

# ВВЕДЕНИЕ

## 1. ГЕНЕРАЦИЯ И УСИЛЕНИЕ СВЧ-ВОЛН

В первой четверти двадцатого века возникла потребность в значительном повышении частоты используемых в радиотехнике волн для получения высокой направленности излучения и повышения информационной емкости каналов связи. К отвечающему этим требованиям сверхвысокочастотному диапазону условно относятся волны с длиной волны от 1 м до 100 мкм (то есть от 300 МГц до 3000 ГГц). Однако в СВЧ-диапазоне работа традиционных электро - вакуумных генераторов и усилителей с сеточным управлением значительно ухудшается из-за влияния емкостей и индуктивностей электродов, вводов и даже элементов электромагнитного тракта. Практическая соизмеримость характерного периода колебаний с временем пролета электронов в межэлектродном пространстве делает генерацию невозможной ( это означает, что невозможно управлять фазовой фокусировкой и модуляцией с помощью статических электродов - сеток ).

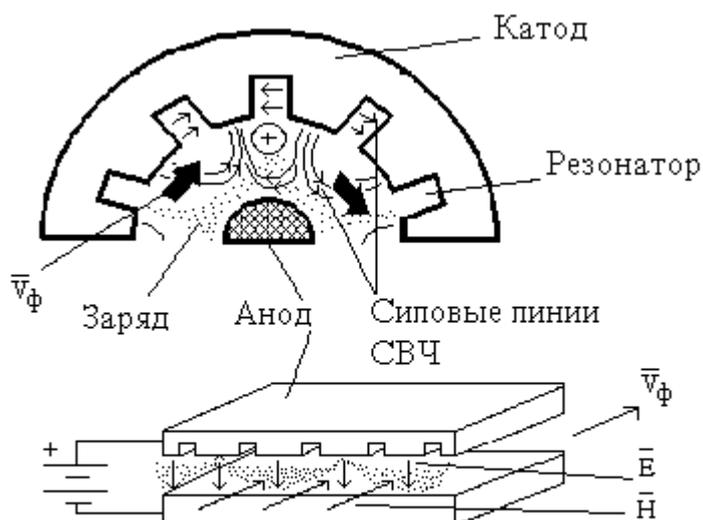


Рис.1 Магнетрон.

В основу работы современных генераторов и усилителей СВЧ положен принцип взаимодействия токов носителей зарядов с СВЧ-полями. В таких приборах управление ( фазовая и скоростная модуляция) осуществляется с помощью элементов волноводных трактов: резонаторов и замедляющих систем.

Условно все СВЧ-приборы можно разделить на две категории: вакуумные и твердотельные. К первой относится магнетрон, сконструированный в 1924 г. Схема простейшего магнетрона приведена на рис.1. Между катодом и анодом за счет внешнего источника постоянного напряжения

возникают скрещенные статическое электрическое и магнитное поля. Электроны в таких скрещенных полях движутся с определенной средней скоростью по замкнутым круговым орбитам. Если эта скорость равна средней скорости СВЧ - волны, то есть выполняется условие **СИНХРОНИЗМА** электронов и волн (рис.2), то СВЧ-поле, наведенное электронами в резонаторах, проникает из щелей резонаторов в промежуток анод-катод с определенной пространственной периодичностью, тормозит эти электроны, формируя из них так называемые "спицы" пространственных зарядов. При этом торможении кинетическая энергия электронов переходит в энергию СВЧ-поля. Для полной передачи энергии от электронов полю необходимо, чтобы электроны перемещались от резонатора к резонатору за время  $t_{пр} = 1/2 T_{СВЧкол}$ . Таким образом **частота СВЧ-колебаний** и **геометрические размеры** резонаторов тесно связаны друг с другом. Очевидно, что частота генерации зависит и от напряженности магнитного поля **H**. Вращаясь по круговым орбитам, электроны многократно отдают свою энергию СВЧ-полю, так что  $KПД_{ген} \sim 90\%$ . Кроме магнетрона существует еще множество ламп, в которых электроны движутся в скрещенных полях. К ним относятся: дематрон, в котором электроны движутся по разомкнутым орбитам; амплитрон - лампа, катод которой расположен непосредственно в пространстве взаимодействия;

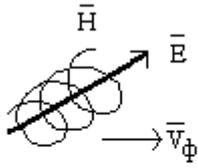


Рис.2 Траектория электрона в скрещенных полях.

митрон - сильно перестраиваемый по частоте магнетрон; карматрон - магнетрон, в котором направление распространения СВЧ-волны и энергии противоположны. Все эти устройства называются приборами М-типа.

Другой принцип работы у отражательного клистрона (от греческого *klyzo* - ударять), сконструированного в 1935 г (рис.3). Вылетая с катода, электроны пролетают резонаторный зазор и отражаются от специального отражателя.

Неускоренные электроны при отражении повернут раньше, не долетая до отражателя, а ускоренные позже, но на пролет зазора катод-отражатель они затратят меньше времени. В итоге из быстрых и медленных электронов образуются

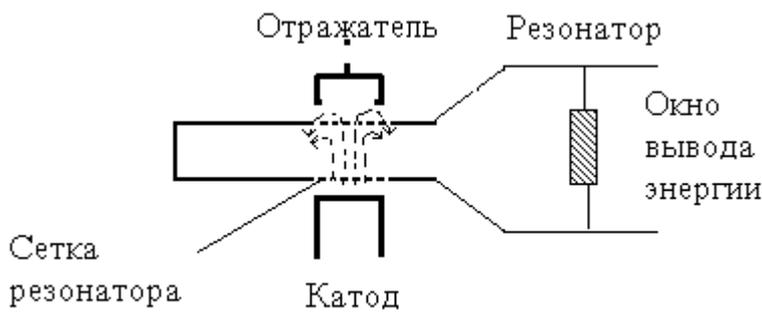


Рис. 3 Отражательный клистрон

моноскоростные сгустки. Если напряжение на отражателе  $U_{отр}$  таково, что сгусток окажется в отрицательном полупериоде СВЧ-поля, наведенного (как и в магнетроне) в резонаторе

электронами, то поле затормозит его, или перемещая сам

забрав себе часть его кинетической энергии. Меняя  $U_{отр}$  отражатель, можно перестраивать клистрон по частоте. Обычно отражательный клистрон используется в роли маломощного и малозумящего гетеродина.

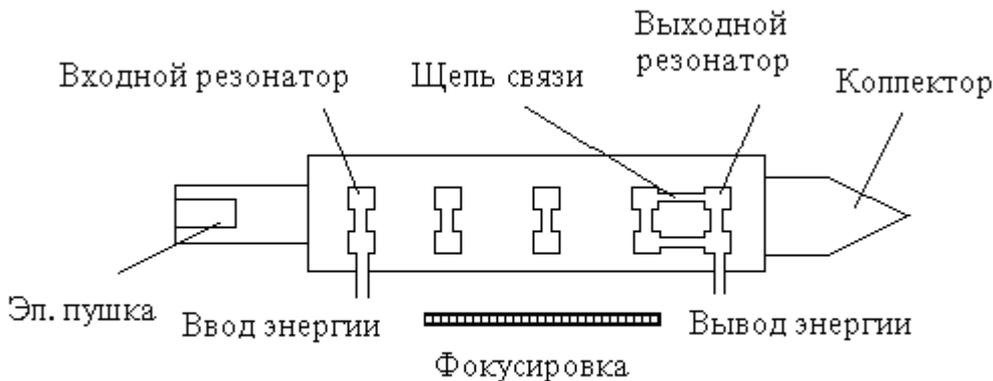


Рис. 4 Пролетный клистрон

Несколько иначе устроен пролетный клистрон (рис.4). В нем имеются входной и выходной резонаторы, соединенные щелью обратной связи (могут быть так же и несколько промежуточных резонаторов). Электронный пучок попадает с катода во входной резонатор. В нем СВЧ-поле в течение одного полупериода ускоряет электроны, а в течение другого - замедляет. В зоне дрейфа ускоренные электроны догоняют замедленные и образуют моноскоростные пучки. В выходном резонаторе электроны взаимодействуют с наведенным ими же СВЧ-полем, тормозясь и усиливая его. Затем часть энергии через щель обратной связи попадает во входной резонатор, формируя новые сгустки. Если клистрон

выступает в роли усилителя, то щель обратной связи должна отсутствовать. Доведя число промежуточных резонаторов до 12, удается получить КПД усил - 85% и выходную мощность в несколько Мвт.

Позже (в конце 40-х годов) были созданы лампы бегущей и обратной волны (ЛБВ и ЛОВ соответственно). Конструкция этих ламп описана в соответствующих задачах. Как и в клистронах, в этих лампах направление движения электронов и фазовая скорость СВЧ-волны параллельны (осуществляется, в отличие от приборов М-типа не поперечное, а продольное взаимодействие). Такие устройства относятся к приборам О-типа.

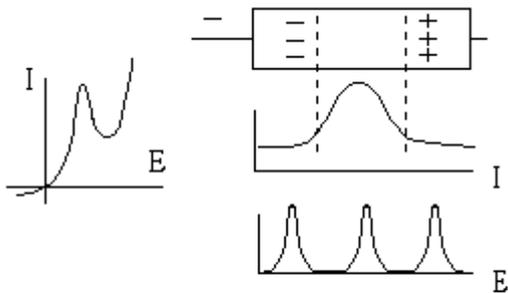


Рис.5 Диод Ганна

Твердотельные СВЧ-приборы вначале были представлены лишь обычными полупроводниковыми диодами, в которых использовалась малая инерциальность электронно-дырочного перехода. Наряду с ними широко используются лавинно-пролетный диод (ЛПД, см. соответствующую задачу), открытый в 1959 году, и диод Ганна (диод с междолинным переходом, МПД, 1963г). Полупроводник в диоде Ганна имеет N-образную вольт-амперную характеристику (рис.5). Если внешнее постоянное электрическое поле

превышает некоторое пороговое значение, средняя плотность тока начинает падать (участок отрицательного наклона и, соответственно, отрицательной проводимости). Флуктуации токов при этом приводят к образованию электрического домена (аналог сгустка в вакуумной лампе), поле внутри которого значительно превосходит пороговое. Попадая в область дрейфа, домен вызовет увеличение (резкий всплеск) тока, поле превысит пороговое и ток скачком уменьшится, после чего процесс повторится с характерной частотой СВЧ. В качестве МПД-структуры обычно используются Ga As, In P, In Sb и др. МПД и ЛПД обычно используются в качестве слабоперестраиваемых и маломощных генераторов ( $W_{\text{ВЫХ}} \sim 0.1-1$  Вт). Следует отметить, что твердотельные устройства СВЧ в несколько раз компактнее вакуумных, хотя и значительно уступают им по мощности выходного сигнала.

### ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В ВОЛНОВОДАХ

В диапазоне СВЧ основными видами передающих трактов являются коаксиальные линии и волноводы. Коаксиальные линии применяются, в основном, на частотах меньших 3-10 ГГц (длина волны порядка 10 см и более); на более высоких частотах обычно используются волноводы.

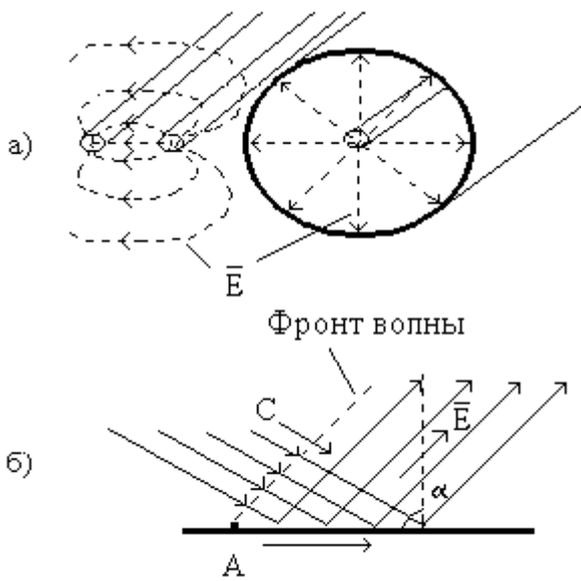


Рис. 6 Двухпроводная линия

которая, по существу, есть обычная "закрытая" двухпроводная линия (см. рис.6), при передаче сигнала все поля сосредоточены внутри замкнутого пространства между проводниками. Однако в коротковолновой части диапазона СВЧ выявляются недостатки и у таких линий. С увеличением частоты приходится уменьшать размеры их поперечного сечения: полусумма радиусов внутреннего и наружного проводников должна быть меньше длины волны (иначе могут возбуждаться несколько различных типов волн, отличающихся различным распределением полей). При уменьшении поперечных размеров линий растут потери, возникает опасность пробоя при передаче сигналов большой мощности. Такие недостатки в гораздо меньшей степени свойственны другому виду передаточных линий - полым волноводам.

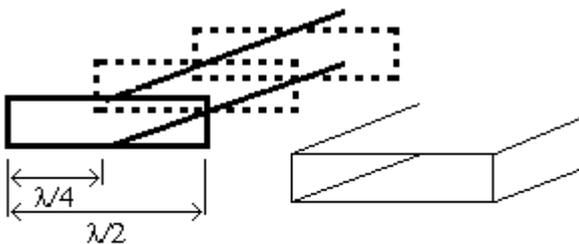


Рис.7 Волновод и эквивалентная ему линия.

отличаться от их распределения в двухпроводной линии хотя бы тем, что в волноводе все поля заключены внутри замкнутого объема. Кроме того, возникает и еще одна специфическая особенность. Если в двухпроводной и коаксиальной линиях распространяются чисто поперечные волны (как в свободном пространстве), то есть типа **ТЕМ** (трансверсальные электрические и магнитные поля), то в волноводах распространяются электромагнитные волны с продольной составляющей. Эти типы волн обозначаются так: тип "ТМ" или "Е" - трансверсальная магнитная - компонента электрического поля ориентирована вдоль направления распространения; тип "ТЕ" или "Н" соответственно для магнитной составляющей. Наглядно это можно проиллюстрировать следующим примером. Если плоская волна падает под некоторым углом на плоское же зеркало (рис.6а), то суммарное поле, являющееся результатом интерференции падающей и отраженной волн, будет иметь продольную (вдоль поверхности

Переход к коаксиальным линиям от систем открытых проводников, применяемых в традиционном радиочастотном диапазоне, обусловлен тем, что для цепей СВЧ-диапазона не выполняется условие квазистационарности (поперечные размеры отрезков проводящих линий становятся соизмеримы с длиной волны). При этом открытые линии начинают интенсивно излучать, растут потери, возникают паразитные связи и т.п. В коаксиальной линии,

Волновод представляет собой полую металлическую трубу с хорошо проводящими стенками, внутри которой может распространяться электромагнитная волна. Так же как и в коаксиальной линии, к волноводу можно перейти от двухпроводной линии: если оба проводника соединить коротко-замкнутыми отрезками линии длиной  $\lambda/4$  (они эквивалентны изоляторам) так, как показано на рис.7, и расположить эти отрезки вплотную друг к другу, то получится трубка прямоугольного сечения. Распределение полей в волноводе будет

зеркала) компоненту вектора  $\mathbf{E}$  (в нашем примере того вектора, который в падающей волне лежит в плоскости чертежа).

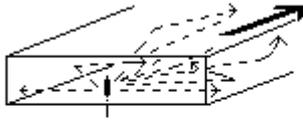


Рис. 8 Штыревой излучатель в прямоугольном волноводе.

Фазовая скорость распространения этого суммарного поля равна скорости передвижения линии пересечения фронта волны с отражающей поверхностью (точка А), т.е.  $v = c/\sin\alpha$ . Волновод можно рассматривать как систему плоских зеркал, образующих замкнутую полость. Пусть при этом на одной из стенок волновода находится штыревой излучатель-антенна (рис.8). Форма испускаемой им волны достаточно сложна и

подобна полю излучения диполя в ближней зоне, но она может рассматриваться как сумма плоских волн, распространяющихся во всевозможных направлениях кроме направления вдоль оси излучателя. Волны, волновые векторы которых лежат в плоскости поперечного сечения, падают на узкие стенки волновода, отражаются, но поскольку их волновой вектор остается лежать в той же плоскости, они не участвуют в переносе энергии вдоль волновода, а образуют в результате взаимной интерференции стоячую волну. Пучность этой волны должна находиться в месте расположения излучателя, а узлы - на узких стенках (речь идет об электрическом поле волны). Отсюда вытекает, что расстояние от излучателя до каждой из боковых стенок должно быть кратно  $\lambda/4$ , а расстояние между этими стенками -  $\lambda/2$ . Это условие мы получаем так же образуя волновод из двухпроводной линии (рис.7).

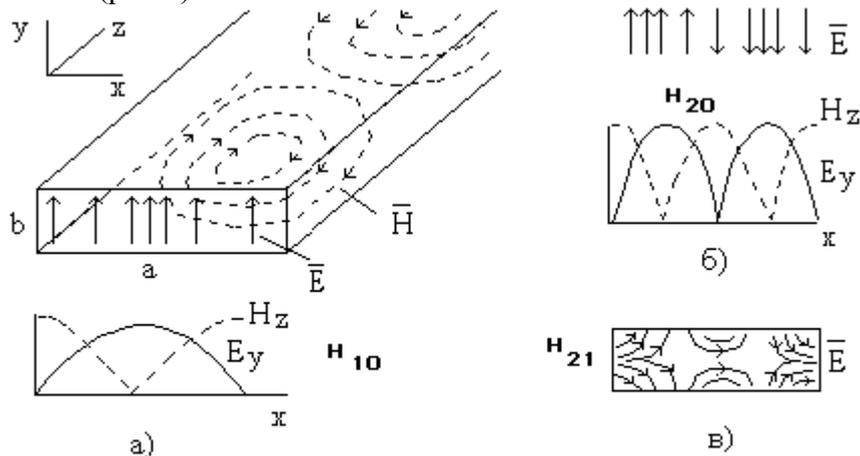


Рис.9 Структура поля в прямоугольном волноводе

Волны, волновые векторы которых имеют составляющую вдоль оси волновода, падая под углом на стенки волновода и отражаясь от них, образуют результирующую волну, бегущую вдоль волновода. Из рис.8 можно заключить, что фазовая скорость распространения волны вдоль волновода должна быть больше скорости света (и при этом волна должна иметь продольные компоненты векторов электрического или магнитного

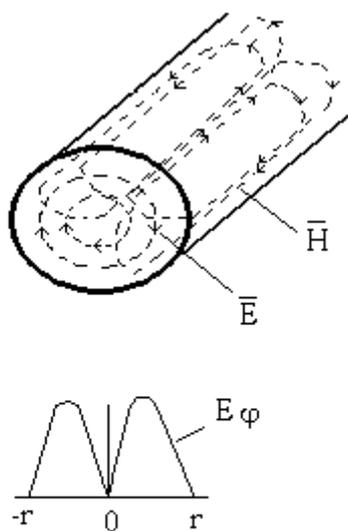


Рис.10 Структура поля  $H_0$  в круглом волноводе

поля в зависимости от типа волны). Простейшим типом волны в рассматриваемом примере волновода прямоугольного сечения является волна типа  $H_{10}$ . Соответствующее мгновенное распределение полей показано на рис.9а. Индексы, определяющие тип волны, обозначают количество максимумов напряженности поля по координатам поперечного сечения (в данном случае по  $X - 1$ , по  $Y - 0$ ). Имеется в виду то поле, которое является в данной волне поперечным (в данном примере - электрическое).

При заданных размерах волновода по нему могут распространяться волны с длиной, не превышающей удвоенное расстояние между узкими стенками, то есть  $\lambda_{крит} = 2a$ . В случае больших длин волн не будут выполняться граничные условия для стоячей волны, устанавливающейся в поперечном направлении, так как электрическое поле на боковых стенках должно

быть равно нулю. При уменьшении длины волны, как только расстояние между узкими стенками будет соответствовать двум полуволнам, может возникнуть другой, "высший" тип волны, например  $H_{20}$  (рис.9б), или даже  $H_{21}$  (рис.9в), если расстояние между широкими стенками станет больше или равно полуволне. Заметим, что при этом сохраняется возможность одновременного возбуждения низших типов волн. Обычно стремятся работать при таких условиях, когда возможно возбуждение лишь какого-нибудь одного из низших типов волн, который характеризуется наибольшей критической длиной волны. Для прямоугольных волноводов это тип  $H_{10}$ , для круглых -  $H_{01}$ .

В некоторых случаях могут применяться волноводы круглого сечения. На рис. 10 приведена структура поля волны  $H_{01}$  в таком волноводе. Здесь индексам соответствуют координаты  $\phi$  и  $r$ , "1" означает число максимумов напряженности поля  $E$  по радиусу. Предпочтение, отдаваемое прямоугольным волноводам, связано с целым рядом причин, среди которых немаловажное место занимают такие факторы, как простота изготовления различных волноводных устройств - разветвлений, переключателей, аттенуаторов.