон тормозится в таком коллекторе почти до полной остановки.

### Одна волна сменить спешит дружку

А куда спешит волна? В ЛБВ, например, она могла спешить в обе стороны. Только в одну сторону она усиливалась, подкачиваясь от пучка, а в другую бежала сама по себе, понемногу затухая. За счет этой обратной, отраженной от конца замедляющей системы, волны ЛБВ возбуждалась, поэтому обратную волну подавляли поглощающей вставкой.

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, в обратную — волной. Возникать колебания будут от случайных флуктуаций, а поддерживаться — за счет возбуждения колебаний в электронном пучке усиленной волной (в начале пучка) и за счет возбуждения волны тормозящимся при этом пучком (в конце пучка). При малом токе пучка колебания возникать не будут, и такой прибор можно будет использовать как усилитель, а в генераторном режиме его можно будет использовать, если синхронизовать маломощным высокостабильным генератором.

Все это очень увлекательно. Непонятно только, как сделать, чтобы электроны отдавали энергию волне, спешащей навстречу им. Нам кажется, и не без причин, что это невозможно. Зная, как работает ЛБВ, мы прямо видим, как летят слева направо волна и электронный сгусток (рис.3), как сгусток чуть-чуть обгоняет волну, попадая в область тормозящего поля, и начинает тормозиться, отдавая свою энергию волне (боль-

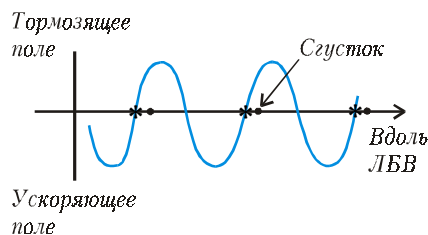


Рис. 3. Волна и электронные сгустки

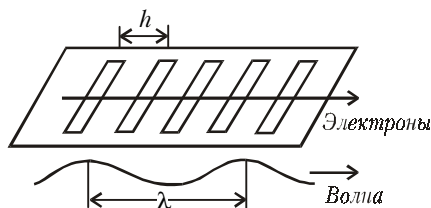


Рис. 4. Электроны заглядывают в окна

ше некому). Если же волна бежит навстречу электронам, электроны не будут отдавать ей энергию потому, что они не будут долго лететь рядом с нужным для отдачи энергии местом (изображенном звездочкой на рисунке 3). А обязательно ли лететь рядом с этим местом долго? Собственно, нет...

Представьте себе, что электронный пучок летит с одной стороны от металлического экрана с окнами, а волна бежит с другой — рисунок 4. 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.

Обозначим скорость электронов  $v$ , скорость волны  $w$ , шаг окон  $h$ , длину волны  $\lambda$ . Тогда за время  $h/v$  электрон может пробежать не одну длину волны  $\lambda$ , а  $n\lambda + h$  длин волн, т.е. скорость волны может быть не  $h/w$ , а  $(n\lambda + h)/w$ . Итак, условие работоспособности:  $(n\lambda + h)/w = h/v$ . При этом 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.

Теперь сделаем последний шаг в наших рассуждениях — скажем, что  $n$  может быть и отрицательным. Тогда электрон будет взаимодействовать в следующем окне не с «тем местом» волны, с которым взаимодействовал в прошлом окне, и не с «местом», лежащим сзади него (как при  $n = 1$ ), а с «местом», лежащим впереди него. Волна будет бежать навстречу и ... усиливаться!

Помните, как в кино вертится назад винт самолета или колесо у телеги? Попробуйте ответить на вопрос:

как видимое направление вращения зависит от истинной угловой скорости колеса при частоте кадров 24 кадра в секунду? Вот нечто подобное и «видит» электрон, заглядывая в окошки. Только видит он не 24 кадра в секунду, а существенно больше. Вот такое кино...

### Алмаз не для прикрас

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, то за третье, пятое и девяносто девятое...

Заказчики, как правило, желают улучшения одних параметров, но вовсе не согласны допустить ухудшения других. Посмотрим, к чему это приводит в технике электровакуумных приборов.

При определенной длине волны резонаторы в клистроне и спираль в ЛБВ имеют определенные размеры. Какая-то доля электронного пучка перехватывается сеткой в зазоре резонатора или спиралью. Пучок перехватывается — мощность выделяется. Раз размеры определенные, то и плотность мощности (измеряется обычно в Вт/см<sup>2</sup>) определенная. Мощность выделяется — деталь нагревается. Плотность мощности определенная — температура определенная. 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. Чем короче длина волны и больше мощность, тем быстрее испаряется и плавится деталь.

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 сильнее он теряет ламинарность. Такой пучок не удастся сильно затормозить (рекуперировать) на коллекторе, КПД прибора падает. Вот это и есть «одно за другое»...

Не будем разматывать эти клубки до девяносто девятого, но поверьте — эта цифра не преувеличена. В лампе бегущей волны все связано одно с другим. Жизнь вообще так устроена.