

# Поля скрещиваются

Л. АШКИНАЗИ

## Кушать подано!

Прибор, называемый магнетроном, был изобретен Н.Ф.Алексеевым и Д.Е.Маляровым в 1939 году. Разумеется, у них были предшественни-

ки, придумавшие нечто близкое и вместе с тем достаточно далекое, чтобы считать магнетрон новым прибором. Своих предшественников имеет и любая идея; важнее, имеет ли она своих потомков.

Каждая вещь чем-то интересна, и чем-то интересен каждый ЭВП СВЧ – электронно-вакуумный прибор сверхвысокой частоты. И если некоторые ЛБВ – лампы бегущей волны – интересны тем, что изготавливаются лишь в нескольких десятках экземпляров (ЛБВ для спутников связи), то магнетрон интересен тем, что это первый действительно массовый СВЧ-прибор. Ибо те магнетроны, которые используются в СВЧ-печах, выпускаются в Японии более

*Эта статья является органичным продолжением трех предыдущих статей того же автора: «113 лет ошибке Эдисона» («Квант» №5 за 1996 г.), «Электронный прибор» («Квант» №4 за 1997 г.) и «Длинная дорога от входа к выходу» («Квант» №1 за 1999 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.*



чем миллионными «тиражами». Традиционная японская кухня предпочитает варить, парить и тушить, а не жарить. Румяная корочка (содержащая, между прочим, канцерогенные продукты термоллиза 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. А в печи, предназначенные для Запада (для японцев это – Восток), для «подрумянивания» специально встраивают инфракрасные лампы.

Возможно, магнетрон – это и последний массовый ЭВП СВЧ. Дело в том, что такие приборы применяются преимущественно в области высоких частот и мощностей, а там много одинаковых приборов не надо. Когда данная область частот и мощностей осваивается, то лампы успевают продвинуться дальше, а к этой области уже подбираются полупроводниковые приборы. Лампы – десант электроники, штучная работа. Полупроводники идут следом и толпой.

Пора, наконец, сказать, что такое магнетрон. Это – исторически первый представитель ЭВП СВЧ со «скрещенными полями». А именно – с магнитным и электрическим полями, перпендикулярными друг другу. Как видите, определение простое. Сложны следствия из него.

### Электрон в скрещенных полях

Заметим, прежде всего, что магнитное поле в ЭВП СВЧ нам уже встречалось. Во многих лампах бегущей волны и клистронах оно было направлено вдоль электронного пучка и удерживало электроны от разбегания в стороны. Действительно – пока скорость электрона направлена параллельно полю, на электрон со стороны поля силы не действуют. Но как только боковая скорость возникает, возникает и сила Лоренца, перпендикулярная полю и скорости. Электроны начинают двигаться по спиралям, «навиваясь» на линии магнитного поля. А что произойдет, если электрон начнет двигаться в скрещенных – магнитном и электрическом – полях, т.е. в условиях, когда  $\vec{V} \perp \vec{E}$ ?

Пусть электрон вылетает из катода с очень маленькой (практически

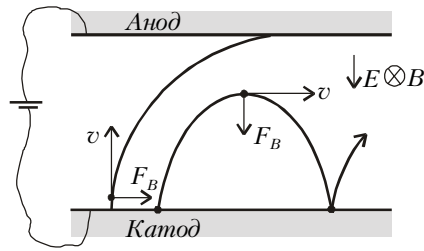


Рис.1. Движение электрона в скрещенных полях, когда электроды плоские

нулевой) скоростью и начинает двигаться к аноду (рис.1). Магнитное поле перпендикулярно плоскости рисунка. Пока электрон пролетел мало и скорость его  $v$  мала (сила, действующая на электрон со стороны электрического поля постоянна и равна  $eE$ , где  $e$  – заряд электрона, а  $E$  – напряженность поля), сила  $F_B$ , действующая со стороны магнитного поля, тоже мала, и электрон летит почти по прямой. По мере «падения» на анод скорость электрона растет, сила Лоренца, равная  $evB$ , увеличивается, траектория изгибается. При малой индукции магнитного поля электрон отклоняется от прямой, но анода все же достигает. При большой индукции поля траектория электрона анода не достигает. Когда скорость станет горизонтальной, электрон начнет возвращаться к катоду. Теперь он движется против электрического поля, и скорость его уменьшается. Наконец, подлетев к катоду, электрон уменьшает свою скорость до нуля. И все повторяется сначала.

В ЭВП СВЧ со скрещенными полями применяется и другое расположение электродов – коаксиальные катод и анод (рис.2). В этом случае также при малых  $B$  ток в цепи катод

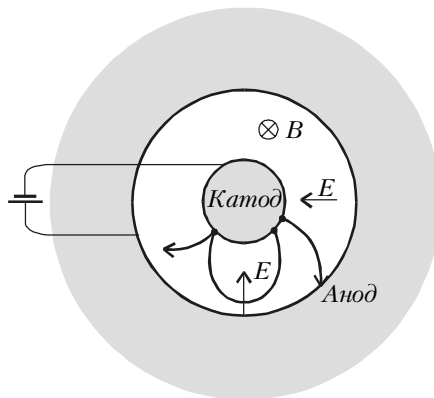


Рис.2. Движение электрона в скрещенных полях, когда электроды коаксиальные

– анод идет, при больших  $B$  – нет.

На качественном уровне с движением электрона в скрещенных полях все ясно. Пока неясно, зачем это нужно и как при этом усиливаются или генерируются электромагнитные колебания. Заметим, что работают ЭВП со скрещенными полями как раз при таких магнитных полях, при которых электроны не должны долетать до анода. Но если ток не течет, то прибор не потребляет мощности от источника питания и ему нечего преобразовывать в энергию электромагнитного поля. Так что электроны должны долетать до анода и должны отдавать энергию, возбуждая колебания электромагнитного поля. Вещи эти связанные (внимание, это ключевое место!): если электрон отдает энергию, например в точке & на

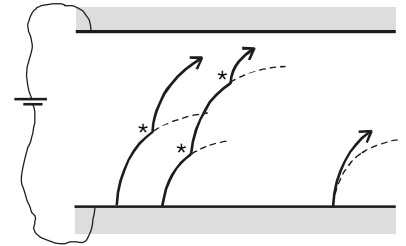


Рис.3. Отдача энергии электроном в точке & или вдоль всей траектории

рисунке 3, то он... успешно падает на анод – ведь в точке & он как бы начинает двигаться заново, с нулевой скоростью, как только что вышедший из катода. Но в ЭВП электроны не отдают энергию в какой-то одной точке, а делают это понемногу все время. Поэтому траектория состоит не из кусков, как на рисунке 3 слева, а просто имеет меньшую кривизну, как на рисунке 3 справа.

Перед тем как перейти к вопросу об усилении и генерации электромагнитных колебаний, заметим еще одну вещь. Движение электронов в системе электродов, показанных на рисунках 1 и 2, можно с пользой применить и без генерации. Видно, что если плоский катод на рисунке 1 длинный, то в пространстве между ним и анодом собирается много электронов. Такую систему можно использовать в качестве электронной пушки в любом ЭВП, в котором нужен плотный электронный поток. Так же можно использовать и коаксиальную электродную систему на рисунке 2. Катод и анод делают не совсем цилиндрическими, а слегка конусными. Электро-

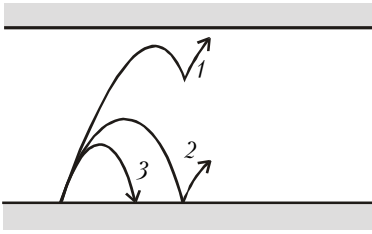


Рис.4. Движение электронов в ЭВП со скрещенными полями при взаимодействии с электромагнитной волной

ны закручиваются вокруг продольной оси и, из-за наличия у электрического поля осевой составляющей, начинают дрейфовать к выходу из магнетронной пушки. При равенстве магнитной и электрической сил электроны будут вращаться по окружностям, точнее – по спиралям. Поток, выходящий из магнетронной пушки, получается, естественно, винтовым. Это не мешает использовать его в любом ЭВП СВЧ, например в клистроне. Он может быть использован и в приборе со скрещенными полями. Такой прибор будем называть митроном.

Теперь перейдем к принципу генерации и усиления в приборах со скрещенными полями (магнетронах, митронах и т.п.). Приборов таких существует очень много, и после рассмотрения принципа их работы мы узнаем, например, почему так обширно и разнообразно семейство магнетронов.

### Есть ли разница, куда падать?

Напомним, что 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.

Посмотрим, как ведут себя электроны между катодом и анодом в электронно-вакуумном приборе со скрещенными полями (рис.4). Поведение электронов описывается двумя процессами – сортировкой и фазировкой. Сортировка происходит так. Электрон 1, который вышел из катода в такой момент, что потом он должен отдавать энергию

волне, падает на анод, падает и отдает энергию, отдает и отдает... Это – хороший электрон. Плохой электрон, который вышел из катода в такой момент, что волна должна отдавать ему энергию, тут же завершает свою биографию, врезавшись в катод. Заметьте, что теперь ток на анод будет идти даже при таких больших магнитных полях, при которых раньше (в отсутствие электромагнитного поля) ток не шел.

Но процессом сортировки дело не исчерпывается. Хорошие электроны не только отделяются от плохих, но и фазированы, собираются в сгустки, как в ЛБВ. Только сгустки эти называют спицами, и понятно почему – представьте себе, как они движутся в системе, показанной на рисунке 2. Позже мы узнаем, что и от плохих электронов есть польза.

Заметим, что электронам не обязательно двигаться по сложным траекториям, показанным на рисунках 1 и 2. Если, например, на рисунке 1 электрон летит вдоль катода (горизонтально), причем поля подобраны так, что сила, действующая на него со стороны электрического поля, равна силе, действующей со стороны магнитного поля, то электрон будет продолжать лететь по прямой. Легко понять, что и круговую траекторию можно организовать таким же способом.

При взгляде на рисунок 2 бросаются в глаза два главных отличия магнетрона от ЛБВ – «круглость» и «смешанность». Первое, если выражаться точнее, это замкнутость замедляющей системы и электронных траекторий. Обе эти «замкнутости» не обязательны – есть приборы с одной из этих замкнутостей или даже вовсе без них. Но именно возможность наличия или отсутствия этих замкнутостей делает семейство магнетронов столь обширным.

Далее, «смешанность». Она тоже может быть выражена в разной степени. Например, в клистроне все отдельно – катод, входной резонатор, пролетное или «дрейфовое» пространство, выходной резонатор и коллектор. Функции всех пяти узлов вам уже известны. Правда, промежуточные резонаторы делают отчасти то, что выходной, и отчасти то, что входной. Но в ЛБВ средние три элемента всегда смешаны в

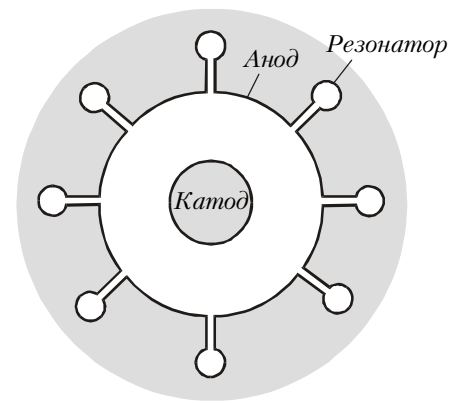


Рис.5. Магнетрон с резонаторами типа «цель-отверстие»

спирали: входная ее часть в основном модулирует пучок, выходная в основном снимает сигнал с пучка и вся она – пролетное пространство. В магнетроне (рис.5) смешано все вместе – все его сечения эквивалентны, все они содержат кусочек катода, кусочек пролетного простран-

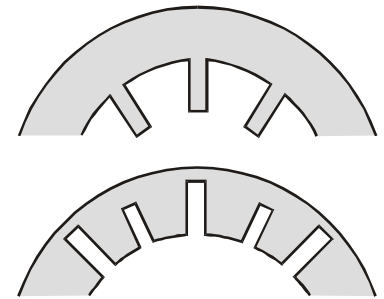


Рис.6. Замедляющие системы магнетронов: вверху – лопаточного типа, внизу – щелевого типа

ства, кусочек анода и, конечно, кусочек замедляющей системы. Замедляющая система в магнетроне состоит из резонаторов, а резонаторы могут быть разными (рис.6).

В отличие от лампы бегущей волны и лампы обратной волны в магнетронах замедляющие системы часто делают состоящими из резонаторов, настроенных на две резонансные частоты. На рисунке 6 внизу показан разнорезонаторный «анодный блок» с резонаторами щелевого типа. Такая конструкция называется романтично – «восходящее солнце». Одни и те же вещи можно называть по-разному. Можно: «резонаторный щелевой блок», а можно: «восходящее солнце». Для того чтобы назвать красиво, надо иметь возможность хотя бы на пять минут задуматься о восходе солнца и

иметь желание думать о том, чтобы назвать красиво. Нужно то счастливое состояние души, которое создается трудной, но посильной работой и ощущением свободы выбора рода деятельности вообще и конкретной задачи и путей ее решения в частности.

Многое связано в нашей жизни с работой. Трудно сказать, более ли счастливы те, у кого это «многое» больше, чем у других. Но те, кто много работают, не соглашаются работать меньше даже тогда, когда окружающая жизнь работать мешает. О переплетении работы и жизни рассказывает единственная художественная книга, названная именем СВЧ ЭВП. Книга «Магнетрон» опубликована в 1957 году физиком Г.И.Бабатом и писательницей А.Л.Гарф. Это книга о временах, когда перед физиками стоял вопрос, почему на экранах американских радаров не видны, а на экранах английских радаров видны перископы нацистских подводных лодок, подкрадывающихся к берегам Англии. Для вас сейчас это не вопрос – просто длина волны, которую генерировали американские магнетроны, была больше диаметров перископов, а длина волны, которую генерировали английские магнетроны, была меньше. И многие другие тогдашние вопросы сейчас не вопросы... Но тогдашние вопросы сменились сегодняшними.

Если же рассуждения в этом разделе показались вам слишком сложными, вот модель попроще.

Представьте себе камень, который сначала подняли на гору, а потом уронили в пропасть. Он упадет, разогнавшись до какой-то скорости, и в процессе его полета работа, которую производит над ним гравитационное поле Земли, увеличивает его, камня, энергию (он летит все быстрее и быстрее). Теперь предположим, что камень падает по такой хитрой трубе, что через каждые сколько-то метров он сталкивается с выступом скалы, преобразуя накопленную энергию в звук удара, отскакивает и начинает лететь дальше. Если правильно подобрать расстояния между выступами, звуки ударов будут складываться, и у любопытного конструктора зазвонит в ушах.

Теперь заменим камень на электрон, гравитационное поле на элект-

рическое, а трубу с выступами на... в общем-то, именно трубу с выступами. Только не каменными, а металлическими. Пролетая мимо (вблизи, но именно мимо, в отличие от камня) них, электрон вызывает перемещение электронов в поверхностных слоях металла, т.е. ток, и электромагнитное поле. Это поле и есть то самое электромагнитное поле, а если период выступов подобран правильно, то поле усиливается, и в итоге мы получаем мощную сверхвысокочастотную электромагнитную волну.

### Маленький катод позволяет выкинуть большую схему

Смысл выражения «катод – сердце электронного прибора» в том, что параметры ЭВП во многих случаях определяются параметрами катода, а что до срока службы ЭВП – так он почти всегда определяется катодом. Но в магнетроне ситуация совершенно особая.

Часть электронов, эмитированных катодом, возвращаются на него, причем «не подползают» к нему, потратив всю энергию, а врезаются в него, имея вполне приличную скорость. Правда, эта энергия досталась электронам несправедливым путем – она «украдена» у электромагнитной волны, но катоду от этого не легче. Возврат таких электронов на катод влечет его нагрев. Иногда мощность, поступающая на катод, так велика, что его приходится охлаждать.

Но электронная бомбардировка не только нагревает катод. Приходящие на катод электроны 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. Конечно, избавиться от накала довольно соблазнительно, поэтому постоянно ведутся поиски материалов с большой вторичной эмиссией. Однако – как и следовало ожидать – материалы, имеющие большую вторичную эмиссию, быстро разрушаются бомбардируемыми электронами. Но это не самое интересное.

Вспомним о лампе обратной волны, синхронизованной внешним генератором. Что будет, если не по-

дать на ее вход, который находится около коллектора, синхронизирующий сигнал? Она будет не очень стабильной. Если мы хотим, чтобы такая лампа генерировала импульсный сигнал вполне определенной частоты, надо подавать напряжение питания только на время импульсов. Делает это достаточно большая схема, называемая модулятором. Заметим, что выходная лампа модулятора должна пропускать через себя всю мощность питания ЭВП. Так что места эта схема займет больше, чем тот ЭВП, которому она и будет модулировать питание. Но без модулятора не обойтись.

Теперь представим себе усилитель – клистрон или ЛБВ. Пусть нам надо, чтобы он работал в импульсном режиме. Опять нужен модулятор – ведь если анодное напряжение подавать на клистрон непрерывно, на его коллекторе будет выделяться такая мощность, что он разрушится быстрее, чем вы успеете сказать «ой!».

А вот в магнетронных усилителях без модулятора иногда можно обойтись. Действительно, представим себе прибор с холодным катодом, эмитирующим только за счет вторичной эмиссии. При наличии на лампе напряжения, но при отсутствии СВЧ-сигнала на входе ток через лампу течь не будет. Редкие электроны, выскочившие из катода, будут мирно улетать на анод и... все. Теперь подадим на вход лампы СВЧ-сигнал. Кое-какие из этих электронов будут попадать в тормозящее поле и возвращаться на катод, возвращаться и выбивать из него вторичные электроны. И если на один первичный вылетевший из катода электрон будет приходиться в среднем больше одного вторичного, то начнется лавинный процесс умножения электронов. Через лампу пойдет ток. Прибор начнет усиливать.

Это и называется безмодуляторным питанием. Но для работы в таком режиме ЭВП должен иметь катод с высокой вторичной эмиссией. Вот и опять потребовался хороший катод...

Уточним, что такое в данном случае «хороший». Конечно, катод магнетрона нужна термоэмиссия, должен иметь все те хорошие свойства, ко-



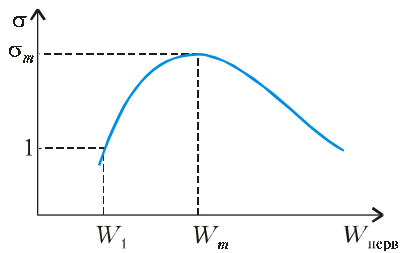


Рис.7. Зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии первичных электронов

торые должен иметь термоэлектронный катод: нужную эмиссию, не слишком большую скорость испарения, достаточный срок службы, способность работать в том вакууме, который будет в приборе.

А какие свойства должен иметь катод как вторично-электронный катод? Он должен сохранять все свои свойства при наличии электронной бомбардировки, иметь достаточный срок службы в этих условиях и, наконец, иметь достаточную вторичную эмиссию. Коэффициент вторичной эмиссии всех материалов зависит от энергии первичных электронов (рис.7). Коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma$  — это отношение количества улетающих от куска материала электронов к количеству прилетевших. Энергия  $W_1$ , при которой  $\sigma = 1$  (так называемый первый критический потенциал), энергия  $W_m$ , при которой достигается максимум  $\sigma$ , и сам максимум  $\sigma_m$  — это те три величины, которые и важны для работы ЭВП. Желательно, чтобы  $W_1$  было поменьше, а  $\sigma_m$  — побольше. У металлов  $\sigma_m$  мало, а  $W_1$  велико, но им не страшна электронная бомбардировка, а у диэлектриков велико  $\sigma_m$ , но мало  $W_1$  и низкая стойкость к электронному облучению. История катодов магнетронов — это история поисков композиционных материалов, сочетающих лучшие свойства металлов и диэлектриков. Ибо чем больше  $\sigma_m$  и  $W_m$ , тем большую мощность можно получить на выходе магнетронного усилителя, а чем меньше  $W_1$ , тем меньшую мощность надо подавать на его вход.

### Когда все упирается в технологию?

Довольно часто. Особенно, если попытаться сделать что-то новое. Конкретно — на краях освоенного диапазона параметров. При попыт-

ках сделать ЭВП рекордной мощности, КПД или частоты или с рекордным сочетанием нескольких параметров оказывается, что либо нельзя сделать такую конструкцию, как хочется, либо сделать можно, но нет материалов, при использовании которых все это сможет работать. Выходом из положения является обычно или создание новой технологии, позволяющей сегодня сделать то, чего нельзя было сделать вчера, или создание новых материалов, позволяющих прибору работать в новых условиях. Впрочем, новые материалы — это, как правило, и новые технологии.

Технологических проблем в магнетроне много. Остановимся на двух. Первая — проблема обеспечения малых размеров и малых допусков (т.е. точных размеров). Эта проблема общая у всех ЭВП СВЧ, 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, электроннолучевую и электрохимическую обработку, резку и «сверление» электронным лучом и, наконец, все традиционные виды металлообработки. Выдавливанием удается изготовлять системы с толщиной лопаток 0,1 мм, а допуски на размеры при электроннолучевой 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) и позволяющими получать микронные размеры.

По мере уменьшения размеров и увеличения мощности увеличивается плотность мощности, выделяющейся на внутренней поверхности анодного блока, куда попадают приносящие эту мощность электроны. Поэтому эту поверхность покрывают молибденом или вольфрамом или же делают анодный блок из хитрой

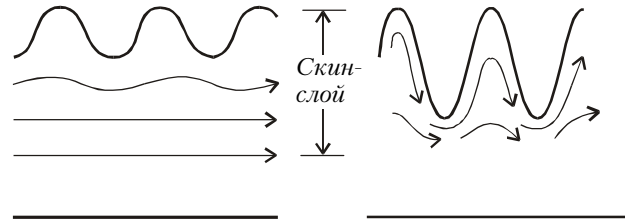


Рис.8. Скин-эффект на шероховатой поверхности

заготовки — молибденового прутка, залитого медью.

Конечно, проблема обеспечения малых размеров и допусков встречается и в других областях техники. Но вот вам второй пример — пример проблемы, пожалуй, совсем специфической. Насколько гладкой должна быть поверхность деталей? Коэффициент трения значения не имеет, «блеск» тоже, так какая же разница, гладко или не очень? Но разница есть.

Как известно, в области высоких частот ток концентрируется у поверхности детали (скин-эффект). Если шероховатость меньше толщины, в которой сосредоточен ток, то шероховатость мешает работе мало (см. рис.8, слева). Если шероховатость больше (см. рис.8, справа), то путь электронов увеличивается. Следовательно, увеличиваются сопротивление и потери мощности. Заметим, что важно, как именно «устроена» шероховатость. Если деталь шлифовалась в одном направлении и так, что токи протекают вдоль «оврагов», то увеличения сопротивления не будет. Если же ток «взбирается и ныряет», то потери мощности неизбежны.

Отсюда мораль — подстилая соломку там, где вам или вашим электроном предстоит упасть, думайте, как ее класть.